Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Số chuyên đề: Công nghệ chiến lược - Động lực phát triển Đồng bằng sông Cửu Long (SDMD)
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.254

NÂNG CAO NHIỆT TRỊ SINH KHỐI TỪ PHỤ PHẨM NÔNG NGHIỆP BẰNG PHƯƠNG PHÁP NHIỆT PHÂN NHẸ: GIẢI PHÁP CÔNG NGHỆ BỀN VỮNG HƯỚNG TỚI MỤC TIÊU NET ZERO

Nguyễn Minh Nhựt*, Trần Nguyễn Phương Lan, Lâm Phúc Thông và Đặng Huỳnh Giao
Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): nmnhut@ctu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 14/08/2026
Sửa bài (Revised): 19/09/2026
Duyệt đăng (Accepted): 05/11/2026

Title: *Enhanced calorific value of Agricultural residues through torrefaction: A sustainable approach toward net-zero emissions*

Author(s): *Nguyen Minh Nhut*, Tran Nguyen Phuong Lan, Lam Phuc Thong and Dang Huynh Giao*

Affiliation(s): *College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam*

TÓM TẮT

Sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp là nguồn năng lượng tái tạo giàu tiềm năng tại vùng Đồng bằng sông Cửu Long. Tuy nhiên, các đặc tính cố hữu như độ ẩm cao, tính chất không đồng đều, nhiệt trị thấp, cùng với thách thức về logistics, đã hạn chế khả năng ứng dụng ở quy mô công nghiệp. Trong nghiên cứu này, quá trình nhiệt phân nhẹ đã được áp dụng nhằm cải thiện các đặc tính hóa lý của sinh khối thô. Kết quả cho thấy nhiệt trị của các nguyên liệu tăng từ 12 đến 50% so với sinh khối thô và đạt hơn 19 MJ/kg (bã mía), trong khi tỷ lệ O/C giảm mạnh từ 1,05 xuống còn 0,26. Quá trình cacbon hóa đã diễn ra mạnh ở nhiệt độ 250°C, giúp nâng cao mật độ năng lượng, tăng tính đồng nhất và cải thiện khả năng nén viên của vật liệu. Những kết quả này đã khẳng định công nghệ nhiệt phân nhẹ là một trong những giải pháp then chốt giúp tối ưu hóa việc sử dụng nguồn tài nguyên sinh khối, góp phần bảo đảm an ninh năng lượng và phát triển bền vững ở vùng Đồng bằng sông Cửu Long.

Từ khóa: *Đồng bằng sông Cửu Long, nhiệt phân nhẹ, nhiệt trị, phụ phẩm nông nghiệp, sinh khối*

ABSTRACT

Agricultural residue biomass shows high potential as a renewable energy source in the Mekong Delta. However, its inherent characteristics, such as high moisture content, heterogeneity, low heating value, and logistical challenges, have restricted its large-scale industrial applications. This study used torrefaction as a low-temperature pretreatment to improve the physicochemical properties of raw biomass. Experimental results indicated that heating values increased by 12 to 50% (exceeding 19 MJ/kg for sugarcane bagasse), while the O/C mass ratio sharply decreased from 1.05 to 0.26. The intensified carbonization process significantly elevated energy density and homogeneity at 250°C, while substantially improving the pelletization behavior of the materials. These findings demonstrated that torrefaction is a key technological solution for optimizing biomass resource utilization, thereby contributing to energy security and sustainable development in the Mekong Delta.

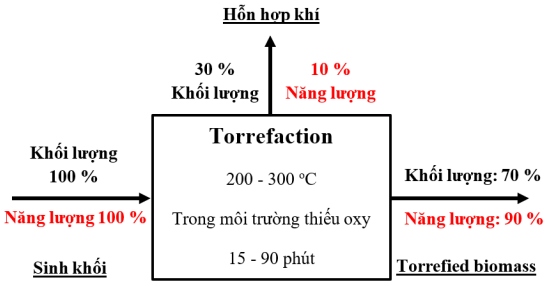
Keywords: *Agricultural residue, biomass, heating value, Mekong Delta, torrefaction*

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, nhu cầu năng lượng toàn cầu đã gia tăng nhanh chóng nhằm đáp ứng tốc độ tăng trưởng kinh tế, quá trình công nghiệp hóa và đô thị hóa, cũng như nhu cầu ngày càng cao về chất lượng sống của con người. Trong gần 3 thập niên kể từ 1990, tổng lượng tiêu thụ năng lượng toàn cầu đã tăng thêm khoảng 5.600 Mtoe, với tốc độ tăng trung bình hằng năm gần 2% trong giai đoạn từ năm 2000 đến 2019 (Nhựt và ctv., 2022). Trong các nguồn nguyên liệu sơ cấp được sử dụng hiện nay, năng lượng hóa thạch gồm dầu mỏ, than đá và khí tự nhiên đang được sử dụng phổ biến, chiếm hơn 80%, bên cạnh một tỷ lệ nhỏ các nguồn năng lượng khác như năng lượng hạt nhân và các loại năng lượng tái tạo. Việc phụ thuộc quá mức vào các nguồn năng lượng hóa thạch như dầu mỏ và than đá là nguyên nhân chính dẫn đến nồng độ khí CO_2 trong không khí đã tăng rất nhanh kể từ những năm 1900 và đạt mức 400 ppm vào năm 2015, mức cao nhất trong 3 triệu năm qua, gây ra sự lo ngại rất lớn về các vấn đề môi trường (Nguyen, 2021). Thỏa thuận Paris về biến đổi khí hậu năm 2015 giới hạn nồng độ CO_2 trong khí quyển ở mức cho phép nhằm đạt được mục tiêu mức tăng nhiệt độ trung bình toàn cầu không quá 1,5°C so với mức trước giai đoạn công nghiệp hóa (UNFCCC, 2016). Nhiều giải pháp được đưa ra để giảm lượng nhiên liệu hóa thạch tiêu thụ, với trọng tâm là nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng và sử dụng nguồn năng lượng khác thay thế như năng lượng tái tạo, bao gồm năng lượng gió, mặt trời và năng lượng sinh khối (Abulfotuh, 2007). Liên minh châu Âu đặt mục tiêu tăng tỷ lệ năng lượng tái tạo lên hơn 50%, trong khi CHLB Đức mong muốn cắt giảm 80 – 95% khí nhà kính vào năm 2050 bằng cách chuyển đổi toàn bộ các nhà máy phát điện sang sử dụng nguồn năng lượng tái tạo (BMUB, 2016; Nguyen, 2021).

