

STUDY ON CHEMICAL MODIFICATION OF CASSAVA STARCH FOR INTENDED APPLICATION OF BIODEGRADABLE FILMS

Nguyen Chau Giang*, Vu Minh Duc

School of Material Science and Engineering - Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 03/6/2025 Revised: 14/11/2025 Published: 17/11/2025	A polymer blend of poly(butylene adipate-co-terephthalate) and cassava starch was fabricated via a single-step melt processing on a twin-screw extruder instead of a multi-stage procedure. To reduce the intrinsic polarity of the starch and enhance its compatibility with the poly(butylene adipate-co-terephthalate) matrix, the cassava starch was first modified with citric acid in a heated high-speed mixer prior to being co-melted with the polyester and glycerol plasticizer in a twin-screw extruder. The starch modification in the high-speed mixer was conducted under varying temperatures (from 80 °C to 100 °C) and citric acid concentrations (from 2 wt % to 3 wt % relative to starch), and the required glycerol content to achieve starch gelatinization during twin-screw extrusion was also determined. Fourier transform infrared spectroscopy confirmed the esterification reaction of the starch in the heated mixer. The modified starch underwent simultaneous gelatinization to yield a modified thermoplastic starch, concurrently with the reactive extrusion blending with poly(butylene adipate-co-terephthalate), resulting in a starch based blend with only one step extrusion. The effects of plasticizer content, starch modification conditions, and starch loading on the mechanical properties and melt flow index of the resulting blends were systematically investigated.
KEYWORDS Starch Citric acid Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) Biodegradable film Gelatinization	

NGHIÊN CỨU BIẾN TÍNH TINH BỘT SẴN ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG TRONG CHẾ TẠO MÀNG PHÂN HỦY SINH HỌC

Nguyễn Châu Giang*, Vũ Minh Đức

Trường Vật liệu - Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 03/6/2025 Ngày hoàn thiện: 14/11/2025 Ngày đăng: 17/11/2025	Polyme blend giữa poly(butylene adipate-co-terephthalate) và tinh bột sắn đã được chế tạo bằng một bước gia công nóng chảy duy nhất trên thiết bị đùn trục vít, thay vì một quy trình nhiều bước. Để làm giảm tính phân cực tự nhiên của tinh bột, tăng tính tương hợp với nhựa poly(butylene adipate-co-terephthalate), tinh bột sắn đã được biến tính với axit citric trong một thiết bị trộn tốc độ cao có gia nhiệt, trước khi đưa vào trộn hợp đồng thời với nhựa polyester này và glycerol trên máy đùn hai trục vít. Các điều kiện phản ứng biến tính tinh bột sắn trong máy trộn tốc độ cao bao gồm nhiệt độ (từ 80 °C đến 100 °C) và hàm lượng axit citric (từ 2% đến 3% khối lượng so với tinh bột) cũng như hàm lượng chất hóa dẻo glycerol cần thiết để gelatin hóa tinh bột sắn đã được khảo sát. Kết quả phân tích phổ hồng ngoại Fourier đã xác nhận phản ứng este hóa tinh bột trong máy trộn có gia nhiệt. Tinh bột biến tính được gelatin hóa tạo thành tinh bột nhiệt dẻo biến tính đồng thời với quá trình trộn hợp nóng chảy với poly(butylene adipate-co-terephthalate) trong một lần đùn phản ứng (<i>reactive extrusion</i>) duy nhất tạo thành blend của tinh bột. Ảnh hưởng của hàm lượng chất hóa dẻo, điều kiện phản ứng biến tính tinh bột cũng như hàm lượng tinh bột tới các độ bền cơ học và chỉ số chảy của blend đã được nghiên cứu khảo sát.
TỪ KHÓA Tinh bột Axit citric Poly(butylene adipate - co-terephthalate) (PBAT) Màng phân hủy sinh học Gelatin hóa	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12972>

