GASIFICATION OF COFFEE HUSK UNDER VARIOUS INDUSTRIAL RELEVANT ATMOSPHERES

Nguyen Hong Nam*, Cao Thi Anh Ngoc
University of Science and Technology – Viet Nam Academy of Science and Technology

ARTICLE INFO

Received: 22/6/2021
Revised: 20/11/2021
Published: 24/11/2021

KEYWORDS

Biomass
Coffee husk
Gasification
Kinetics
Thermal behavior

ABSTRACT

The abundant coffee husk residue in Vietnam could become a potential feedstock for gasification with the help of a complete engineering profile established. This study investigated the coffee husk characteristics and its thermal behaviors during gasification. high volatile matter of 70.8 % and a high ash content of 9.2 % were recorded for coffee husk. The engineering properties of the biomass were determined by ASTM methods, while the thermal behavior was determined by a Macro-TGA system. The higher heating value was 18.6 $MJkg^{-1}$, which is comparable with common woody biomass. The degradation of coffee husk began at 245^oC and achieved the maximum weight loss rate (R_{max} = 0.4%$^oC^{-1}$) at 310^{o}C. Coffee husk char gasification kinetics under various atmospheres relevant to industrial processes were quantified. Database and results from this study would provide useful information for the design or modeling of an efficient coffee husk gasifier.

KHÍ HÓA VỎ HẠT CÀ PHÊ TRONG MÔI TRƯỜNG LIÊN QUAN ĐẾN CÁC QUY TRÌNH CÔNG NGHIỆP

Nguyễn Hồng Nam*, Cao Thị Anh Ngọc
Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 22/6/2021
Ngày hoàn thiện: 20/11/2021
Ngày đăng: 24/11/2021

TỪ KHÓA

Sinh khối
Vỏ hạt cà phê
Khí hóa
Động học
Hành vi nhiệt

TÓM TẮT

Nguồn vỏ hạt cà phê dồi dào tại Việt Nam có thể trở thành nguyên liệu tiềm năng cho quá trình khí hóa nếu một hồ sơ kỹ thuật hoàn chỉnh được thiết lập cho công nghệ này. Nghiên cứu này đã điều tra các đặc điểm của vỏ hạt cà phê và các hành vi nhiệt trong quá trình khí hóa. Các đặc tính kỹ thuật của sinh khối được xác định bằng các phương pháp ASTM, trong khi đó hành vi nhiệt được xác định bằng hệ thống Macro-TGA. Chất bay hơi (70,8%) và hàm lượng tro cao (9,2%) đã được ghi nhận đối với vỏ hạt cà phê. Nhiệt trị hạt cà phê đạt 18,6 $MJkg^{-1}$, có thể so sánh với sinh khối gỗ thông thường. Sự phân hủy của vỏ hạt cà phê bắt đầu ở 245°C và đạt tỷ lệ hụt khối tối đa (R_{max} = 0,4%°C^{-1}) ở 310°C. Động học khí hóa than vỏ hạt cà phê trong các môi trường khác nhau liên quan đến các quy trình công nghiệp cũng được định lượng cụ thể. Cơ sở dữ liệu và kết quả từ nghiên cứu này sẽ cung cấp các thông tin hữu ích cho việc thiết kế hoặc mô hình hóa các thiết bị khí hóa vỏ hạt cà phê tiên tiến.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4679

* Corresponding author. *Email: Nguyen-hong.nam@usth.edu.vn*

1. Giới thiệu

Cây cà phê được trồng ở hơn 50 quốc gia, với sản lượng toàn cầu ước tính đạt khoảng 10 triệu tấn trong năm 2019-2020. Hiện nay, Việt Nam đứng thứ hai về sản xuất cà phê toàn cầu, chỉ sau Brazil, với sản lượng trung bình hàng năm vượt 1,5 triệu tấn [1].

