

Tác dụng của chiếu xạ chùm điện tử đến một số đặc tính của xanthan định hướng ứng dụng cho sản xuất phân bón lá

Nguyễn Văn Bình*, Trần Xuân An, Nguyễn Xuân Tùng, Hoàng Đăng Sáng, Trần Bằng Diệp, Trần Huyền Thanh, Hoàng Phương Thảo, Trần Minh Quỳnh

Trung tâm Chiếu xạ Hà Nội, Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam, Km 12 đường 32, phường Minh Khai, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 3/3/2023; ngày chuyển phân biện 6/3/2023; ngày nhận phân biện 4/4/2023; ngày chấp nhận đăng 10/4/2023

Tóm tắt:

Xử lý chiếu xạ cắt mạch đã được biết đến là một công cụ hiệu quả để phân hủy các polysaccharide thành các phân đoạn có kích thước và khối lượng phân tử nhỏ hơn, hay thậm chí tạo oligo-saccharide với hoạt tính sinh học cải thiện. Mục đích của nghiên cứu này nhằm xác định một số đặc tính của xanthan chiếu xạ hướng tới ứng dụng cho sản xuất phân bón lá. Dung dịch xanthan 2% đã được chiếu xạ bằng chùm điện tử (EB) với các liều 10, 20, 30 và 50 kGy, suất liều 1,5; 3,5 và 7,5 kGy/s. Các thông số nghiên cứu bao gồm ảnh hưởng của liều chiếu, suất liều đến một số đặc tính của xanthan ở trạng thái dung dịch. Kết quả chỉ ra rằng, độ nhớt và khối lượng phân tử của xanthan giảm khi tăng liều xạ và suất liều. Chiếu xạ EB không làm thay đổi cấu trúc của xanthan, dù phổ hấp thụ phân tử (UV-Vis) và máy quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR) đều cho thấy đỉnh hấp thụ ứng với nhóm carbonyl tăng lên do quá trình cắt mạch làm hình thành các liên kết đôi C=O trong phân tử. Các phân đoạn xanthan cắt mạch hình thành có độ linh động cao hơn, do đó độ kết tinh và nhiệt độ nóng chảy của xanthan chiếu xạ cũng cao hơn.

Từ khóa: cắt mạch, cấu trúc phân tử, chiếu xạ bằng chùm điện tử, đặc tính, xanthan.

Chỉ số phân loại: 1.3, 4.7

Effect of electron beam irradiation on some characteristics of xanthan with emphasis on application in foliar fertiliser production

Van Binh Nguyen*, Xuan An Tran, Xuan Tung Nguyen, Dang Sang Hoang, Bang Diép Tran, Huyen Thanh Tran, Phuong Thao Hoang, Minh Quynh Tran

Hanoi Irradiation Center, Vietnam Atomic Energy Institute, Km 12, Road 32, Minh Khai Ward, Bac Tu Liem District, Hanoi, Vietnam

Received 3 March 2023; revised 4 April 2023; accepted 10 April 2023

Abstract:

Irradiation-induced chain scission is known as a useful tool for degrading polysaccharides into smaller-sized and lower-molecular-weight fragments or even producing oligo-saccharides that have improved bioactivities. This study aimed to investigate the properties of radiation-degraded xanthan for further application in the production of foliar fertiliser. The xanthan solutions of 2% were electron beam (EB) irradiated at 10, 20, 30, and 50 kGy doses, with dose rates of 1.5, 3.5, and 7.5 kGy/s. The study parameters include the effects of irradiation dose and dose rate on certain properties of xanthan in solution. Results showed the viscosity and molecular weight of xanthan significantly decreased with the increases in radiation dose and dose rate. EB irradiation seemed not to introduce the changes in the xanthan structure, though UV-Vis and FT-IR spectra both revealed the absorption peaks corresponding to the carbonyl group increased with radiation dose due to the formation of C=O double bonds during radiation degradation. The resulting degraded xanthan fragments showed higher mobilities for crystallisation, so their crystallinity degree and melting temperature also increased.

Keywords: characteristics, degradation, electron beam irradiation, molecular structure, xanthan.