* Corresponding author. Email: giang.nguyenchau@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Trước những thách thức môi trường nghiêm trọng, bao gồm ô nhiễm đất và đại dương, các vật liệu phân hủy sinh học đã trở thành một yêu cầu cấp thiết. Tinh bột và Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) nổi lên như những ứng cử viên hàng đầu cho việc phát triển màng bao bì thân thiện với môi trường. Tinh bột sắn là một polyme tự nhiên rất phong phú, đặc biệt là ở các nước nhiệt đới như Việt Nam, có giá thành thấp và có khả năng phân hủy sinh học hoàn toàn. PBAT, một copolyester phân hủy sinh học, được đánh giá cao về tính chất cơ học, đặc biệt là độ dẻo dai và khả năng gia công tương tự như polyetylen (PE). Tuy nhiên, cả hai vật liệu này đều có những hạn chế riêng khi sử dụng đơn lẻ. Tinh bột tự nhiên có tính chất cơ học rất kém (giòn), khả năng hút ẩm rất cao và có nhiệt độ nóng chảy gần với nhiệt độ phân hủy, do vậy hầu như không thể gia công nóng chảy như các loại nhựa nhiệt dẻo thông thường được [1]. Ngược lại, PBAT, mặc dù có nhiều ưu điểm nhưng lại có giá thành khá cao so với các loại nhựa nguồn gốc dầu mỏ truyền thống và có độ cứng thấp, khó đáp ứng được yêu cầu của nhiều ứng dụng như màng mỏng, vật dụng dùng một lần [2]. Việc pha trộn tinh bột với PBAT là một chiến lược hiệu quả để giảm giá thành và cải thiện các tính chất vật liệu, tạo ra một giải pháp cân bằng giữa hiệu suất và khả năng phân hủy sinh học. Tuy nhiên vấn đề không tương hợp do khác nhau quá lớn về độ phân cực, khả năng chảy của hai cấu tử này luôn là một thách thức lớn trong chế tạo blend PBAT/tinh bột.

Các nghiên cứu trong lĩnh vực thực phẩm đã cho thấy axit đa chức như citric (CA) có thể phản ứng với tinh bột thông qua phản ứng este hóa, dẫn đến sự hình thành liên kết ngang giữa các chuỗi tinh bột. Đồng thời, CA cũng có thể gây ra phản ứng thủy phân một phần tinh bột, làm giảm trọng lượng phân tử của nó. Ngoài ra, với cấu trúc đa chức (một nhóm hydroxyl và ba nhóm carboxyl), CA cùng với các hợp chất polyol có thể hoạt động như một chất hóa dẻo cho tinh bột tạo thành một vật liệu mang các đặc tính tương tự như các loại polyme nhiệt dẻo được gọi là tinh bột nhiệt dẻo este hóa (CTPS) [3] - [5]. Vật liệu này đã thu hút được sự quan tâm của các nhà khoa học do CA là một axit cacboxylic đa chức, phân tử chứa 3 nhóm COOH, do vậy đồng thời có khả năng tương tác hóa học với các nhóm chức OH ở cuối mạch phân tử PBAT, tạo ra một copolyme ghép PBAT-g-CTPS, từ đó cải thiện độ bám dính giữa hai pha PBAT và TPS trong blend [6], [7].

Mặc dù CA đã chứng minh có khả năng cải thiện tính tương hợp, tuy nhiên việc đạt được hình thái cấu trúc đồng nhất và tính chất tối ưu vẫn còn là một thách thức, đặc biệt ở hàm lượng tinh bột cao. Các nghiên cứu hiện có chủ yếu tập trung vào quy trình nhiều bước, trong đó tinh bột được biến tính và hóa dẻo riêng biệt trong thiết bị đun trực vít tạo thành TPS biến tính trước khi được blend với PBAT trên thiết bị đun trực vít một lần nữa [1], [7], [8]. Tác nhân biến tính tinh bột phổ biến nhất vẫn là maleic anhydride (MA), các cacboxylic axit đa chức ít được nghiên cứu hơn do có hoạt tính thấp hơn hẳn so với MA. Mặc dù quá trình đun phản ứng (reactive extrusion) nhiều bước đã chứng tỏ được hiệu quả trong việc chế tạo các loại blend nhựa polyester phân hủy sinh học với tinh bột [9], [10], tuy nhiên quy trình đun nhiều bước lặp lại như vậy sẽ gây tốn kém chi phí và thời gian. Mục tiêu của nghiên cứu này là sử dụng quy trình đun một lần để chế tạo blend PBAT và tinh bột, như vậy sẽ đơn giản hơn, rút ngắn được thời gian sản xuất, dẫn tới tiết kiệm chi phí hơn và sản phẩm sẽ mang tính cạnh tranh hơn. Đùn phản ứng một bước như vậy sẽ tích hợp các bước chế tạo tinh bột nhiệt dẻo biến tính và trộn hợp trực tiếp PBAT đồng thời trong một thiết bị đun hai trục vít. Để đạt được hiệu quả tối đa, tinh bột sẽ được trộn và biến tính với CA trong một máy trộn tốc độ cao có kết hợp gia nhiệt, trước khi đưa vào thiết bị đun hai trục vít. Do vậy cần hiểu rõ và xác định được các điều kiện phản ứng biến tính tinh bột như nhiệt độ phản ứng, tỷ lệ chất biến tính CA phù hợp để đạt được mức độ biến tính và tiếp đó là mức độ tương hợp tối ưu.