Quá trình chế biến hạt cà phê tạo ra một lượng lớn vỏ hạt, chiếm 12% khối lượng khô, tức là mỗi tấn hạt cà phê khô sẽ tạo ra 0,12 tấn vỏ [2]. Phần vỏ này thường được phủ hoặc đốt trên rẫy cà phê mà không qua xử lý, gây ô nhiễm môi trường. Hơn nữa, vỏ cà phê chứa nhiều caffein và tannin có thể gây độc và ức chế vi sinh vật. Hậu quả là nó bị phân hủy chậm trong môi trường tự nhiên, tạo ra nguồn tích lũy dịch bệnh cho các vụ sau [3]. Một số giải pháp để tận dụng nguồn sinh khối dồi dào này đã được đề xuất, chẳng hạn như trộn vỏ hạt cà phê với phân chuồng để 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 vỏ hạt cà phê được tạo ra. Vì vậy, việc coi vỏ cà phê là nguyên liệu thô cho các ứng dụng có giá trị cao khác, ví dụ như khí hóa để sản xuất năng lượng là điều cần thiết.

Khí hóa là một quá trình nhiệt hóa chuyển đổi các vật liệu giàu cácbon thành khí tổng hợp, chủ yếu gồm cacbon monoxit (CO) và hydro (H_2) [6]. Khí tổng hợp có thể được sử dụng trong nhiều ứng dụng như sản xuất nhiệt và điện, hay sản xuất nhiên liệu sinh học. Khí hóa được coi là một công nghệ thu hồi năng lượng hấp dẫn, góp phần vào việc sử dụng sinh khối rộng rãi [7]. Quá trình này bao gồm rất nhiều các phản ứng hóa học phức tạp diễn ra đồng thời và cạnh tranh lẫn nhau. Đầu tiên, sinh khối được làm khô và sau đó quá trình nhiệt phân diễn ra để chuyển hóa sinh khối thành than và chất bay hơi. Các sản phẩm được tạo ra từ các bước này sau đó được oxy hóa một phần để tạo ra CO_2 và H_2O. Cuối cùng, quá trình khí hóa giữa than và các tác nhân khí hóa diễn ra, sinh ra khí tổng hợp. Do đó, kiến thức đầy đủ về các đặc điểm và hành vi nhiệt của vỏ hạt cà phê đóng một vai trò quan trọng trong việc mô hình hóa và thiết kế một quy trình khí hóa thích hợp. Các đặc tính quan trọng của sinh khối có thể ảnh hưởng đến quá trình khí hóa bao gồm hàm lượng chất bốc, hàm lượng cacbon cố định, hàm lượng tro và nhiệt trị. Trong khi hàm lượng chất bốc và hàm lượng cacbon cố định có thể được sử dụng để dự đoán sản lượng khí tổng hợp và than trong quá trình khí hóa, nhiệt trị là một thông tin rất hữu ích để đánh giá tiềm năng sản xuất năng lượng của toàn bộ hệ thống. Hàm lượng tro cũng cần được xác định để đánh giá các vấn đề có thể phát sinh đối với hệ thống khí hóa, chẳng hạn như tắc nghẽn nguyên liệu, hoặc xử lý cặn xỉ trong hệ thống. Hơn nữa, các hành vi nhiệt đo được bằng phương pháp phân tích nhiệt trọng - vi sai (TGA-DTG), chẳng hạn như nhiệt độ phân hủy ban đầu, nhiệt độ phân hủy tối đa, tốc độ phân hủy, v.v... là cần thiết cho việc thiết kế một hệ thống khí hóa hiệu quả [8]. Kỹ thuật TGA-DTG đã được sử dụng rộng rãi trong việc nghiên cứu các quá trình chuyển đổi nhiệt hóa như nhiệt phân và khí hóa [9], [10].

Một số nghiên cứu về đặc tính và hành vi nhiệt của vỏ hạt cà phê từ Brazil [11], Colombia [12], Tanzania [13] đã được tiến hành, nhưng kết quả chỉ ra tính không đồng nhất khá cao của các vỏ hạt này. Ngoài ra, các đặc tính của sinh khối được hình thành từ đặc điểm nội tại của sinh khối, điều kiện thời tiết và vị trí địa lý. Vì vậy, không thể ngoại suy các kết quả khí hóa từ các nghiên cứu trước đối với vỏ hạt cà phê ở Việt Nam. Hơn nữa, các nghiên cứu trước đây chỉ nghiên cứu quá trình khí hóa vỏ cà phê trong môi trường đơn giản như oxy, không khí hoặc hơi nước hoặc không khí - hơi nước [5], [14]. Hiện không có nghiên cứu nào được thực hiện với các điều kiện phức tạp gần với các điều kiện được tìm thấy trong công nghiệp, chẳng hạn như khí hóa trong môi trường hỗn hợp CO_2 - hơi nước. Trong thực tế, quá trình khí hóa thường được diễn ra với sự có mặt của cả hai tác nhân khí hóa này. Hai tác nhân này tác động lên vật liệu cacbon và tạo ra sự tương tác lẫn nhau. Các nghiên cứu về khí hóa với một tác nhân riêng lẻ đơn giản hóa quy trình thực tế, khiến việc áp dụng kết quả ở quy mô công nghiệp trở nên khó khăn.