Classification numbers: 1.3, 4.7

*Tác giả liên hệ: Email: nvanbinhsh@yahoo.com

1. Đặt vấn đề

Xanthan là một polysaccharide được hình thành trong quá trình lên men cơ chất giàu glucose, như tinh bột ngô của các chủng vi khuẩn *Xanthomonas campestris*. Phân tử xanthan có cấu trúc gồm một mạch chính là cellulose, trong đó các phân tử glucose liên kết với nhau bằng liên kết $\beta(1,4)$ và các mạch nhánh trisaccharide gồm 2 gốc manose và một gốc galactose. Mỗi đơn vị β -D-glucopyranosyl trên mạch chính liên kết với một đơn vị trisaccharide [1-4]. Đa số các sản phẩm xanthan thương mại đều có khối lượng phân tử (KLPT) rất cao (2×10^6 - 2×10^7 g/mol), cấu trúc vững chắc nên là những polysaccharide rất bền với tác dụng của axit và enzyme.

Trong lĩnh vực nông nghiệp, xanthan thường được dùng để kéo dài thời gian tiếp xúc phân bón với cây trồng, giúp bám dính chặt các hóa chất như dung dịch phân bón qua lá khi phun và kiểm soát sự thất thoát, bay hơi trong khi phun của thuốc diệt cỏ, thuốc trừ sâu và phân bón [5, 6]. Xanthan cũng có thể bị phân hủy bởi các enzyme giống như nhiều polysaccharide khác. Mức độ phân hủy xanthan trong dung dịch bởi các enzyme ngoại bào của chủng *cellulomonas* sp. LX đã được khảo sát. Kết quả cho thấy, sản phẩm xantho-oligosaccharide có thể sử dụng như chất kích thích và điều hòa sinh trưởng, giúp tăng tốc độ sinh trưởng và phát triển của cây đậu tương [7].

Trong những năm gần đây, kỹ thuật cắt mạch bằng bức xạ đã được áp dụng để phân hủy các polysaccharide [8]. Tương tự như các polysaccharide khác, xanthan cũng dễ dàng phân hủy khi chiếu xạ thành các phân đoạn ngắn hơn, với khả năng hòa tan tốt hơn, do đó dễ dàng sử dụng hơn. Trong khi chiếu xạ xanthan ở dạng khô đòi hỏi liều chiếu cao, mức độ phân hủy xanthan lớn hơn khi chiếu xạ ở dạng lỏng [9]. Khối lượng phân tử của xanthan chiếu xạ ở trạng thái dung dịch giảm còn một nửa ngay ở liều thấp 5 kGy, như đã được báo cáo bởi Y.J. Li và cs (2011) [10]. Kết quả của họ cũng cho thấy, oligoxanthan với KLPT khoảng 10 kDa có thể tạo được từ dung dịch xanthan chiếu xạ liều 120 kGy. Khi chiếu xạ dung dịch xanthan nồng độ khác nhau, H. Hayrabolulu và cs (2018) [11] nhận thấy, hiệu suất cắt mạch xanthan tăng theo sự tăng của liều chiếu, song giảm khi nồng độ dung dịch tăng từ 0,5 đến 4%.

Nghiên cứu trước đây của chúng tôi cũng cho thấy, xanthan có KLPT trung bình nhớt khoảng $12.000 \text{ g.mol}^{-1}$, có thể thu được khi chiếu xạ dung dịch xanthan trên nguồn Co-60 với liều 150 kGy [12]. Nghiên cứu này tiếp tục khảo sát ảnh hưởng của chiếu xạ EB đến một số đặc tính của xanthan, hướng tới ứng dụng cho sản xuất phân bón lá. Các dung dịch xanthan nồng độ 2% đã được chiếu xạ trên máy gia tốc (EB) và ảnh hưởng của liều chiếu, suất liều chiếu đến một số đặc tính quan trọng của xanthan cắt mạch đã được xác định.