2. Phương pháp nghiên cứu

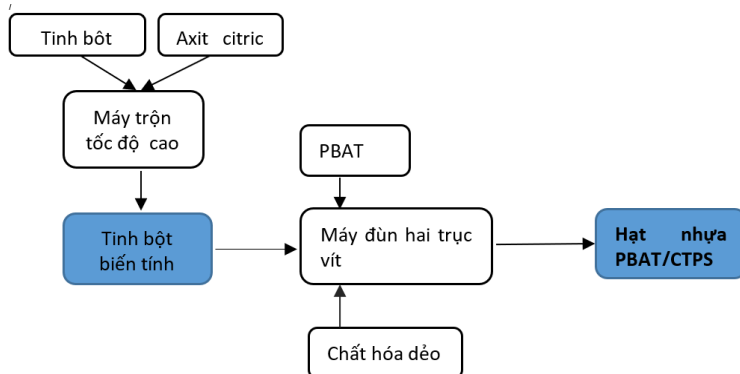
2.1. Nguyên liệu

Tinh bột sắn có độ ẩm 11-13%, độ tinh khiết 98% được cung cấp bởi Công ty cổ phần chế biến nông sản BHL Sơn La, Việt Nam. Nhựa PBAT có mã BG1070 (xuất xứ Hàn Quốc) có chỉ

số chảy (MFI) 2 – 5g/10 phút. Glycerol được sử dụng làm chất hóa dẻo tinh bột và axit citric được sử dụng làm chất biến tính tinh bột có xuất xứ Trung Quốc, đều có độ tinh khiết 99%.

2.2. Phương pháp chế tạo blend PBAT/CTPS

Blend PBAT/CTPS được chế tạo theo quy trình trên Hình 1. Tinh bột sắn và axit citric có hàm lượng 2; 2,5 và 3% khối lượng so với tinh bột được trộn đều bằng máy trộn (Hình 2) với tốc độ 300 vòng/phút trong 15 phút ở nhiệt độ trộn lần lượt là 80 °C, 90 °C và 100 °C. Hỗn hợp tinh bột biến tính, chất hóa dẻo PEG 4000 có hàm lượng 10% đến 20% khối lượng so với tinh bột và hạt nhựa PBAT sau đó được trộn hợp sơ bộ trước khi được đưa vào máy đùn hai trục vít Leistritz (Đức) có L/D = 36 với nhiệt độ từ vùng 1 (nạp liệu) đến vùng 10 (đầu hình) tương ứng là 120-140-160-180-180-180-180-160-150 °C và tốc độ của trục vít là 150 vòng/ phút. Sản phẩm thu được là blend PBAT và tinh bột nhiệt dẻo biến tính axit citric (PBAT/CTPS) được sấy ở 80 °C trong 4 giờ, sau đó được đùn thổi trên thiết bị thổi màng Labtech ở 170 °C. Chiều dày màng được kiểm soát trong khoảng 15 – 20 µm. Hàm lượng CTPS trong blend tăng dần từ 40 – 55% khối lượng.