Sau COP26, Việt Nam đã cam kết đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050 nhờ vào quá trình chuyển đổi năng lượng sạch và năng lượng tái tạo (Văn, 2026). Bên cạnh việc phát triển năng lượng mặt trời và gió, năng lượng sinh khối là một trong những trụ cột quan trọng trong quá trình chuyển đổi này. Việt Nam là một nước nông nghiệp với tiềm năng sinh khối cực kỳ phong phú và đa dạng với ước lượng khoảng 100 triệu tấn/năm, tương ứng với hơn 340.000 GWh điện năng, trong đó Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) chiếm hơn 30%, tương đương 113.000 GWh (Nhựt và ctv., 2022). ĐBSCL có tiềm năng rất lớn cho năng lượng tái tạo, đặc biệt là năng lượng sinh khối với tổng lượng phụ phẩm nông nghiệp dồi dào khoảng 40 – 45 triệu tấn, trong đó có vỏ trấu (khoảng 5 triệu tấn), rơm rạ (khoảng 26 triệu tấn), bã mía (1,5 – 2 triệu tấn) (Thanh, 2025). Tuy nhiên, khoảng 40 – 60% lượng sinh khối này chưa được sử dụng hiệu quả, gây lãng phí và ô nhiễm môi trường. Do đó, việc tận dụng sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp có vai trò rất quan trọng hiện nay tại Việt Nam, cũng như tại ĐBSCL, để phát triển năng lượng tái tạo, bảo vệ môi trường và nâng cao giá trị sản xuất nông nghiệp.

Bên cạnh những ưu điểm của sinh khối như thân thiện với môi trường, chi phí thấp, tính trung hòa cacbon, khả năng phản ứng cao, việc sử dụng sinh khối hiện nay đang gặp nhiều khó khăn và thách thức về kỹ thuật và kinh tế. Sinh khối có đặc tính chung là độ ẩm cao, tỷ trọng thấp và nhiệt trị thấp. So với các nguồn nhiên liệu khác như than và dầu mỏ, nhiệt trị của sinh khối thô chỉ tương đương khoảng 30 – 50%, do đó cản trở việc sử dụng rộng rãi nguồn tài nguyên này. Nguồn cung phân tán, cũng như biến động theo mùa vụ, là một thách thức đối với quá trình thu gom, lưu trữ và vận chuyển các loại sinh khối này. Bên cạnh đó, sự không đồng nhất về tính chất là đặc tính cố hữu và là một trong những vấn đề lớn nhất của sinh khối phụ phẩm nông nghiệp. Khác với các loại nhiên liệu hóa thạch, sự biến động về tính chất của các loại sinh khối gây ra rất nhiều rủi ro cho vận hành và hiệu quả kinh tế của nhà máy. Sự không đồng nhất về độ ẩm của rơm rạ từ 15 đến 60% tùy theo mùa dẫn đến sự khác biệt rất lớn về nhiệt trị thực tế (LHV), gây ra sự mất ổn định trong các lò đốt và giảm hiệu quả kinh tế của quá trình sản xuất (Vassilev et al., 2010). Ngoài ra, sự khác biệt về thành phần hóa học và kích thước của nhiên liệu cũng cản trở sự hoạt động ổn định của nhà máy. Để khắc phục những nhược điểm trên cho các ứng dụng hiệu quả ở quy mô lớn, các phương pháp tiền xử lý sơ bộ được áp dụng để nâng cao tính chất của sinh khối đạt tiêu chuẩn kỹ thuật về kích thước, độ ẩm và mật độ năng lượng trước khi sử dụng. Một trong những giải pháp hiệu quả để cải thiện tính chất hóa lý và thành phần sinh hóa của sinh khối là quá trình nhiệt phân nhẹ (torrefaction) ở nhiệt độ trong khoảng 200 đến 300ºC (Shankar Tumuluru et al., 2011). Trong khoảng nhiệt độ này, các thành phần hemicellulose bị phân hủy mạnh, trong khi một phần cellulose và lượng ít lignin bị phân hủy để loại bỏ hoàn toàn nước và giải phóng các chất khí có nhiệt trị thấp như CO_2, H_2O, CO và các acid hữu cơ, từ đó giúp giảm khoảng 30% khối lượng và 10% năng lượng, nhưng tăng đáng kể nhiệt trị cao của vật liệu lên hơn 30% như Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ quá trình nhiệt phân nhẹ (Busch, 2016)

Dựa vào nhiệt độ nung, quá trình nhiệt phân nhẹ được phân loại ra thành 3 mức: nhẹ (210 – 235ºC), trung bình (235 – 275ºC) và cao (275 – 300ºC) (Mamvura & Danha, 2020; Sarker et al., 2021). Quá trình này diễn ra qua các giai đoạn tương ứng với sự thay đổi nhiệt độ khác nhau gồm: giai đoạn sấy sinh khối để loại bỏ độ ẩm ở nhiệt độ đến khoảng 120ºC; tiếp theo, trong khoảng nhiệt độ 120 – 200ºC, nước liên kết vật lý được giải phóng hoàn toàn và các hợp chất hữu cơ mạch ngắn bắt đầu phân huỷ nhẹ; cuối cùng, phản ứng nhiệt phân nhẹ bắt đầu diễn ra mạnh mẽ từ trên 200ºC, dẫn đến sự phân huỷ các hợp chất hữu cơ (chủ yếu là hemicellulose) và gây ra sự sụt giảm khối lượng vật liệu lớn nhất (Ivanovski et al., 2023). Những thay đổi quan trọng về tính chất hóa lý của vật liệu xảy ra trong quá trình nhiệt phân gồm sự phân bố nguyên tố, thay đổi thành phần vật liệu, sự cacbon hóa, phân hủy các polymer sinh học và khử acetyl (Yang et al., 2023; Chandrasekharan Nair et al., 2025). Trong quá trình nung ở nhiệt độ 200 – 300ºC, hemicellulose bị phân hủy và cacbon hóa, trong khi cellulose và lignin chỉ mới bắt đầu bay hơi và khử trùng hợp. Sự giải phóng các chất dễ bay hơi đã làm giảm hàm lượng oxy trong khi tăng tỷ lệ cacbon trong vật liệu, nhờ đó làm tăng nhiệt trị (Shankar Tumuluru et al., 2011; Olugbade & Ojo, 2020).