Do đó, nghiên cứu này đã khảo sát tiềm năng khí hóa vỏ cà phê, dựa trên các đặc tính lý hóa và các hành vi nhiệt của chúng trong các điều kiện gần với các điều kiện được tìm thấy trong công nghiệp.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Vỏ hạt cà phê

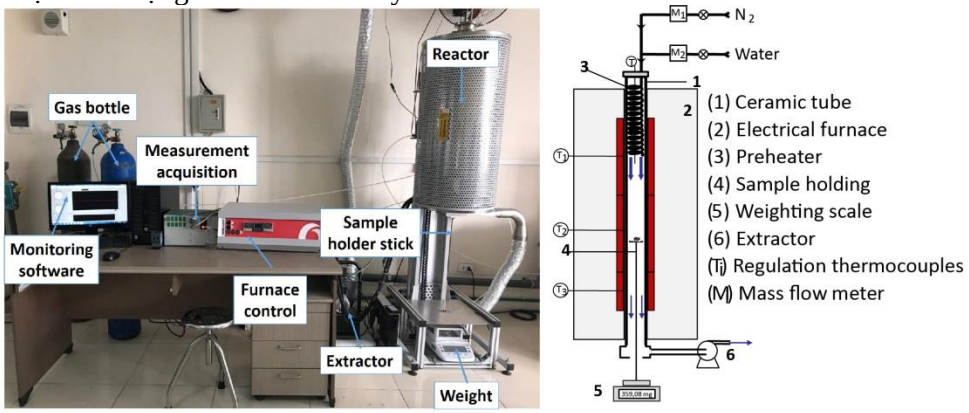
Vỏ hạt cà phê được lấy từ một cơ sở xay xát ở tỉnh Đắk Lắk, Việt Nam. Các mẫu được rửa sạch và làm khô trong tủ sấy (Memmert Model 800 Class B) trong 24 giờ. Chúng được nghiền và sàng lọc qua sàng để thu được kích thước nhỏ hơn 1,0 mm. Các vỏ hạt cà phê sau đó được lưu giữ trong hộp kín khí ở nhiệt độ phòng để phân tích thêm (Hình 1).

Hình 1. *(a) Quả cà phê, (b) Vỏ hạt cà phê thô và (c) Vỏ khô*

Các phân tích được tiến hành để xác định đặc tính của vỏ hạt cà phê bao gồm phép đo hàm lượng chất bốc (VM) theo tiêu chuẩn ASTM D-3175, hàm lượng tro (A) sử dụng tiêu chuẩn ASTM D-3174 và cacbon cố định được tính theo công thức FC (%) = 100 - (VM + A). Bên cạnh đó, nhiệt trị cao (HHV) được xác định bằng bom nhiệt lượng kế Parr 6200.

2.2. Thí nghiệm nhiệt phân và khí hóa

Một hệ thống phân tích nhiệt trọng trường vĩ mô (Macro-TGA), được thiết kế bởi USTH và CIRAD, đã được sử dụng cho nghiên cứu này (Hình 2). Lò phản gồm một ống sứ 111 x 7,5 cm (độ dài x đường kính) (1) bao quanh bởi hệ thống gia nhiệt bằng điện (2). Các vùng gia nhiệt độc lập (T_i) có nhiệm vụ duy trì nhiệt độ lò phản ứng một cách đồng nhất. Một hỗn hợp khí gồm N_2 và khí phản ứng (H_2O, CO_2) được đưa vào lò phản ứng để tạo ra môi trường phản ứng. Mỗi khí được xả qua các lưu lượng kế khác nhau (M*i*) để kiểm soát tốc độ dòng khí. Trước khi bắt đầu thử nghiệm, các khí được trộn và đốt nóng trong một ruột gà (3) trong khi khí thải được hút ra ngoài với sự trợ giúp của bộ hút khí (6). Mẫu được đặt trên giá chứa mẫu (4) và cân (5) liên tục đo và ghi lại khối lượng của mẫu trên máy tính.