Hình 1. Sơ đồ quá trình chế tạo blend PBAT/TPS



Hình 2. Cấu tạo buồng máy trộn tốc độ cao có gia nhiệt

2.3. Phương pháp quang phổ hồng ngoại FTIR

Các mẫu tinh bột được phân tích phổ hồng ngoại trên máy IRAffinity-1s của hãng Shimadzu (Nhật Bản) với dải sóng từ 400-4000 cm⁻¹. Mẫu tinh bột biến tính được rửa và lọc ly tâm với etanol trước khi phân tích FTIR.

2.4. Phương pháp xác định chỉ số chảy

Chỉ số chảy MFI (melt flow index) đặc trưng cho tính chất dòng chảy do nhiệt của polyme, tại nhiệt độ và áp suất nhất định. Chỉ số chảy của các loại blend PBAT/CTPS được đo trên máy Tinius Olsen (Hoa Kỳ). MFI (g/10 phút) được tính bằng khối lượng của nhựa chảy trong thời gian 10 phút ở 190 °C và tải trọng 2,16 kg. Các mẫu được sấy ở 80 °C trong 4 giờ trước khi đo.

2.5. Phương pháp xác định tính chất cơ học của màng mỏng PBAT/TPS

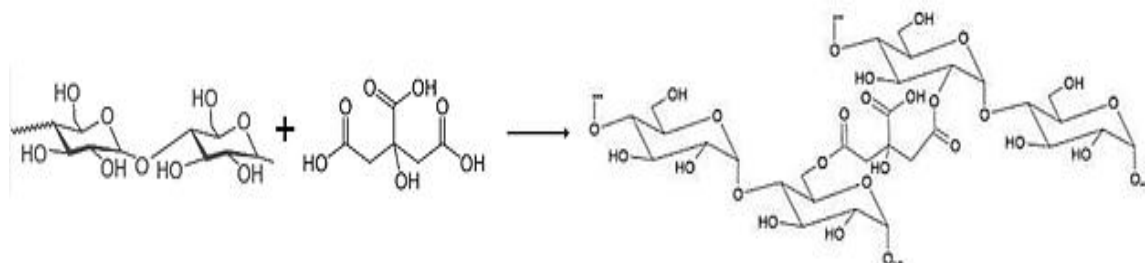
Màng mỏng thổi từ blend PBAT/CTPS được xác định tính chất kéo trên thiết bị đo kéo Lloyd 5kN theo tiêu chuẩn ISO-527. Mẫu đo có dạng hình mác chèo, tốc độ kéo 300 mm/phút. Mỗi mẫu thực hiện 10-15 phép đo, giá trị độ bền kéo thu được là kết quả trung bình của các phép đo.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Phổ FT-IR

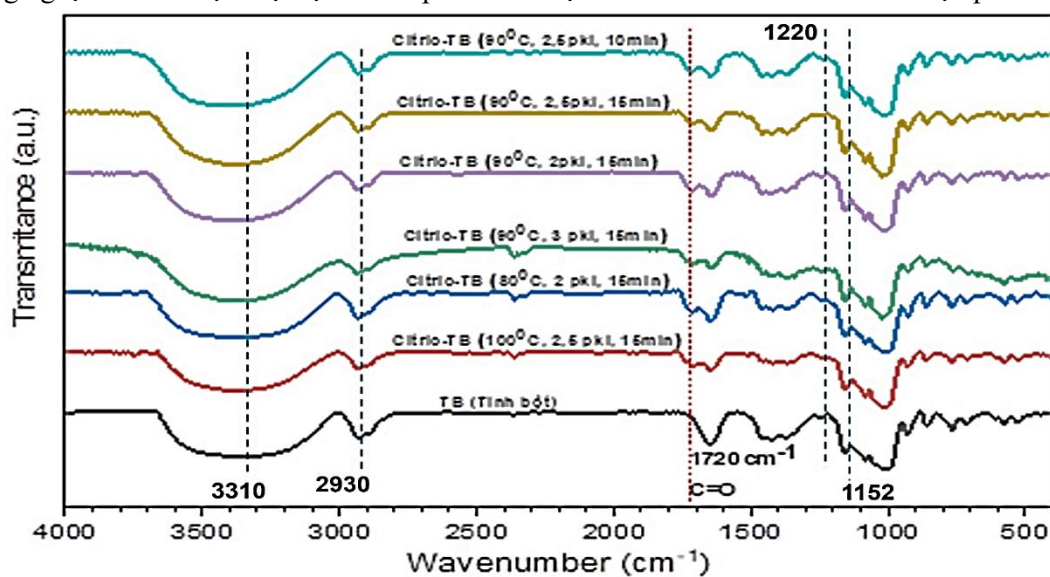
Axit citric là một axit hữu cơ đa chức, trong phân tử có ba nhóm carboxyl (-COOH). Trong điều kiện nhiệt độ cao, các nhóm carboxyl này có thể phản ứng với các nhóm hydroxyl (-OH) trên các phân tử tinh bột thông qua phản ứng este hóa. Sự hình thành các liên kết este này cũng