2. Nguyên, vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên, vật liệu

Xanthan do Deosen Biochemical Ltd. (Trung Quốc) sản xuất và cung cấp ở dạng bột màu trắng, dung dịch xanthan 1% pha trong dung môi KCl 1% có độ nhớt 1200-1600 mPa.s. Các hóa chất sử dụng đều là tinh khiết của Hãng Merck.

2.2. Xử lý chiếu xạ xanthan

Xanthan được hòa tan trong nước cất thành dung dịch đồng nhất với nồng độ 2%, sau đó được đóng vào các chai nhựa 500 ml, mỗi chai chứa 150 ml. Chiếu xạ chùm điện tử được thực hiện trên máy gia tốc UELR-10-15S2 của Trung tâm Nghiên cứu và Triển khai Công nghệ Bức xạ (Vinagamma) tại TP Thủ Đức, TP Hồ Chí Minh. Thiết bị có năng lượng electron 10 MeV và công suất 15 kW. Các mẫu dung dịch xanthan được chiếu xạ ở các liều 10, 20, 30 và 50 kGy, với suất liều 1,5; 3,5 và 7,5 kGy/s. Trong đó, hiệu ứng của suất liều chúng tôi chỉ nghiên cứu ở liều 20 kGy. Sau khi chiếu xạ, các dung dịch xanthan được tách nước trên máy đông khô FDU-2110 (Nhật Bản). Mẫu được bảo quản để phục vụ các phân tích khác nhau.

2.3. Xác định độ nhớt biểu kiến

Độ nhớt biểu kiến của xanthan chiếu xạ với các liều xạ khác nhau được xác định bằng máy đo độ nhớt Brookfield, DV-III Ultra (Anh). Các mẫu xanthan khác nhau được pha thành dung dịch nồng độ 0,5%, được đo với đầu đo LV1 cho mẫu đối chứng (không chiếu xạ) và LV4 cho các mẫu chiếu xạ từ 10 đến 50 kGy, tốc độ quay 100 v/ph ở nhiệt độ phòng $25 \pm 1^\circ\text{C}$.

2.4. Xác định khối lượng phân tử trung bình nhớt

Khối lượng phân tử trung bình nhớt (M_v) của xanthan được xác định theo phương pháp đo độ nhớt nội phân tử. Các mẫu xanthan được hòa tan trong NaCl 0,01 M thành các dung dịch loãng có nồng độ (c) trong khoảng 0,01 đến 0,08%, độ nhớt tương đối (η_r) của mỗi dung dịch được xác định từ tỷ số thời gian chảy t của dung dịch và t_0 của dung môi trong mao quản của nhớt kế Ubbelodhe ở cùng điều kiện. Độ nhớt đặc trưng ($\eta_{sp} = \eta_r - 1$) liên quan đến sự tăng độ nhớt do các phân tử polyme, và độ nhớt giảm ($\eta_{red} = \eta_{sp}/c$) phản ánh khả năng tăng độ nhớt do dung môi của polyme. Sự phụ thuộc của độ nhớt giảm (η_{red}) và nồng độ dung dịch được lập thành đồ thị và giá trị độ nhớt thực $[\eta]$ của polyme được ngoại suy từ độ nhớt giới hạn khi nồng độ dung dịch $c=0$. Khối lượng trung bình nhớt của xanthan được xác định theo công thức:

$$M = ([\eta]/K)^{1/\alpha}$$

trong đó: giá trị $K=2,79 \times 10^{-5}$ và $\alpha=1,2754$ [13].

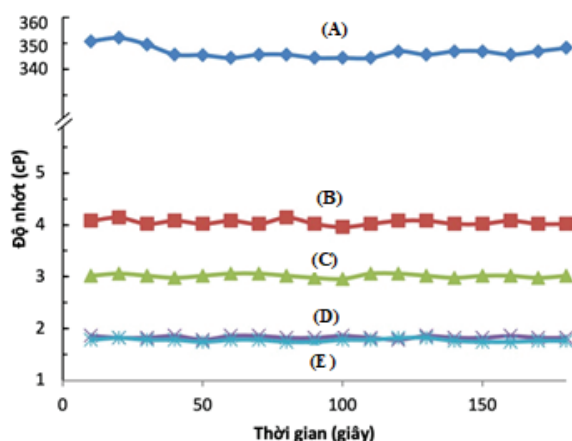
2.5. Phân tích cấu trúc và đặc tính nhiệt