Hình 2. *Hệ thống Macro-TGA phục vụ cho nghiên cứu, (1) Ống sứ, (2) Hệ thống gia nhiệt bằng điện, (3) Ruột gà trộn khí, (4) Giá chứa mẫu, (5) Cân, (6) Bộ hút khí thải, (T_i) Các vùng gia nhiệt, và (M_i) Các lưu lượng kế*

2.3. Xác định hành vi nhiệt

Các hành vi nhiệt của vỏ hạt cà phê đã được xác định bằng phương pháp phân tích nhiệt trọng (TGA) và phân tích nhiệt trọng vi sai (DTG). Đối với mỗi thí nghiệm, một khối lượng 1,5 g vỏ hạt cà phê được đặt vào giá đỡ mẫu (4) của hệ thống Macro-TGA và nâng lên vị trí mong muốn. Tiếp theo, dòng khí N_2 (lưu lượng 3 $Lmin^{-1}$) được đưa vào để duy trì môi trường khí trơ. Sau đó,

nhiệt độ lò phản ứng được tăng từ nhiệt độ phòng lên 900°C với tốc độ gia nhiệt 5°Cmin^{-1}. Sự thay đổi khối lượng mẫu được ghi lại trên máy tính. Dữ liệu sau đó được phân tích bằng phần mềm Origin.

2.4. Thí nghiệm khí hóa

Sau khi vỏ hạt cà phê được chuyển hóa hoàn toàn thành than ở 900°C trong N_2, các khí phản ứng được đưa vào lò phản ứng. Quá trình này đảm bảo than có các đặc tính tương tự như than thu được trong hầu hết các hệ thống khí hóa thực tế, trong đó sinh khối được đưa trực tiếp vào lò ở nhiệt độ cao. Ba môi trường khí hóa khác nhau được thiết lập, cụ thể là 20% H_2O trong N_2, 20% CO_2 trong N_2 và hỗn hợp của chúng trong N_2. Trong giai đoạn này, khối lượng than giảm dần cho đến khi ổn định, tương ứng với hàm lượng tro của mẫu. Mức độ chuyển đổi than được tính bằng công thức:

$$X = \frac{m_i - m_{(t)}}{m_i - m_{ash}} \quad (1)$$

Trong đó, m_t, m_0, m_{ash} lần lượt là khối lượng than tại thời điểm t, khối lượng ban đầu và khối lượng tro. Mỗi thí nghiệm được lặp lại ba lần và kết quả trung bình được lấy. Độ lệch chuẩn dưới 5% được xác nhận cho mỗi kết quả, cho thấy độ chính xác cao của nghiên cứu liên quan đến sinh khối này.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Đặc tính của vỏ hạt cà phê

Các thành phần quan trọng đối với đặc tính của vỏ hạt cà phê, gồm hàm lượng chất bốc, hàm lượng tro, hàm lượng cacbon cố định cũng như nhiệt trị cao, đã được khảo sát (Bảng 1).