có thể tạo ra các liên kết chéo giữa các chuỗi tinh bột, như mô tả trên Hình 3. Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR) tinh bột chưa biến tính và tinh bột biến tính 2%, 2,5% và 3% axit citric ở 80 °C, 90 °C, 100 °C trong 10 đến 15 phút được trình bày trên Hình 4.



Hình 3. Phản ứng este hóa tinh bột bằng axit citric

Kết quả trên Hình 4 cho thấy, đối với cả tinh bột biến tính và tinh bột chưa biến tính phổ FTIR đều xuất hiện các pic đặc trưng của tinh bột. Pic rộng ở vị trí số sóng 3310 cm^{-1} tương ứng cho dao động kéo giãn của nhóm -OH, pic ở vị trí 2930 cm^{-1} tương ứng với dao động kéo giãn của liên kết C-H, pic ở 1220 cm^{-1} đặc trưng cho các liên kết C-O và pic 1152 cm^{-1} tương ứng với dao động kéo giãn bất đối xứng trong liên kết C-O-C. So sánh với phổ FT-IR của tinh bột chưa biến tính, phổ FTIR của tất cả các mẫu tinh bột biến tính axit citric đều xuất hiện một pic mới ở vị trí 1720 cm^{-1} đặc trưng cho nhóm cacbonyl (-C=O) được hình thành từ phản ứng este hóa giữa nhóm -COOH của axit citric và nhóm -OH của tinh bột. Như vậy, các kết quả thu được từ phổ hồng ngoại đã xác nhận việc tạo ra sản phẩm tinh bột este hóa ở hầu hết các điều kiện phản ứng.

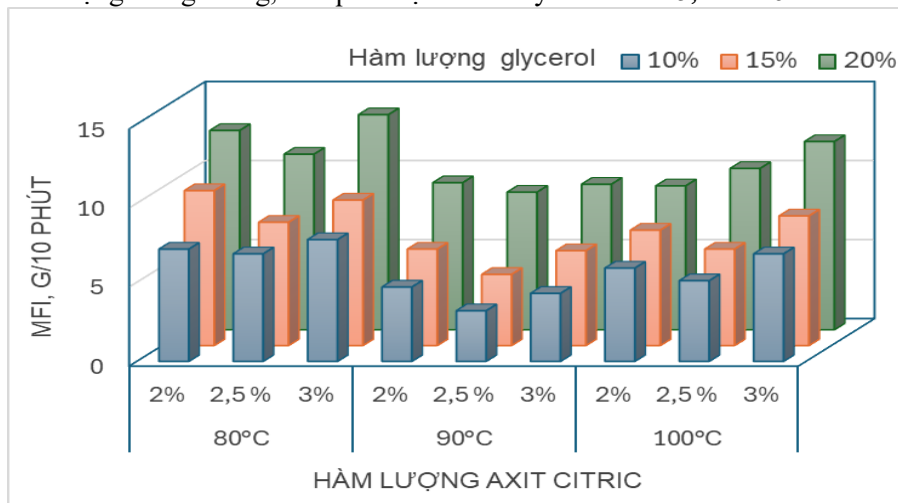


Hình 4. Phổ FT-IR của tinh bột sản và tinh bột sản biến tính với axit citric

3.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của các điều kiện phản ứng biến tính tinh bột tới tính chất của blend PBAT/CTPS