Kết quả nghiên cứu của Chen et al. (2015) cho thấy nhiệt trị cao của trấu tăng từ 17,5 lên 21,5 MJ/kg khi được xử lý ở 300ºC, trong khi bã mía có thể đạt đến 23,4 MJ/kg và gỗ thông tăng hơn 37%, đạt 25,4 MJ/kg, gần bằng mức nhiệt trị của than đá là 22 – 26 MJ/kg. Bên cạnh đó, tỷ lệ O/C của sinh khối sau xử lý giảm mạnh còn 0,207 (bã mía) hoặc 0,238 (trấu) cho thấy mức độ than hóa của vật liệu tăng lên cải thiện đặc tính của vật liệu như tính đồng nhất, loại bỏ các hợp chất dễ bay hơi giàu oxy, tăng khả năng đốt cháy của vật liệu, tăng khả năng lưu trữ, nhiệt trị và nâng cao hiệu quả vận hành lò đốt.

Việc tận dụng sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp có vai trò rất quan trọng để chuyển đổi từ năng lượng hóa thạch sang năng lượng tái tạo và thực hiện cam kết Net Zero vào năm 2050 của Việt Nam. Theo Quy hoạch điện VIII trích dẫn bởi Thủy (2023), tổng công suất điện sinh khối và điện rác đến năm 2030 là 2.270 MW và đạt 6.000 MW vào năm 2050. Để đạt được mục tiêu trên, công nghệ nhiệt phân nhẹ là yếu tố quan trọng giúp cải thiện đáng kể đặc tính sinh khối. Tuy nhiên, có rất ít nghiên cứu được công bố về quá trình nhiệt phân nhẹ để nâng cao đặc tính sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp đặc trưng ở ĐBSCL cho các ứng dụng năng lượng. Việc thiếu đánh giá chuyên sâu đã hạn chế sự hiểu biết về quá trình và việc ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp. Nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu đánh giá sự cải thiện nhiệt trị và thành phần hóa học của ba loại phụ phẩm nông nghiệp phổ biến như trấu, rơm rạ và bã mía tại ĐBSCL tại các nhiệt độ xử lý khác nhau, từ đó phân tích tiềm năng sử dụng quá trình nhiệt phân nhẹ như là phương pháp tiền xử lý phụ phẩm nông nghiệp cho các ứng dụng năng lượng. Các nội dung cụ thể trong nghiên cứu này gồm: 1) đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ nhiệt phân lên nhiệt trị của sinh khối, 2) sự thay đổi thành phần nguyên tố của sinh khối ở các điều kiện nhiệt phân khác nhau, 3) xác định ảnh hưởng của loại nguyên liệu lên nhiệt trị. Những kết quả của nghiên cứu có thể cung cấp những đánh giá quan trọng về tiềm năng sử dụng phụ phẩm nông nghiệp tại ĐBSCL như là nguồn năng lượng tái tạo quan trọng trong tương lai.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu sinh khối

Rơm rạ, trấu và bã mía được thu gom tại địa bàn tỉnh An Giang. Sinh khối sau khi thu gom sẽ được rửa sạch bằng nước và phơi khô. Sau đó, vật liệu được cắt nhỏ với kích thước từ 4 đến 6 cm, sấy ở nhiệt độ 105°C trong 2 giờ và được bảo quản trước khi nhiệt phân.

Vật liệu sau khi được xử lý sơ bộ được nung trong lò nung kín (Furnace 1200 degree, SX2-5-12A) ở các nhiệt độ 250, 270 và 300ºC trong thời gian lưu 60 phút với tốc độ gia nhiệt 10ºC/phút. Vật liệu sau nung được để nguội tự nhiên đến nhiệt độ phòng. Sau đó, khối lượng được cân lại để xác định khối lượng than còn lại sau quá trình nhiệt phân.

2.2. Phân tích đặc trưng cấu trúc của vật liệu

Các đặc tính của vật liệu sinh khối được xác định bằng phương pháp phân tích nhiệt trọng lượng TGA để xác định hàm lượng các hợp chất hữu cơ bị phân hủy trong quá trình nhiệt phân trong môi trường khí

N_2 với tốc độ gia nhiệt 10°C/phút (SETARAM LABSYS TG).

Phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) được sử dụng để xác định thành phần và hàm lượng nguyên tố của vật liệu than, sử dụng thiết bị Empyrean – PANalytical. Kết quả được sử dụng để đánh giá sự thay đổi thành phần nguyên tố ở các nhiệt độ nhiệt phân khác nhau và mối quan hệ giữa thành phần này và nhiệt trị của vật liệu.

2.3. Xác định nhiệt trị vật liệu

Nhiệt trị là năng lượng mà vật liệu có thể giải phóng khi đốt cháy hoàn toàn. Giá trị nhiệt trị là một trong những chỉ số quan trọng nhất để đánh giá tiềm năng sinh khối làm nhiên liệu cho mục đích tạo năng lượng. Phương pháp xác định nhiệt trị toàn phần (HHV) của vật liệu bằng bom nhiệt lượng kế (bomb calorimeter) được nén bằng oxy nguyên chất ở áp suất cao theo tiêu chuẩn ASTM D 240-09 tại Công ty Nhiệt điện Cần Thơ.

Hiệu suất khối lượng (MY, %) và hiệu suất năng lượng (EY, %) được xác định theo các phương trình sau:

$$MY = \left(\frac{m_{torrefied}}{m_{thô}}\right)_{khô}.100 \quad (1)$$

$$EY = MY.\left(\frac{HHV_{torrefied}}{HHV_{thô}}\right)_{khô}.100 \quad (2)$$

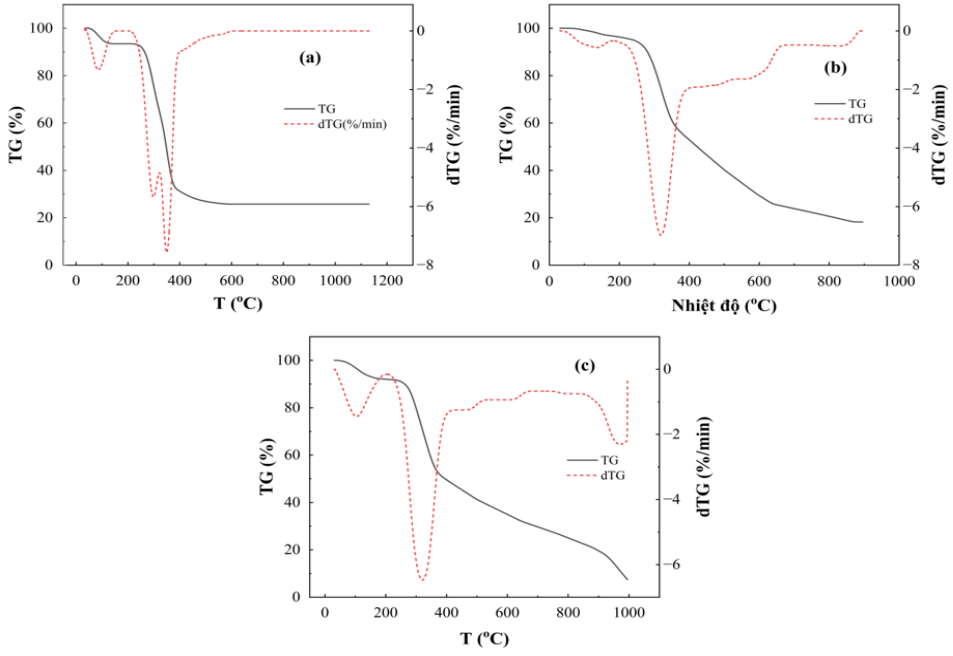
Với $m_{torrefied}$ (kg) và $m_{thô}$ (kg) là khối lượng vật liệu sau nung và sinh khối thô, $HHV_{torrefied}$ (MJ/kg) và $HHV_{thô}$ (MJ/kg) là nhiệt trị vật liệu sau nung và sinh khối thô.

Tất cả các thí nghiệm được lặp lại ít nhất 3 lần để đánh giá độ tin cậy của số liệu. Tất cả số liệu được tính toán và xử lý bằng phần mềm OriginPro 2024 SP1.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) của vật liệu

Kết quả phân tích nhiệt trọng lượng của bã mía được thể hiện (Hình 2a) cho thấy sự suy giảm khối lượng trong khoảng nhiệt độ từ 30 đến 150ºC với 6,5%, tương ứng với quá trình thoát nước tự do hoặc độ ẩm của bã mía. Khi nhiệt độ nung tăng lên đến khoảng 400°C, vật liệu mất khoảng 60% khối lượng, tương ứng với sự phân hủy hoàn toàn của hemicellulose, cellulose và một phần lignin trong bã mía. Khi nhiệt độ nung trên 400ºC, tốc độ phân hủy chậm lại và khối lượng gần như không đổi ở nhiệt độ trên 600ºC do quá trình phân hủy chậm của các cấu trúc phức tạp và bền nhiệt hơn như lignin trong bã mía. Trong khoảng nhiệt độ từ 230 đến 400ºC, tốc độ phân hủy vật liệu rất nhanh, cho thấy hàm lượng các thành phần dễ phân hủy như hemicellulose và cellulose chiếm phần quan trọng trong bã mía.



Hình 2. Giãn đồ phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) của bã mía (a), rơm rạ (b) và trấu (c)



Hình 3. Vật liệu từ sinh khối

Ghi chú: (a) trấu, (b) trấu đã được nung và (c) than được nén viên.

Bảng 1. Thành phần nguyên tố của các vật liệu TSH

Vật liệu	Bã mía			Rơm rạ			Trấu		
	C (%)	O (%)	O/C	C (%)	O (%)	O/C	C (%)	O (%)	O/C
Sinh khối	48,9	51,2	1,05	56,0	33,1	0,59	43,3	28,9	0,67
250ºC	70,9	29,1	0,41	38,7	41,6	1,07	47,4	41,4	0,87
270ºC	74,1	25,6	0,35	66	26,2	0,40	56,4	36,8	0,65
300ºC	79,1	20,7	0,26	57,8	33,7	0,58	62,8	28,1	0,47

Quá trình phân hủy của rơm rạ được thể hiện ở Hình 2b cho thấy rơm có độ ẩm khoảng 3,5%, trong khi khối lượng giảm khoảng 42% khi nung đến 400ºC. Khác với giản đồ TGA của bã mía, đường DTG của rơm có đỉnh đơn khá nhọn trong khoảng nhiệt độ 280 – 300ºC, chứng tỏ cellulose chiếm ưu thế. Sau đó, vật liệu tiếp tục giảm thêm 36,5% khối lượng khi tiếp tục nung đến hơn 800ºC. Trong khi độ ẩm của trấu được dự đoán là khoảng 8%, khi nung đến 400ºC có thêm khoảng 40% hợp chất bị phân hủy và sau đó còn gần 8% khi nung ở 1000ºC. Kết quả DTG và TGA cho thấy trong trấu có hàm lượng cellulose cao và tương đối đồng nhất. Dựa trên kết quả phân tích TGA, khoảng nhiệt độ tối ưu cho quá trình nhiệt phân nhẹ của cả 3 loại vật liệu trên là từ 230 đến 280ºC, giúp loại bỏ nước và hemicellulose nhưng vẫn giữ nguyên cấu trúc cellulose/lignin giàu năng lượng.

3.2. Ảnh hưởng nhiệt độ nung đến thành phần nguyên tố của vật liệu

Bên cạnh việc cải thiện các tính chất vật lý của vật liệu, quá trình nhiệt phân nhẹ có thể làm thay đổi đáng kể các thành phần bên trong vật liệu như thành phần proximate và thành phần nguyên tố. Nhìn chung, hàm lượng cacbon trong vật liệu tăng dần khi nhiệt độ nhiệt phân tăng, trong khi hàm lượng oxy giảm rõ rệt tương ứng với điều kiện xử lý (Bảng 1). Sự thay đổi thành phần nguyên tố này dẫn đến tỷ lệ O/C giảm đáng kể ở nhiệt độ cao. Điều này cho thấy quá trình cacbon hóa vật liệu tăng lên dưới tác dụng của nhiệt độ. Sự thay đổi này xảy ra do các hợp chất có oxy bị phân hủy thành các hợp chất dễ bay hơi, thoát ra khỏi vật liệu. Sự suy giảm tỷ lệ O/C sẽ làm giảm khói, hạn chế hình thành hơi nước và giảm thất thoát năng lượng trong quá trình đốt cháy (Shankar Tumuluru et al., 2011).