Mẫu xanthan được hòa tan trong nước cất thành dung dịch nồng độ 0,1%, phổ UV-Vis của dung dịch được ghi lại bằng quang phổ kế UV-2450 Shimadzu (Nhật Bản), trong khoảng bước sóng 200-350 nm. Phổ FT-IR được ghi trên Spectrum One FT-IR spectrometer 8100 (Perkin-Elmer), tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội. Khoảng 3 mg mẫu xanthan khô được trộn đều với 30 mg KBr tinh khiết và ép thành màng mỏng. Phổ FT-IR của mẫu được ghi lại trung bình của 20 lần quét trong dải 4.000-400 cm^{-1} . Giảm đồ nhiệt lượng vi sai (DSC) được xác định bằng thiết bị đo nhiệt lượng TG/DSC Setaram (Pháp). Mẫu xanthan được gia nhiệt từ nhiệt độ phòng (30) đến 250°C, với tốc độ gia nhiệt 10°C/phút. Nhiệt độ nóng chảy (T_m) của mẫu được xác định theo phần mềm phân tích phổ DSC-131.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Tác dụng của chiếu xạ bằng chùm điện tử đến độ nhớt biểu kiến của dung dịch xanthan

Sự thay đổi độ nhớt biểu kiến của dung dịch xanthan và xanthan chiếu xạ theo thời gian được trình bày trên hình 1. Rõ ràng, độ nhớt biểu kiến của dung dịch xanthan dường như không phụ thuộc vào thời gian trượt. Kết quả cũng cho thấy, độ nhớt biểu kiến của dung dịch xanthan giảm nhanh khi chiếu xạ, mức độ giảm tiếp tục tăng theo sự tăng của liều xạ. Điều này là do hiệu ứng cắt mạch bức xạ đã bẻ gãy liên kết glucosid trong phân tử xanthan ban đầu thành các phân đoạn có kích thước ngắn và linh động hơn, dẫn đến độ nhớt của dung dịch giảm xuống. Nghiên cứu của Y.J. Li và cs (2011) [10] cũng đã báo cáo rằng, độ nhớt biểu kiến của dung dịch xanthan giảm còn 1/3 ngay khi chiếu xạ gamma liều 5 kGy. Kết quả này cũng phù hợp với nghiên cứu trước đây của chúng tôi khi chiếu xạ xanthan trên nguồn gamma ^{60}Co [9, 12].



Hình 1. Độ nhớt biểu kiến của dung dịch xanthan không chiếu xạ (A) và chiếu xạ liều 10 (B), 20 (C), 30 (D) và 50 kGy (E) theo thời gian trượt.

3.2. Ảnh hưởng của chiếu xạ bằng chùm điện tử đến khối lượng phân tử của xanthan

Ảnh hưởng của chiếu xạ EB đến độ nhớt thực và KLPT trung bình nhớt của xanthan chiếu xạ được xác định theo liều xạ và suất liều được trình bày trên bảng 1 và 2. Kết quả ở bảng 1 thấy rằng, cả độ nhớt và KLPT của xanthan đã giảm nhanh khi chiếu xạ ngay ở liều 10 kGy. Sau đó, tiếp tục giảm chậm khi liều chiếu tăng lên đến 50 kGy. Thậm chí, dường như không có sự khác biệt rõ rệt về KLPT của xanthan chiếu xạ liều 30 và 50 kGy. Tương tự như tia gamma, bức xạ chùm điện tử EB đã bẻ gãy liên kết glucosid trong phân tử xanthan thành các phân đoạn ngắn hơn với KLPT thấp hơn. Trong nghiên cứu trước sử dụng nguồn chiếu xạ gamma, chúng tôi cũng thu được kết quả tương tự. Cụ thể, KLPT trung bình nhớt của xanthan giảm nhanh ngay khi chiếu xạ liều thấp dưới 25 kGy, sau đó giảm chậm lại. Y.J. Li và cs (2010) [14] khi nghiên cứu xử lý chiếu xạ xanthan ở trạng thái khô trong dải liều (0-500 kGy), bằng nguồn Co-60, nhận thấy có sự thay đổi KLPT ($1,71 \times 10^6 - 2,23 \times 10^6$ ở liều 10 kGy, $1,59 \times 10^4$ ở liều 500 kGy).