Tinh bột tự nhiên có cấu trúc hạt bán kết tinh chặt chẽ. Một số nghiên cứu trong lĩnh vực thực phẩm đã chỉ ra rằng các axit cacboxylic như axit citric có thể thâm nhập vào các hạt tinh bột, làm suy yếu các liên kết hydrogen nội phân tử và liên phân tử giữa các chuỗi amylose và amylopectin, đặc biệt khi có mặt nước và nhiệt độ [1], [4]. Điều này giúp phá vỡ trật tự cấu trúc tinh thể của tinh bột, do đó axit citric ngoài việc có khả năng tạo các liên kết este bền vững với tinh bột, làm giảm các nhóm OH trên bề mặt hạt tinh bột từ đó làm giảm tính ưa nước của tinh

bột, còn có tác dụng hóa dẻo tinh bột. Tất cả các yếu tố này đều có ảnh hưởng tới tính chất cơ học của pha tinh bột nhiệt dẻo biến tính (CTPS), khả năng tương hợp giữa hai pha CTPS và PBAT từ đó ảnh hưởng tới độ bền cơ học của vật liệu blend tạo thành. Do vậy đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của cả ba yếu tố bao gồm hàm lượng chất hóa dẻo glycerol, hàm lượng axit citric và nhiệt độ phản ứng biến tính tinh bột tới đặc tính nóng chảy và tính chất kéo của blend PBAT/CTPS ở dạng màng mỏng, kết quả được trình bày trên Hình 5, Hình 6 và Hình 7.

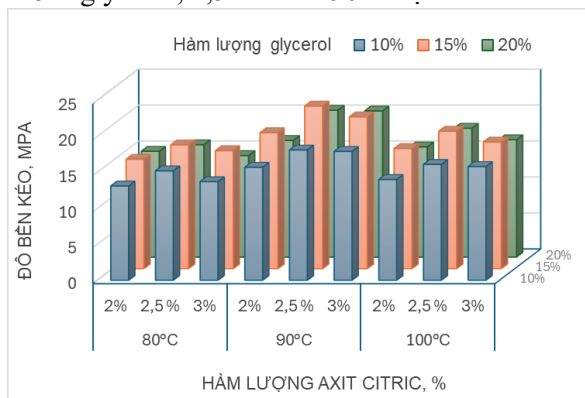


Hình 5. Ảnh hưởng của các điều kiện biến tính tinh bột tới giá trị MFI của blend PBAT/CTPS