Bảng 1. *Một số đặc tính chính của vỏ hạt cà phê (% trên mẫu khô)*

VM_{db}%	A_{db}%	FC_{db}%	HHV (MJkg^{-1})
70,8	9,2	20,0	18,6

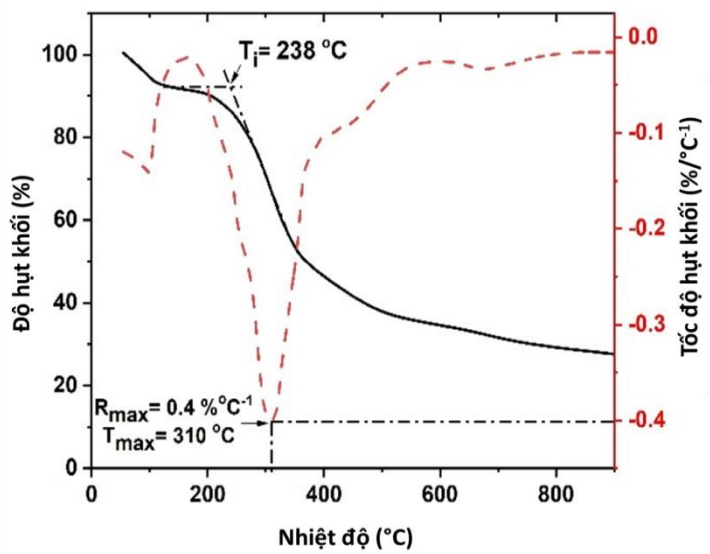
Kết quả cho thấy hàm lượng chất bốc của vỏ hạt cà phê là 70,8%, tương đương với các loại phụ phẩm nông nghiệp khác, chẳng hạn như trấu [6], bã mía [7] và lõi ngô [15]. Hàm lượng tro - bao gồm các hợp chất vô cơ còn sót lại - chiếm 9,2%. Hàm lượng tro cao trong vỏ hạt cà phê cần được xem xét do nó góp phần tiêu cực vào quá trình tạo xỉ, bám bẩn, thiêu kết và ăn mòn thiết bị. Vỏ hạt cà phê có hàm lượng cacbon cố định cao 20,0%, cho thấy mức độ graphit hóa cao và số lượng nhóm chức thấp [16]. Nhiệt trị cao (HHV) của vỏ hạt cà phê đạt 18,6 MJkg^{-1}, có thể so sánh được với giá trị nhiệt của gỗ (thường trong khoảng 17,9 - 20,5 MJkg^{-1}) [17]. Những kết quả này cho thấy vỏ cà phê có đặc tính năng lượng tốt, do đó có thể là một nguyên liệu thích hợp cho các quá trình chuyển đổi nhiệt hóa.

3.2. Hành vi nhiệt của vỏ hạt cà phê

Các hành vi nhiệt của vỏ hạt cà phê được nghiên cứu bằng phương pháp phân tích nhiệt trọng lượng trong điều kiện khí trơ với tốc độ gia nhiệt 5°Cmin^{-1}. Các đường cong TGA-DTG được thể hiện trong Hình 3.

Sự thay đổi khối lượng trong quá trình nhiệt phân vỏ hạt cà phê có thể được mô tả thành 3 giai đoạn: giai đoạn khử nước, giai đoạn phân hủy mạnh và giai đoạn hình thành than (Hình 3).

Như trong Hình 3, đỉnh đầu tiên trong giai đoạn khử nước (<238°C) xảy ra ở 110°C, do sự bay hơi mạnh của độ ẩm có trong mẫu. Giai đoạn thứ hai quan sát được trong khoảng nhiệt độ từ 238 đến 400°C, tương ứng với sự phân hủy của hemixenluloza, xenluloza và một phần lignin. Hàm lượng chất bốc bị phân hủy mạnh nhất trong giai đoạn này, chiếm khoảng 50 - 60% tổng khối lượng mẫu. Tốc độ giảm khối lượng tối đa (R_{max} = 0,4%°C^{-1}) được biểu thị bằng đỉnh thứ hai trên đường cong DTG ở 310°C.



Hình 3. *Kết quả phân tích TGA-DTG của vỏ hạt cà phê*

Giai đoạn thứ ba của quá trình giảm trọng lượng xảy ra ở nhiệt độ cao hơn trên 400°C tương ứng với sự phân hủy nhiệt của phần lignin còn lại với tốc độ thấp hơn. Do các chất bốc bên trong mẫu đã bị phân hủy gần hết nên khối lượng mất đi là không đáng kể. Các hành vi nhiệt của vỏ cà phê được tóm tắt trong Bảng 2.