Bảng 1. Ảnh hưởng của liều chiếu xạ bằng chùm điện tử đến độ nhớt và khối lượng phân tử trung bình nhớt (M_v) của xanthan chiếu xạ ở dạng dung dịch.

Liều chiếu (kGy)	Độ nhớt thực (dl/g)	Khối lượng phân tử ($M_v \times 10^3$ g/mol)
0	351,5	1,798
10	4,08	176,7
20	3,02	38,7
30	1,78	22,3
50	1,86	22,6

Ảnh hưởng của chiếu xạ EB đến tính chất phân tử của xanthan cũng phụ thuộc vào suất liều như nêu trong bảng 2. Kết quả cho thấy, khi chiếu xạ các dung dịch xanthan với liều 20 kGy, mức độ suy giảm độ nhớt và KLPT của nó tỷ lệ thuận với suất liều chiếu. Khi chiếu xạ dung dịch xanthan 2% với liều 20 kGy và suất liều 7,5 kGy/giây, M_v của xanthan giảm gần 50 lần ($1,798 \times 10^3$ g/mol xuống $38,7 \times 10^3$ g/mol). Trong khi chiếu xạ với các suất liều thấp hơn là 3,5 và 1,5 kGy/giây, M_v của xanthan chỉ giảm khoảng 20 lần. Chiếu xạ EB có suất liều rất cao so với chiếu xạ gamma nên hiệu ứng phân hủy oxy hóa khi có mặt oxy là không đáng kể, lượng gốc tự do tạo thành khi chiếu xạ ở suất liều cao lớn hơn nhiều so với suất liều thấp, dẫn đến hiệu suất cắt mạch tăng và KLPT của xanthan giảm theo sự tăng của suất liều. Khi chiếu xạ xanthan bằng chùm điện tử (EB), F.F. Vieira và cs (2001) [15] cũng nhận

thấy độ nhớt của dung dịch xanthan chiếu xạ với suất liều 11,17 kGy/giây giảm theo sự tăng của liều chiếu trong khoảng từ 5-50 kGy. Như vậy, hiệu quả cắt mạch bức xạ của chùm điện tử đối với xanthan cao hơn so với tia gamma, do suất liều chiếu cao và tốc độ chiếu nhanh hơn.

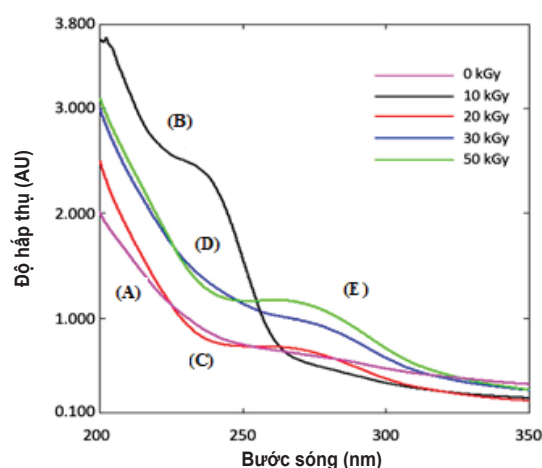
Bảng 2. Ảnh hưởng của suất liều chiếu bằng chùm điện tử đến độ nhớt và khối lượng phân tử trung bình nhớt (M_v) của xanthan chiếu xạ liều 20 kGy ở dạng dung dịch.