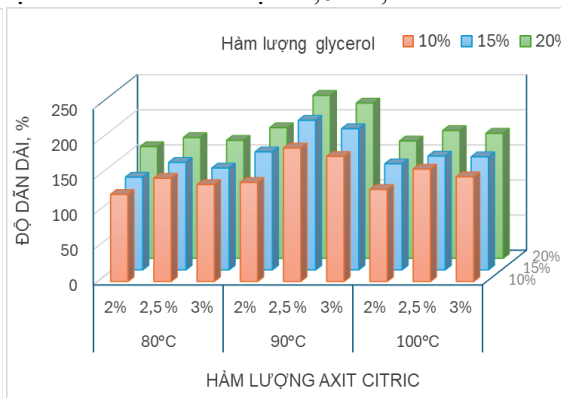
Từ Hình 5 nhận thấy chất hóa dẻo glycerol có ảnh hưởng mạnh mẽ nhất tới chỉ số MFI của blend, khi hàm lượng glycerol tăng từ 10 lên 20%, MFI của blend, ở tất cả các tỷ lệ axit citric và nhiệt độ phản ứng, đều tăng tương ứng lên khoảng 2 lần. Điều này có thể được giải thích do ở tỷ lệ hóa dẻo cao là 20% khối lượng, tinh bột nhiệt dẻo tạo thành có độ dẻo và khả năng chảy cao hơn hẳn, đặc biệt khi có mặt CA ở hàm lượng cao 3%. Sự thay đổi hàm lượng axit citric có ảnh hưởng không lớn tới MFI, tại các nhiệt độ biến tính và hàm lượng glycerol khác nhau thì chỉ số chảy đều đạt giá trị nhỏ nhất khi ở hàm lượng CA bằng 2,5%. Ngoài ra, chỉ số MFI cũng có xu hướng giảm dần khi tăng nhiệt độ biến tính tinh bột từ 80 °C lên 90 °C rồi sau đó tăng nhẹ khi biến tính tinh bột ở 100 °C. Chỉ số chảy đạt giá trị nhỏ nhất bằng $3,2 \pm 1,5$ g/10 phút với hàm lượng axit citric bằng 2,5% khi biến tính tinh bột ở 90 °C. Điều này có thể được giải thích do có sự cạnh tranh của các phản ứng hóa học có thể xảy ra cùng lúc trong quá trình biến tính tinh bột bằng axit citric ở nhiệt độ cao, đó là phản ứng este hóa, phản ứng khâu mạch phân tử và phản ứng thủy phân tinh bột. Ở nhiệt độ 90 °C, có thể đã có phản ứng khâu mạch tinh bột như trên Hình 3 thay vì chỉ có phản ứng este hóa ở các phân tử tinh bột riêng lẻ, làm cho phân tử tinh bột trở nên cồng kềnh hơn với khối lượng phân tử lớn hơn dẫn tới khả năng chảy của tinh bột nhiệt dẻo trở nên khó khăn hơn và do vậy chỉ số MFI giảm so với ở điều kiện phản ứng 80 °C. Ở nhiệt độ phản ứng cao 100 °C, phản ứng thủy phân một phần tinh bột bởi xúc tác axit citric có thể đã chiếm ưu thế hơn, dẫn tới giảm khối lượng phân tử của tinh bột, hình thành tinh bột nhiệt dẻo có độ nhớt thấp hơn, do vậy blend tương ứng có chỉ số MFI cao hơn. Đối với ứng dụng thổi màng, các polyme thường yêu cầu có giá trị MFI tương đối thấp, thường trong khoảng 0,2–7 g/10 phút để đảm bảo quá trình tạo màng ổn định và độ dày đồng đều [11]. Blend của các tinh bột biến tính ở 90 °C và hàm lượng hóa dẻo nằm trong khoảng 10 - 15% có các giá trị MFI nằm trong phạm vi này.

Từ Hình 6 có thể thấy rằng nhiệt độ phản ứng biến tính tinh bột có ảnh hưởng lớn nhất tới độ bền kéo của blend BPAT/CTPS và tại 90 °C độ bền kéo đạt giá trị cao nhất ở mọi hàm lượng chất hóa dẻo glycerol và axit citric. Hàm lượng glycerol từ 15% tới 20% sẽ tạo cho blend có độ bền kéo cao hơn rõ rệt so với hàm lượng 10%, điều này cho thấy tỷ lệ glycerol 10% chưa đủ để hóa dẻo tinh bột hoàn toàn nên chưa thể tạo thành một pha liên tục như nhiệt dẻo và do đó có độ bền

rất thấp dẫn tới độ bền của blend cũng giảm tương ứng. Ở các điều kiện nhiệt độ và hàm lượng hóa dẻo khảo sát hàm lượng 2,5% CA đều cho blend có giá trị độ bền kéo cao nhất. Ở điều kiện 15% glycerol, 2,5% CA ở 90 °C tạo ra blend có độ bền kéo cao nhất đạt $22,6 \pm 4,4$ MPa.



Hình 6. Ảnh hưởng của các điều kiện biến tính tinh bột tới độ bền kéo của blend PBAT/CTPS

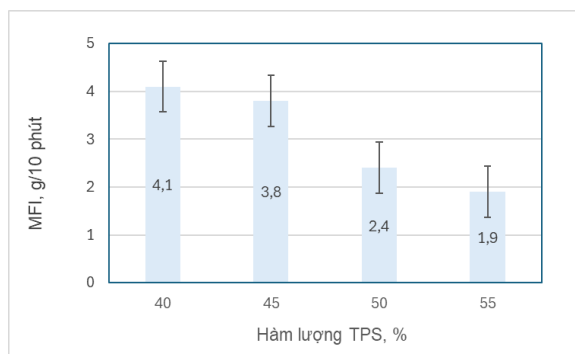


Hình 7. Ảnh hưởng của các điều kiện biến tính tinh bột tới độ giãn dài của blend PBAT/CTPS