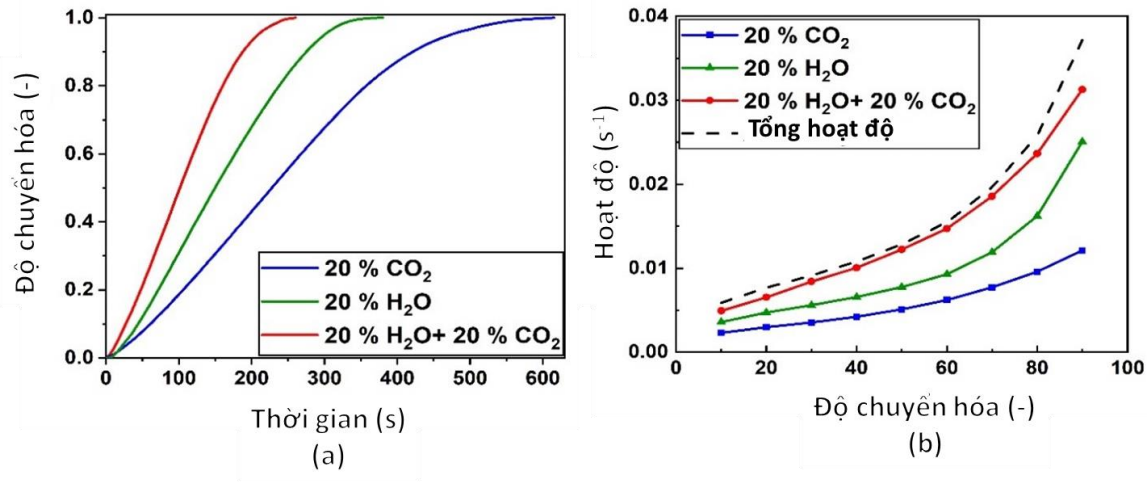
Bảng 2. *Hành vi nhiệt của vỏ hạt cà phê*

Stage	T (°C)	T_{max} (°C)	R_{max} (%°C^{-1})
Giai đoạn 1	< 238	110	0,1
Giai đoạn 2	238-400	310	0,4
Giai đoạn 3	> 400	-	-

3.3. Động học khí hóa

Hình 4 hiển thị sự chuyển đổi khí hóa than theo thời gian trong môi trường 20% H_2O, 20% CO_2 và hỗn hợp của chúng trong N_2 ở 900°C. Ba môi trường này gần với một số điều kiện khí hóa trong các hệ thống khí hóa công nghiệp [8], [18]. Việc chuyển hóa than của vỏ hạt cà phê phụ thuộc nhiều vào bản chất của các tác nhân khí hóa. Phản ứng khí hóa hoàn thành sau 615, 390 và 260 giây trong điều kiện tương ứng là 20% CO_2, 20% H_2O và môi trường hỗn hợp (Hình 4a). Do đó, tốc độ khí hóa vỏ hạt cà phê trong CO_2 chậm hơn gần hai lần so với tốc độ khí hóa trong hơi nước ở 900°C. Kết quả này tương tự với kết quả khí hóa than củi khi quá trình khí hóa trong CO_2 chậm hơn từ 2 đến 5 lần so với H_2O trong cùng điều kiện [19, tr. 2]. Do đó, vỏ cà phê có thể là một nguyên liệu tiềm năng để thay thế dăm gỗ trong hệ thống khí hóa.

Hoạt độ (reactivity) của than trong các môi trường khí hóa khác nhau được thể hiện trong khoảng mức độ chuyển đổi từ 10 đến 90% (Hình 4b). Tổng của các hoạt độ đạt được trong các môi trường khí hóa riêng lẻ - biểu thị bằng nét đứt trong đồ thị - cũng được thể hiện để so sánh với hoạt độ của than trong môi trường khí hóa hỗn hợp CO_2/H_2O. Một số nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng, CO_2 và H_2O tác dụng trên các điểm hoạt động (active sites) riêng biệt trên bề mặt than và không có bất kỳ tương tác nào với nhau [20], [21]. Một số nghiên cứu khác chỉ ra hiện tượng cộng hưởng giữa CO_2 và H_2O làm tăng khả năng phản ứng than, cho thấy sự hợp tác tích cực giữa các khí này trong việc tiếp cận các điểm hoạt động [22], [23]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, hoạt độ của than trong môi trường hỗn hợp CO_2/H_2O thấp hơn so với tổng của các hoạt độ đạt được trong các môi trường khí hóa riêng lẻ. Như vậy, đã có sự cạnh tranh giữa CO_2 và H_2O về khả năng tiếp cận các điểm hoạt động. Quan sát này tương tự như nghiên cứu trước đây về quá trình khí hóa than đá khi cũng chỉ ra CO_2 ức chế H2O khi đồng phản ứng [24].