Suất liều (kGy/s)	Độ nhớt thực (dl/g)	Khối lượng phân tử ($M_v \times 10^3$ g/mol)
7,5	3,02	38,7
3,5	3,24	89,9
1,5	3,32	92,8

Theo lý thuyết, quá trình cắt mạch bức xạ của các polysaccharide chủ yếu phụ thuộc vào sản lượng gốc tự do hình thành trong quá trình chiếu xạ. Khi chiếu xạ ở trạng thái dung dịch, tác động gián tiếp của bức xạ làm phân ly các phân tử nước đã tạo ra một lượng gốc tự do lớn hơn nhiều, bằng cách đó thúc đẩy các phản ứng phân hủy làm đứt gãy các liên kết $\beta(1,4)$ glycosid, tạo thành các phân đoạn có kích thước và KLPT khác nhau [6]. Khi liều xạ tăng lên, các đoạn mạch lớn hơn tiếp tục bị tấn công bởi gốc tự do và KLPT của polyme tiếp tục giảm xuống. Tuy nhiên, lượng gốc tự do tạo thành do xạ ly nước có thể bão hòa khi liều xạ và suất liều tăng đến giá trị nhất định, dẫn đến KLPT của polyme giảm không đáng kể khi liều chiếu tăng từ 30-50 kGy. Mặt khác, với các heteropolymer như xanthan, độ nhớt dung dịch có thể không thay đổi, nhiều dù KLPT tiếp tục giảm. Điều này chỉ có thể nhận biết dựa trên KLPT trung bình số (M_n) và KLPT trung bình khối (M_w) [11].

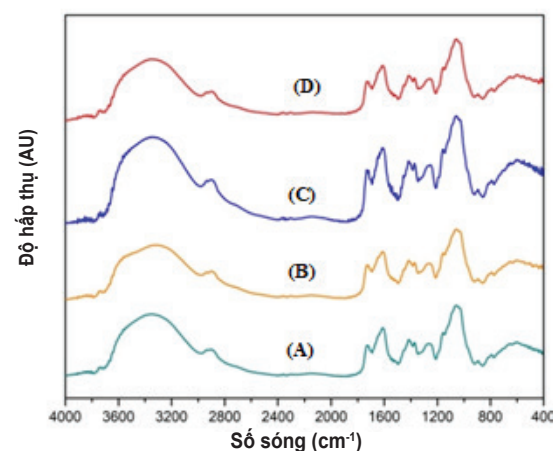
3.3. Ảnh hưởng của chiếu xạ bằng chùm điện tử đến cấu trúc và đặc tính nhiệt của xanthan

Phổ UV-Vis của dung dịch xanthan (0,2%) chiếu xạ ở các liều khác nhau được nêu ở hình 2. Có thể nhận thấy độ hấp thụ của tất cả các dung dịch xanthan đều có xu hướng giảm khi bước sóng tăng. Mức độ giảm mạnh trong dải bước sóng thấp, sau đó giảm chậm lại. Phổ UV-Vis của xanthan không chiếu xạ (A) có dạng hyperbol, phổ UV-Vis của các dung dịch xanthan chiếu xạ (B-E) có hai điểm uốn ở khoảng 235 và 265 nm, và một đỉnh hấp thụ mới hình thành ở khoảng bước sóng 265 nm với cường độ tăng theo liều chiếu từ 20 (C) đến 50 kGy (E). Điều này có thể lý giải là do sự hình thành liên kết đôi $C=O$ hình thành khi cắt mạch chính cellulose và tách nguyên tử hydro khỏi xanthan, tương tự như khi chiếu xạ alginate [16].



Hình 2. Phổ hấp thụ phân tử của xanthan (A) và xanthan chiếu xạ ở trạng thái dung dịch với liều chiếu 10 (B), 20 (C), 30 (D) và 50 kGy (E).