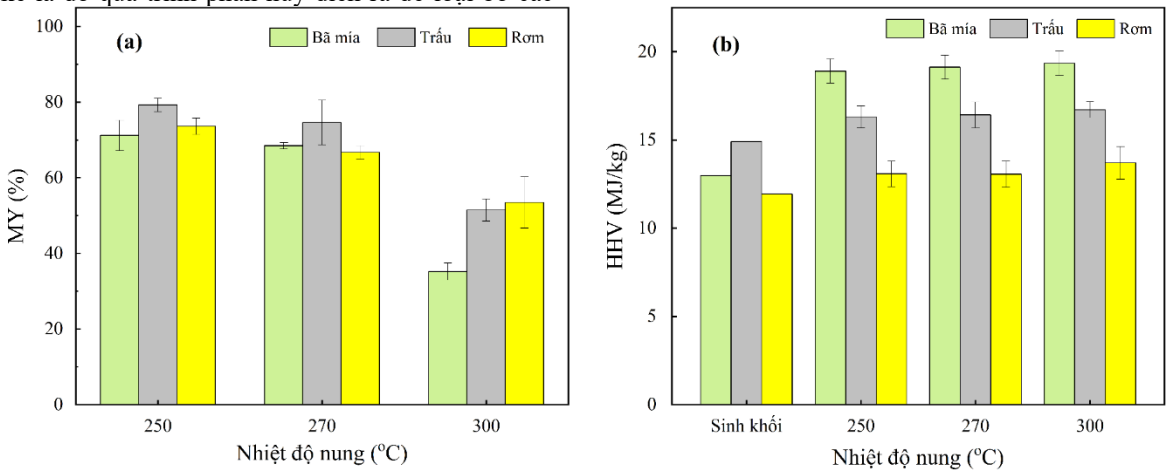
Trong ba loại vật liệu trên, bã mía có hàm lượng cacbon tăng cao nhất với hơn 30% khi nung ở 300 °C so với bã mía thô, trong khi tỷ lệ oxy giảm nhiều nhất với khoảng 30%, dẫn đến tỷ lệ O/C giảm từ 1,05 xuống 0,26. Kết quả này cho thấy thành phần hữu cơ dễ phân hủy ở nhiệt độ 250 – 300ºC chiếm nhiều trong bã mía so với rơm rạ và trấu. Điều này cũng phù hợp với kết quả phân tích TGA của ba loại vật liệu trên. Bên cạnh đó, rơm rạ và trấu có sự thay đổi ít hơn về thành phần và tỷ lệ O/C. Kết quả này cho thấy các thành phần hữu cơ trong hai loại vật liệu này bị phân hủy ít hơn ở nhiệt độ dưới 300ºC, và hàm lượng tro có trong rơm và trấu lớn hơn đáng kể so với bã mía. Tỷ lệ O/C cũng chỉ ra quá trình cacbon hóa của bã mía cao hơn so với rơm và trấu, từ đó cũng ảnh hưởng đến nhiệt trị của vật liệu. Tuy nhiên, tỷ lệ O/C của rơm rạ có sự tăng giảm khác biệt so với bã mía và trấu. Những giá trị này của rơm có thể do quá trình nung trong lò không đồng đều về sự phân hủy ở các vị trí trong cốc nung, bên cạnh thành phần hóa học bên trong của rơm khi phân hủy, nên đã ảnh hưởng đến kết quả mẫu phân tích. Đây là một giới hạn về hoạt động của lò nung tầng cố định so với tầng sôi và thiết bị thùng quay về mức độ phản ứng đồng đều và phân bố nhiệt độ.

Do đó, quá trình nhiệt phân nhẹ đã thay đổi mạnh mẽ cấu trúc hình thái và đặc tính của sinh khối. Dưới tác động của nhiệt độ, màu sắc của vật liệu cũng thay đổi rõ rệt (Hình 3a và Hình 3b), cho thấy quá trình cacbon hóa diễn ra nhanh chóng, làm tăng hàm lượng cacbon cố định. Bên cạnh đó, do độ ẩm và các hợp chất dễ bay hơi bị loại ra trong quá trình nung nên vật liệu trở nên kỵ nước và giòn hơn, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình nén viên năng lượng (Hình 3c). Kết quả này cũng tương đồng với các báo cáo đã được công bố (Bridgeman et al., 2008).

3.3. Ảnh hưởng nhiệt độ nung đến hiệu suất khối lượng

Trong quá trình nhiệt phân nhẹ, nhiệt độ là yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến hiệu suất khối lượng của sản phẩm rắn. Nhìn chung, khi nhiệt độ nung tăng, lượng sản phẩm rắn thu được giảm đáng kể là do quá trình phân hủy diễn ra để loại bỏ các hợp chất dễ bay hơi như nước, CO, CO_2 và các hợp chất hữu cơ nhẹ, từ đó chất rắn trở nên giàu cacbon hơn và nhiệt trị tăng lên.

Hiệu suất khối lượng của 3 loại sinh khối (bã mía, rơm rạ và trấu) theo nhiệt độ nung được thể hiện trong Hình 4a và Bảng 2. Khi nhiệt độ nung trong khoảng 250 – 270ºC, hiệu suất khối lượng giảm nhẹ với 68,8 – 71,2% (bã mía), 66,7 – 73,6% (rơm) và 74,6 – 79,2% (trấu). Kết quả này cho thấy trong vùng nhiệt độ này, sự suy giảm khối lượng này chủ yếu do sự thoát ẩm, phân hủy một phần hemicellulose. Khi nhiệt độ nung tăng lên 300ºC, sự suy giảm trở nên rất mạnh, đặc biệt là bã mía với 36% khối lượng bị mất đi so với 250°C, trong khi khối lượng rơm và trấu giảm 20 – 27,8%. Điều này chỉ ra rằng ở 300°C, sự phân hủy diễn ra mạnh hơn ở hemicellulose và cellulose bắt đầu phân hủy, làm giải phóng nhiều hơn các hợp chất dễ bay hơi.



Hình 4. Ảnh hưởng nhiệt độ nung đến (a) hiệu suất khối lượng và (b) nhiệt trị của vật liệu.

Bảng 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến hiệu suất khối lượng và nhiệt trị

Vật liệu	Bã mía		Rơm rạ		Trấu	
	MY (%)	EY(%)	MY (%)	EY(%)	MY (%)	EY(%)
250ºC	71,22	103,71	73,60	80,67	79,24	86,74
270ºC	68,48	100,88	66,68	73,00	74,59	82,19
300ºC	35,20	52,44	53,48	61,41	51,49	57,74

Đối với các loại sinh khối khác nhau, ở 250ºC hiệu suất khối lượng của trấu thu được cao nhất với gần 80%, cao hơn bã mía 8% và rơm 5%. Khi nhiệt độ nung tăng đến 300ºC, giá trị này của trấu cao hơn bã mía 16%, trong khi rơm cao hơn 2%. Kết quả này có thể liên quan đến thành phần hóa học của từng loại sinh khối. Trấu có hàm lượng tro khá lớn, trong khi bã mía chứa tỷ lệ các thành phần lignocellulose cao, dễ bị phân hủy do nhiệt. Bên cạnh đó, bã mía có mức giảm khối lượng lớn nhất với 36%, cho thấy bã mía chịu sự phân hủy nhiệt mạnh hơn ở khoảng nhiệt độ khảo sát 250 - 300ºC. Kết quả này phù hợp với phân tích nhiệt trọng lượng trong Hình 2.