Hình 4. *(a) Tốc độ chuyển hóa than ở 900°C và (b) Hoạt độ của than ở 900°C*

4. Kết luận

Một cơ sở dữ liệu toàn diện về vỏ hạt cà phê phục vụ cho quá trình khí hóa đã được báo cáo trong nghiên cứu này. Kết quả này cho thấy, vỏ hạt cà phê có đặc tính năng lượng tốt để sử dụng làm nguyên liệu cho quá trình khí hóa. Tuy nhiên, hàm lượng tro cao trong vỏ cà phê cần được xem xét do nó góp phần tiêu cực vào quá trình tạo xỉ, bám bẩn, thiêu kết và ăn mòn thiết bị. Quá trình phân hủy vỏ hạt cà phê diễn ra trong ba giai đoạn, bao gồm khử nước, tách hạt và hình thành than. Vỏ hạt cà phê bắt đầu phân hủy ở nhiệt độ Ti = 238°C. Tốc độ giảm trọng lượng tối đa (R_{max} = 0,4%°C^{-1}) xảy ra ở 310°C.

Động học của than từ vỏ hạt cà phê trong quá trình khí hóa cho thấy tốc độ khí hóa trong môi trường H_2O nhanh hơn gần hai lần so với khí hóa trong môi trường CO_2, khá giống với khí hóa gỗ. Vì vậy, vỏ cà phê có thể là một nguyên liệu tiềm năng để thay thế dăm gỗ trong hệ thống khí hóa. Đặc biệt, CO_2 thể hiện đặc tính ức chế khi bổ sung cùng với hơi nước trong quá trình khí hóa. Kết quả của nghiên cứu này sẽ cung cấp các thông tin có giá trị cho việc thiết kế, mô hình hóa và tối ưu hóa các thiết bị khí hóa vỏ hạt cà phê hiệu quả.

Lời cám ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội (USTH) theo số tài trợ USTH.YOUTH.EN.01/21.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] V. Byrareddy, L. Kouadio, S. Mushtaq, J. Kath, and R. Stone, "Coping with drought: Lessons learned from robusta coffee growers in Vietnam," *Climate Services*, vol. 22, Apr. 2021, Art. no. 100229, doi: 10.1016/j.cliser.2021.100229.

[2] P. S. Murthy and M. M. Naidu, "Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 66, pp. 45-58, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.06.005.

[3] N. A. Dzung, T. T. Dzung, and V. T. P. Khanh, "Evaluation of Coffee Husk Compost for Improving Soil Fertility and Sustainable Coffee Production in Rural Central Highland of Vietnam," *Resources and Environment*, vol. 3, no. 4, pp. 77-82, 2013.

[4] W. E. Oliveira, A. S. Franca, L. S. Oliveira, and S. D. Rocha, "Untreated coffee husks as biosorbents for the removal of heavy metals from aqueous solutions," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, no. 3, pp. 1073-1081, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.085.

[5] L. Wilson, G. R. John, C. F. Mhilu, W. Yang, and W. Blasiak, "Coffee husks gasification using high temperature air/steam agent," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 10, pp. 1330-1337, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.fuproc.2010.05.003.

[6] H. N. Nguyen, P. L. T. Nguyen, V. B. Tran, "Zero-waste biomass gasification: Use of residues after gasification of bagasse pellets as CO_2 adsorbents," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 26, no 04, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1016/j.tsep.2021.101080.

[7] H. N. Nguyen and T. Tsubota, "Complete parametric study of bagasse pellets during high-temperature steam gasification," *J. Thermal Sci. Eng. Appl*, vol. 12, no. 4, pp. 1-7, 2021, doi: 10.1115/1.4045698.

[8] H. N. Nguyen *et al.*, "Kinetic and structural changes during gasification of cashew nut shell char particles," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 40, no. 03, Art. no. e13580, doi: https://doi.org/10.1002/ep.13580.

[9] H. N Nguyen, D. A. Khuong, and G. T. T. Le, "Waste to energy: investigation of characteristics and thermal behaviors of wastes," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 225, no. 02, 3-9, Feb. 2020, doi: 10.34238/tnu-jst.2020.02.2170.