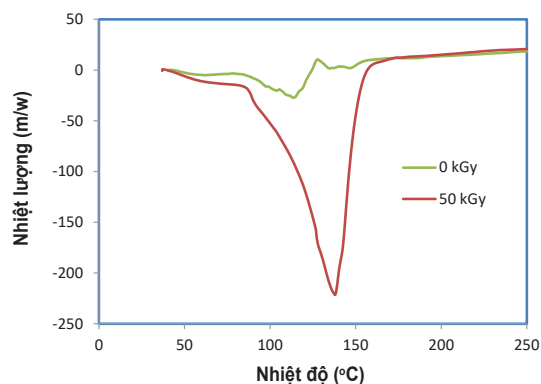
Ảnh hưởng của chiếu xạ EB đến cấu trúc nhóm chức của xanthan được phân tích bằng phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR). Hình 3 cho thấy, phổ FT-IR của tất cả các mẫu xanthan và xanthan chiếu xạ đều giống nhau, dù có sự thay đổi cường độ của đỉnh hấp thụ tại khoảng số sóng 1750 cm^{-1} , tương ứng với dải hấp thụ của nhóm carbonyl ($-R-C=O$) trong polyme. Kết quả này cho thấy rằng, chiếu xạ EB không ảnh hưởng đến cấu trúc của xanthan, dù quá trình cắt mạch bức xạ đã hình thành các nhóm chức carbonyl mới như đã chỉ ra trong phổ tử ngoại.



Hình 3. Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier của xanthan (A) và xanthan chiếu xạ ở dạng dung dịch liều 10 (B), 20 (C) và 50 kGy (D).

Giản đồ nhiệt lượng vi sai (DSC) cung cấp thông tin về các đặc tính nhiệt của mẫu thuộc dạng tinh thể hay vô định hình. Hình 4 trình bày giản đồ nhiệt lượng vi sai của xanthan và xanthan chiếu xạ liều 50 kGy. Dễ dàng nhận thấy xanthan là một polyme bán tinh thể, có thể nóng chảy ở nhiệt độ khá thấp. Nhiệt độ nóng chảy (T_m) của xanthan không chiếu xạ ban đầu vào khoảng $111,3^\circ\text{C}$. Giá trị này là

108,9°C như trong báo cáo của T. Ramasamy và cs (2011) [17]. Sau khi chiếu xạ liều 50 kGy, nhiệt độ nóng chảy của xanthan chiếu xạ tăng lên 137,9°C. Điều này là do quá trình cắt mạch đã tạo thành các phân đoạn ngắn với tính linh động cao hơn, dẫn đến mức kết tinh lớn hơn thành các tinh thể nóng chảy ở nhiệt độ cao hơn.



Hình 4. Giảm độ nhiệt lượng vi sai của xanthan và xanthan chiếu xạ ở dạng dung dịch với liều 50 kGy, suất liều 7,5 kGy/giây.

4. Kết luận

Ảnh hưởng của chiếu xạ chùm điện tử đến một số đặc tính của dung dịch xanthan đã được nghiên cứu. Kết quả cho thấy, giống như tia gamma, bức xạ chùm điện tử EB cũng gây cắt mạch phân tử xanthan, làm giảm độ nhớt biểu kiến của dung dịch cũng như KLPT trung bình nhớt của xanthan. Sự giảm độ nhớt và KLPT của xanthan phụ thuộc vào liều xạ và suất liều chiếu. KLPT của nó giảm mạnh ngay khi chiếu xạ dung dịch 2% với liều 10 kGy, sau đó giảm chậm lại và dường như không thay đổi khi liều chiếu tăng tiếp từ 30 đến 50 kGy. Quá trình cắt mạch và tách nguyên tử hydro đã làm hình thành các nhóm carbonyl song không làm thay đổi đặc trưng nhóm chức của xanthan như chỉ ra trên phổ UV-Vis và FT-IR. Chiếu xạ EB cũng làm tăng độ kết tinh và nhiệt nóng chảy của phân tử xanthan.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ thông qua đề tài cấp bộ, mã số ĐTCB.03/21/TTCX. Các tác giả cũng xin được cảm ơn Trung tâm Chiếu xạ Hà Nội và Trung tâm Nghiên cứu và Triển khai Công nghệ bức xạ đã hỗ trợ việc chiếu xạ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F.G. Ochoa, V.E. Santos, J.A. Casas, et al. (2000), "Xanthan gum: Production, recovery, and properties", *Biotechnol. Adv.*, **18**(7), pp.549-579, DOI: 10.1016/S0734-9750(00)00050-1.