3.4. Ảnh hưởng nhiệt độ nung đến nhiệt trị của vật liệu

Nhiệt độ nung là một yếu tố cốt lõi quyết định đến nhiệt trị và mật độ năng lượng của sinh khối. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng nhiệt trị của sinh khối sẽ tỷ lệ thuận với nhiệt độ nung (Aslam et al., 2019; Gibbons & Al-Gailani, 2026). Hình 4b cho thấy khi nung ở nhiệt độ 250°C, nhiệt trị của 3 loại vật liệu

tăng rất mạnh so với sinh khối thô từ 1,77 đến 6,36 MJ/kg. Sự gia tăng nhiệt trị này là do nhiệt độ nung thúc đẩy các phản ứng nhiệt hóa giúp loại bỏ các thành phần năng lượng thấp (hemicellulose) và giữ lại các thành phần giàu năng lượng hơn (cellulose và lignin) do nhiệt độ chưa đủ cao để phân hủy. Ở khoảng nhiệt độ thấp dưới 200˚C, nước tự do bay hơi, trong khi các hợp chất dễ bay hơi có chứa nhiều oxy (CO_2, H_2O, các acid hữu cơ nhẹ) tiếp tục bị giải phóng ở khoảng nhiệt độ 200 – 300˚C. Trong thành phần của sinh khối, hemicellulose là thành phần kém bền nhất, bị phân hủy mạnh ở nhiệt độ từ 220 đến 280˚C làm giảm lượng hydro và oxy đáng kể, từ đó nâng cao hàm lượng cacbon cố định (fixed carbon) trong phần than còn lại. Sự thay đổi hàm lượng các nguyên tố trong vật liệu sau khi nung đã làm giảm tỷ lệ O/C, tăng mức độ cacbon hóa, giúp sinh khối dịch chuyển cấu trúc tiệm cận với cấu trúc than non hoặc than đá có năng lượng liên kết hóa học cao hơn nhiều so với sinh khối thô.

Tuy nhiên, khi nhiệt độ nung tăng từ 250 đến 300ºC thì mức tăng nhiệt trị của 3 loại sinh khối không có sự thay đổi đáng kể với bã mía (18,93 – 19,34 MJ/kg), rơm (13,08 – 13,7 MJ/kg) và trấu (16,31 – 16,71 MJ/kg) trong khoảng nhiệt độ trên. Trong giai đoạn đầu của quá trình nhiệt phân nhẹ (dưới 250ºC), nhiệt trị tăng rất nhanh, nhưng tốc độ tăng chậm lại đáng kể ở khoảng nhiệt độ cao hơn. Hiện tượng này có thể do sự thay đổi trong thành phần vật liệu ở các nhiệt độ khác nhau. Khi nung đến 250ºC, lượng lớn hemicellulose trong sinh khối bị phân hủy mạnh, loại bỏ các thành phần có mức năng lượng thấp, giúp tăng đáng kể mật độ năng lượng của vật liệu, nhưng cellulose và lignin khá bền và ít bị phân hủy ở khoảng nhiệt độ trên. Trong khi nhiệt độ tăng từ 250 đến 300ºC, hầu hết lượng hemicellulose dễ phân hủy đã không còn, trong khi cellulose và lignin bị phân hủy rất ít nên không tạo ra sự đột biến về nhiệt trị, tốc độ tăng sẽ chậm lại. Đây được gọi là hiện tượng bão hòa nhiệt trị trong quá trình nhiệt phân nhẹ (torrefaction). Kết quả phân tích trên cho thấy nhiệt độ tối ưu cho quá trình nhiệt phân nhẹ của 3 loại sinh khối trên là khoảng 250°C, giúp cải thiện đáng kể nhiệt trị của sinh khối, tính kháng nước, mức độ cacbon hóa và khả năng nghiền, nén viên, đồng thời thuận lợi cho các ứng dụng tiếp theo.

Bên cạnh đó, bã mía thô có nhiệt trị thấp hơn trấu (12,98 MJ/kg so với 14,90 MJ/kg), nhưng sau khi nhiệt phân thì nhiệt trị của các vật liệu từ bã mía tăng rất mạnh, gần 50%, lên mức hơn 19 MJ/kg ở nhiệt độ 300ºC, trong khi trấu và rơm có mức tăng thấp hơn, lần lượt là 12,2% và 14,9%. Điều này cho thấy sự cải thiện nhiệt trị của vật liệu bị ảnh hưởng bởi loại và thành phần của nguyên liệu sinh khối. Bã mía có hàm lượng cellulose/lignin cao và tro thấp, giúp việc loại bỏ các hợp chất dễ bay hơi hiệu quả và hàm lượng cacbon tăng lớn nhất (Bảng 1), trong khi trấu có lượng tro silic rất lớn (10 – 18%) không có giá trị sinh nhiệt (Vassilev et al., 2010), nên làm giảm khả năng tăng nhiệt trị, và rơm có cấu trúc xơ kém bền nhiệt, hàm lượng tro cao nên có mức nhiệt trị thấp nhất trong khoảng nhiệt độ trên. Điều này cũng phù hợp với kết quả phân tích thành phần nguyên tố và tỷ lệ O/C của các vật liệu nêu trên.