[10] H. L Nguyen, D. D. Le, H. N. Nguyen, and V. T. Trinh, "Thermal Behavior of Woody Biomass in a Low Oxygen Atmosphere Using Macro-Thermogravimetric Analysis," *GMSARN International Journal*, vol. 14, pp. 37-41, 2020.

[11] C. Setter, F. A. Borges, C. R. Cardoso, R. F. Mendes, and T. J. P. Oliveira, "Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis," *Industrial Crops and Products*, vol. 154, Oct. 2020, Art. no. 112731, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112731.

[12] C. Rodriguez and G. Gordillo, "Adiabatic Gasification and Pyrolysis of Coffee Husk Using Air-Steam for Partial Oxidation," *Journal of Combustion*, vol. 2011, 2011, Art. no. e303168, doi: 10.1155/2011/303168.

[13] C. F. Mhilu, "Analysis of Energy Characteristics of Rice and Coffee Husks Blends," *ISRN Chemical Engineering*, vol. 2014, Mar. 2014, Art. no. e196103, doi: 10.1155/2014/196103.

[14] J. Bonilla, G. Gordillo, and C. Cantor, "Experimental Gasification of Coffee Husk Using Pure Oxygen-Steam Blends," *Front. Energy Res.*, vol. 7, 2019, doi: 10.3389/fenrg.2019.00127.

[15] H. N. Nguyen, V. L. Nguyen, D. D. Le, and T. T. H. Vu, "Physico-chemical characterization of forest and agricultural residues for energy conversion processes," *Vietnam Journal of Chemistry*, vol. 58, no. 6, pp. 735-741, 2020, doi: https://doi.org/10.1002/vjch.202000054.

[16] A. A. Ayalew and T. A. Aragaw, "Utilization of treated coffee husk as low-cost bio-sorbent for adsorption of methylene blue," *Adsorption Science & Technology*, vol. 38, no. 5-6, pp. 205-222, Jul. 2020, doi: 10.1177/0263617420920516.

[17] B. Günther, K. Gebauer, R. Barkowski, M. Rosenthal, and C.-T. Bues, "Calorific value of selected wood species and wood products," *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 70, no. 5, pp. 755-757, Sep. 2012, doi: 10.1007/s00107-012-0613-z.

[18] H. N. Nguyen, L. V. D. Steene, and D. D. Le, "Kinetics of rice husk char gasification in an H2O or a CO2 atmosphere," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 40, no. 14, pp. 1701-1713, Jul. 2018, doi: 10.1080/15567036.2018.1486900.

[19] J. P. Tagutchou, L. V. de steene, F. J. E. Sanz, and S. Salvador, "Gasification of Wood Char in Single and Mixed Atmospheres of H_2O and CO_2," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 35, no. 13, pp. 1266-1276, Jul. 2013, doi: 10.1080/15567036.2010.542438.

[20] R. C. Everson, H. W. J. P. Neomagus, H. Kasaini, and D. Njapha, "Reaction kinetics of pulverized coal-chars derived from inertinite-rich coal discards: Gasification with carbon dioxide and steam," *Fuel*, vol. 85, no. 7, pp. 1076-1082, May 2006, doi: 10.1016/j.fuel.2005.10.016.

[21] Z. Huang *et al.*, "Kinetic studies of char gasification by steam and CO_2 in the presence of H_2 and CO," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 8, pp. 843-847, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.12.020.

[22] Y. Bai, Y. Wang, S. Zhu, L. Yan, F. Li, and K. Xie, "Synergistic effect between CO_2 and H_2O on reactivity during coal chars gasification," *Fuel*, vol. 126, pp. 1-7, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.02.025.

[23] C. Guizani, M. Jeguirim, R. Gadiou, F. J. Escudero Sanz, and S. Salvador, "Biomass char gasification by H_2O, CO_2 and their mixture: Evolution of chemical, textural and structural properties of the chars," *Energy*, vol. 112, pp. 133-145, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.065.

[24] D. G. Roberts and D. J. Harris, "Char gasification in mixtures of CO_2 and H_2O: Competition and inhibition," *Fuel*, vol. 86, no. 17, pp. 2672-2678, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2007.03.019.