[2] M.P. Tombs, S.E. Harding (1998), *An Introduction to Polysaccharide Biotechnology*, Taylor & Francis Ltd, pp.158-163.

[3] A. Lackke (2004), "Xanthan - A versatile gum", *Resonance*, **9**, pp.25-33, DOI: 10.1007/BF02834866.

[4] D.F.S. Petri (2015), "Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications" *Appl. Polym. Sci.*, **132**(23), DOI: 10.1002/app.42035.

[5] R.W. Lewis, A.E. Richard, N. Malic, et al. (2016), "Polymeric drift control adjuvants for agricultural spraying", *Macromol. Chem. Phys.*, **217**(20), pp.2223-2242, DOI: 10.1002/macp.201600139.

[6] X. Zhang, J. Liu (2011), "Effect of arabic gum and xanthan gum on the stability of pesticide in water emulsion", *J. Agric. Food Chem.*, **59**(4), pp.1308-1315, DOI: 10.1021/jf1034459.

[7] F. Qian, L. An, X. He, et al. (2006), "Antibacterial activity of xantho-oligosaccharide cleaved from xanthan against phytopathogenic *Xanthomonas campestris* PV", *Campestris Process Biochem.*, **41**(7), pp.1582-1588, DOI: 10.1016/j.procbio.2006.03.003.

[8] F. Yoshii, N. Nagasawa, T. Kume, et al. (2002), "Radiation degradation of marine polysaccharides by low energy electron beam", *Proceedings of The Fnca 2002 Workshop on Application of Electron Accelerator-Radiation System for Liquid Samples*, JAERI-Conf, **2003-016**, pp.42-47.

[9] N.V. Binh, T.B. Diep, N.T. Thom, et al. (2016), "Low molecular weight xanthan prepared by gamma irradiation and its effects on development of seedlings", *RAD Conf. Proc.*, **1**, pp.95-98, DOI: 10.21175/RadProc.2016.22.

[10] Y.J. Li, Y.M. Ha, F. Wang, et al. (2011), "Effect of irradiation on the molecular weight, structure and apparent viscosity of xanthan gum in aqueous solution", *Adv. Mater. Res.*, **239-242**, pp.2632-2637, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.2632.

[11] H. Hayrabolulu, M. Demeter, M. Cutrubinis, et al. (2018), "Radiation-induced degradation of xanthan gum in aqueous solution", *Radiat. Phys. Chem.*, **144**, pp.189-193, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2017.08.014.

[12] T.M. Quynh, N.V. Binh, T.X.A. Tran (2018), "Preparation of low molecular weight xanthan by gamma radiation degradation", *Vietnam Journal of Science and Technology*, **60**(3), pp.41-44 (in Vietnamese).

[13] B. Tinland, M. Rinaudo (1989), "Dependence of the stiffness of the xanthan chain on the external salt concentration", *Macromolecules*, **22**(4), pp.1863-1865, DOI: 10.1021/ma00194a058.

[14] Y.J. Li, Y.M. Ha, F. Wang, et al. (2010), "Effect of irradiation on molecular weight and antioxidant activity of xanthan gum", *J. Agric. Sci.*, **24**(6), pp.1208-1213, DOI: 10.11869/hnxb.2010.06.1208.

[15] F.F. Vieira, N.I. Del Mastro (2001), *Electron Beam Irradiation Effects on Xanthan Gum, Rheological Aspects*, IAEA-SM-336, 152pp.

[16] N. Nagasawa, H. Mitomo, F. Yoshii, et al. (2000), "Radiation-induced degradation of sodium alginate", *Polym. Degrad. Stab.*, **69**(3), pp.279-285, DOI: 10.1016/S0141-3910(00)00070-7.

[17] T. Ramasamy, U.D.S. Kandhasami, H. Ruttala, et al. (2011), "Formulation and evaluation of xanthan gum-based aceclofenac tablets for colon targeted drug delivery", *Brazilian J. Pharm. Sci.*, **47**(2), pp.299-311, DOI: 10.1590/S1984-82502011000200011.