Bảng 2 thể hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ nung đối với hiệu suất khối lượng và hiệu suất năng lượng của 3 loại nguyên liệu. Kết quả cho thấy khi nhiệt độ nung tăng lên, hiệu suất khối lượng và năng lượng đều giảm. Sự suy giảm mạnh nhất xảy ra trong khoảng nhiệt độ 270 - 300ºC đặc biệt với bã mía với hơn 36% (MY) và 50% (EY), trong khi các giá trị này của rơm rạ và trấu giảm trong khoảng 20 – 30%, mặc dù nhiệt trị của sản phẩm được cải thiện đáng kể. Điều này cho thấy ở nhiệt độ nung cao, mức độ biến đổi của sinh khối và đặc tính vật liệu thay đổi, nhưng đồng thời cũng dẫn đến giải phóng mạnh các chất dễ bay hơi mang theo năng lượng, làm giảm khối lượng và năng lượng của sản phẩm rắn. Đáng chú ý là ở nhiệt độ nung 250 và 270ºC, hiệu suất năng lượng của bã mía lớn hơn 100%. Điều này cho thấy sự tăng nhiệt trị của vật liệu sau nung lớn hơn sự suy giảm khối lượng. Sự gia tăng nhanh nhiệt trị của vật liệu ở nhiệt độ nung thấp do quá trình loại bỏ nước và một số chất dễ bay hơi có nhiệt trị thấp trong quá trình nhiệt phân. Khi nhiệt độ nung cao hơn, các hợp chất hữu cơ bị phân hủy mạnh hơn để giải phóng nhiều hơn các hợp chất dễ bay hơi, trong khi nhiệt trị lại tăng không đáng kể, dẫn đến hiệu suất nhiệt giảm mạnh còn hơn 52%. Do đó, cần cân bằng giữa mức độ cải thiện nhiệt trị và khả năng duy trì khối lượng sản phẩm khi lựa chọn điều kiện nhiệt phân phù hợp cho mục đích sản xuất nhiên liệu rắn.

Từ kết quả trên, việc nung sinh khối lên đến nhiệt độ 250ºC mang lại hiệu quả cao về nhiệt trị rõ rệt, đặc biệt là bã mía, với sự mất khối lượng vật liệu rắn thấp và nâng cao đáng kể về đặc tính vật liệu như giảm độ ẩm, cải thiện vượt trội tính giòn, khả năng nghiền và nén viên của vật liệu, tăng tính đồng nhất về chất lượng vật liệu và tối ưu hóa cho quá trình đốt cháy sau này.

3.5. Đánh giá tiềm năng của công nghệ nhiệt phân nhẹ (torrefaction) cho sự phát triển ĐBSCL

ĐBSCL là vùng phát triển nông nghiệp lớn nhất Việt Nam, mỗi năm tạo ra hơn 30 triệu tấn phụ phẩm nông nghiệp. Nếu nguồn sinh khối khổng lồ này được khai thác hiệu quả thì không chỉ góp phần thúc đẩy mô hình nông nghiệp tuần hoàn, giảm ô nhiễm môi trường mà còn là nguồn nguyên liệu chiến lược cho phát triển năng lượng sạch. Tuy nhiên, các đặc tính cố hữu của sinh khối thô như độ ẩm cao, tỷ trọng thấp, mật độ năng lượng thấp và khả năng phân hủy sinh học cao đang là những rào cản lớn hạn chế khả năng ứng dụng ở quy mô công nghiệp. Để khắc phục các hạn chế trên, quá trình nhiệt phân nhẹ (torrefaction) được xem là chìa khóa công nghệ quan trọng giúp chuyển hóa nguồn nguyên liệu dồi dào, rẻ tiền và phân tán này thành một dạng nhiên liệu đồng nhất, có mật độ năng lượng và chất lượng cao, góp phần vào sự phát triển bền vững của vùng ĐBSCL.

Quá trình nhiệt phân nhẹ (torrefaction) là một giải pháp đầy tiềm năng cho nông nghiệp bền vững tại ĐBSCL vì có thể chuyển hóa phụ phẩm nông nghiệp thành nhiên liệu sạch và vật liệu cải tạo đất (Lesaint et al., 2026). Quá trình này làm giảm đáng kể độ ẩm của vật liệu, loại bỏ các thành phần nhiệt trị thấp, tăng tính kỵ nước, từ đó tăng nhiệt trị của vật liệu và thuận lợi cho việc bảo quản, vận chuyển (Chandrasekharan Nair et al., 2025). Điều này rất quan trọng với các phụ phẩm nông nghiệp ĐBSCL vốn có khối lượng riêng thấp, độ ẩm biến động và khó bảo quản, vận chuyển. Sau quá trình nhiệt phân, sinh khối có thể được nghiền và nén viên thuận lợi hơn, đồng thời giảm chi phí logistics. Đây là một lợi thế quan trọng bởi vì việc thu gom, lưu trữ và vận chuyển là một trở ngại lớn đối với việc tận dụng sinh khối phân tán trong khu vực.

Trong bối cảnh Việt Nam tập trung chuyển đổi năng lượng để hướng tới mục tiêu đạt phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050, bên cạnh các nguồn năng lượng tái tạo khác như điện gió và điện mặt trời, điện sinh khối được xác định là một trong những giải pháp tiềm năng nhất, đặc biệt tại khu vực ĐBSCL, nơi tập trung sản xuất nông nghiệp lớn nhất nước. Theo quy hoạch phát triển điện sinh khối tại ĐBSCL, đến năm 2030, tổng công suất lắp đặt điện sinh khối là 304 MW, gồm điện bã mía 30 MW, điện trấu 150 MW và điện rơm rạ 80 MW (Nhựt và ctv., 2022). Để thực hiện mục tiêu trên, việc khai thác và sử dụng hiệu quả các nguồn trấu, bã mía và rơm rạ được đẩy mạnh trong quá trình sản xuất điện. Tuy nhiên, khả năng thay thế than đá trong các nhà máy nhiệt điện tại ĐBSCL và các vùng phụ cận bằng sinh khối thô có nhiều thách thức. Sự kết hợp sinh khối thô để đốt kèm (co-firing) với than đá bị giới hạn ở mức 5 – 10% do sinh khối thô có độ ẩm cao, nhiệt trị thấp, gây xỉ hóa, ăn mòn lò hơi và giảm hiệu quả nhiệt năng của hệ thống. Sinh khối qua xử lý ở điều kiện nhiệt phân nhẹ có tính chất gần với than đá, cho phép tỷ lệ kết hợp tới 30 – 50% hoặc có thể thay thế hoàn toàn than đá mà không cần thay đổi cấu trúc hệ thống lò đốt. Bên cạnh đó, việc xử lý sơ bộ sinh khối bằng quá trình nhiệt phân nhẹ có thể biến đổi các loại sinh khối thô thành vật liệu đồng nhất, khô, giòn, giàu cacbon và nhiệt trị cao để làm nhiên liệu cho các nhà máy năng lượng phi tập trung với quy mô vừa, gần các vùng nguyên liệu phù hợp với điều kiện của vùng ĐBSCL.

Vì thế, nhiệt phân nhẹ là một công nghệ nổi bật để xử lý sơ bộ nhằm đem lại những giá trị cao cho sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp có thể thay thế than đá với hiệu suất năng lượng cao và phát thải thấp cho sự phát triển bền vững tại ĐBSCL (Nunes & Matias, 2020).

4. KẾT LUẬN

Năng lượng sinh khối có tiềm năng rất lớn tại ĐBSCL, vừa đảm bảo an ninh năng lượng vừa tận dụng nguồn phụ phẩm nông nghiệp dồi dào. Quá trình nhiệt phân nhẹ có thể cải thiện hiệu quả đặc tính, với nhiệt trị tăng từ 12 đến 50% so với sinh khối thô, lên đến hơn 13,7 MJ/kg (rơm), 16,71 MJ/kg (trấu) và 19 MJ/kg (bã mía). Bên cạnh đó, độ ẩm và tỷ lệ O/C giảm mạnh từ 1,05 xuống 0,26 ở nhiệt độ nung cao, cho thấy điều này đã thúc đẩy quá trình cacbon hóa vật liệu, giúp tăng mật độ năng lượng, tính đồng nhất của vật liệu và khả năng nén viên. Kết quả cũng cho thấy quá trình nhiệt phân ở nhiệt độ 250°C mang lại hiệu quả cao trong việc cải thiện đặc tính sinh khối về nhiệt trị và nâng cao đáng kể đặc tính cơ học của vật liệu mà vẫn giữ được hiệu suất khối lượng vật liệu rắn cao. Do đó, công nghệ nhiệt phân nhẹ (Torrefaction) không chỉ là một giải pháp năng lượng thuần túy mà còn là cách tiếp cận quan trọng để nâng cấp nguồn tài nguyên phụ phẩm nông nghiệp khổng lồ đang bị lãng phí của ĐBSCL thành nguồn nhiên liệu sinh học chất lượng cao, thúc đẩy kinh tế xanh và bảo vệ bền vững sinh thái vùng ĐBSCL trước biến đổi khí hậu.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả chân thành cảm ơn Khoa Kỹ thuật Hóa học, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ và các giảng viên, sinh viên đã hỗ trợ thiết bị, ý kiến và đóng góp có giá trị cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Abulfotuh, F. (2007). Energy efficiency and renewable technologies: the way to sustainable energy future. *Desalination*, *209*(1), 275-282. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.040

Aslam, U., Ramzan, N., Aslam, Z., Iqbal, T., Sharif, S., Hasan, S. W. u., & Malik, A. (2019). Enhancement of fuel characteristics of rice husk via torrefaction process. *Waste Management & Research*, *37*(7), 737-745. https://doi.org/10.1177/0734242X19838620

BMUB. (2016). *Climate Action Plan 2050.* Principles and goals of the German government's climate policy. https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts_de_en.pdf

Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I., & Williams, P. T. (2008). Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel*, *87*(6), 844-856. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.041

Busch, J.-P. (2016). *Die torrefizierung biogener reststoffe für die mitverbrennung in kraftwerksfeuerungen* (doctoral dissertation). Technischen Universität Darmstadt. Darmstadt.

Chandrasekharan Nair, S., John, V., Geetha Bai, R., & Kikas, T. (2025). Torrefaction of lignocellulosic biomass: A pathway to renewable energy, circular economy, and sustainable agriculture. *Sustainability*, *17*(17), 7738. https://doi.org/10.3390/su17177738

Chen, W.-H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *44*, 847-866. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039

Gibbons, S. M., & Al-Gailani, A. (2026). Torrefaction for biofuel enhancement and solid biofuels: Process optimisation and characterisation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *60*, 101086. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2026.101086

Ivanovski, M., Petrovič, A., Goričanec, D., Urbancl, D., & Simonič, M. (2023). Exploring the properties of the torrefaction process and its prospective in treating lignocellulosic material. *Energies*, *16*(18), 6521. https://doi.org/10.3390/en16186521

Lesaint, L., Rumpel, C., & Houben, D. (2026). Torrefied biomass (Biotorr) potential for agricultural applications. A review. *Waste Management*, *209*, 115197. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115197

Mamvura, T. A., & Danha, G. (2020). Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, *6*(3), e03531. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03531

Nguyen, N. M. (2021). *Chemical-looping gasification process of torrefied woodchips based on experimental and numerical studies* (doctoral dissertation). Technische Universität Darmstadt.

Nhựt, N. M., Tuyên, L. T. C., Hương, H. L., Giao, Đ. H., Thiện, Đ. V. H., & Phong, H. Q. (2022). Sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp: Tiềm năng và hướng ứng dụng cho năng lượng tái tạo tại Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, *58*(SDMD), 201-213. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2022.206

Nunes, L. J. R., & Matias, J. C. O. (2020). Biomass Torrefaction as a Key Driver for the Sustainable Development and Decarbonization of Energy Production. *Sustainability*, *12*(3), 922. https://doi.org/10.3390/su12030922

Olugbade, T. O., & Ojo, O. T. (2020). Biomass Torrefaction for the Production of High-Grade Solid Biofuels: A review. *BioEnergy Research*, *13*(4), 999-1015. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10138-3

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2016). *Paris Climate Agreement*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf

Sarker, T. R., Nanda, S., Dalai, A. K., & Meda, V. (2021). A review of torrefaction technology for upgrading lignocellulosic biomass to solid biofuels. *BioEnergy Research*, *14*(2), 645-669. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10236-2

Shankar Tumuluru, J., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). REVIEW: A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, *7*(5), 384-401. https://doi.org/10.1089/ind.2011.7.384

Thanh, M. (2025). *Xanh hóa nông nghiệp ĐBSCL từ năng lượng tái tạo*. https://netzero.vn/xanh-hoa-nong-nghiep-dbscl-tu-nang-luong-tai-tao/

Thủy, T. (2023). *Việt Nam ưu tiên phát triển các loại hình điện sinh khối, điện sản xuất từ rác và chất thải rắn*. https://moit.gov.vn/tin-tuc/hoat-dong/viet-nam-uu-tien-phat-trien-cac-loai-hinh-dien-sinh-khoi-dien-san-xuat-tu-rac-va-chat-thai-ran.html

Văn, H. (2026). *Thủ tướng: Phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050 là sứ mệnh và cam kết hành động của Việt Nam*. https://baochinhphu.vn/thu-tuong-phat-thai-rong-bang-0-vao-nam-2050-la-su-menh-va-cam-ket-hanh-dong-cua-viet-nam-102260114182136397.htm

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, *89*(5), 913-933. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022

Yang, X., Zhao, Y., Zhang, L., Wang, Z., Zhao, Z., Zhu, W., Ma, J., Shen, B. (2023). Effects of Torrefaction Pretreatment on the Structural Features and Combustion Characteristics of Biomass-Based Fuel. *Molecules*, *28*(12), 4732. https://doi.org/10.3390/molecules28124732