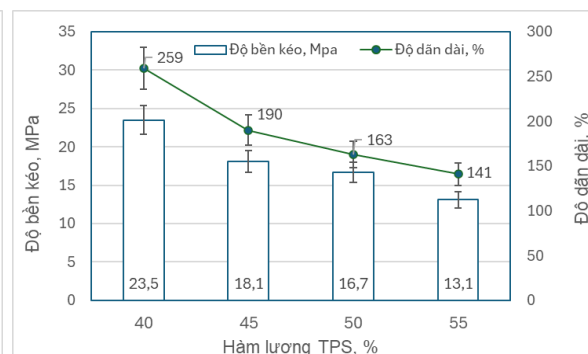
Kết quả trên Hình 7 cũng cho thấy một xu hướng tương tự. Với cùng một hàm lượng axit citric, khi tăng hàm lượng hóa dẻo thì độ giãn dài của blend PBAT/TPS có xu hướng tăng lên do pha TPS lúc này có độ dẻo lớn hơn. Nhiệt độ phản ứng biến tính tinh bột ở 90 °C cho blend có độ giãn dài lớn so với các điều kiện phản ứng còn lại. Độ giãn dài đạt giá trị cao nhất $232,5 \pm 11\%$ ở 90 °C với hàm lượng chất hóa dẻo là 20% và hàm lượng axit citric là 2,5%. Nhiệt độ biến tính tinh bột bằng 90 °C là điều kiện phản ứng phù hợp nhất khi tạo cho blend có cả độ bền kéo và độ giãn dài khi đứt cao nhất.

Từ các kết quả khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng CA, nhiệt độ biến tính, hàm lượng hóa dẻo đến tính chất của màng PBAT/TPS ở trên, nhận thấy: blend PBAT/TPS sử dụng tinh bột biến tính 2,5% axit citric ở 90 °C và 15% chất hóa dẻo, có độ bền tốt nhất và tính chất gia công phù hợp nhất với định hướng ứng dụng.

3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng tinh bột đến tính chất của màng PBAT/TPS



Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng tinh bột tới giá trị MFI của blend PBAT/CTPS



Hình 9. Ảnh hưởng của hàm lượng tinh bột tới tính chất kéo của blend PBAT/CTPS

Các nguồn nguyên liệu tái tạo như TPS được xem là yếu tố cốt yếu trong chiến lược phát triển vật liệu mới một cách bền vững. Do vậy, việc nâng cao hàm lượng tinh bột trong blend trong khi vẫn duy trì được độ bền vật liệu ở mức chấp nhận được sẽ rất có ý nghĩa thực tiễn. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng TPS đến tính chất của màng blend PBAT/TPS được thể hiện ở Hình 8 và 9. Các đồ thị trên Hình 8 và 9 cho thấy việc tăng hàm lượng TPS từ 40 lên 55% khối lượng trong blend đã làm giảm mạnh độ bền cũng như chỉ số MFI của vật liệu. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với thực tế là do TPS là một polyme thiên nhiên có độ bền cơ học thấp và khả năng

chảy kém hơn đáng kể so với các loại nhựa nhiệt dẻo nên hàm lượng tinh bột càng cao thì blend tương ứng sẽ có độ bền càng thấp. Ở hàm lượng 55% khối lượng TPS, blend có độ bền kéo và độ giãn dài đều rất thấp, tương ứng bằng $13,1 \pm 1,3$ MPa và $141 \pm 6,5\%$, khó có thể đáp ứng được các yêu cầu đối với các loại bao bì, túi xách. Do vậy, ở điều kiện hiện tại thì hàm lượng TPS trong blend PBAT/CTPS nên giới hạn ở 50% khối lượng.

4. Kết luận

Biến tính tinh bột bằng axit citric trong thiết bị trộn tốc độ cao có gia nhiệt có thể xem là phương pháp chuẩn bị nguyên liệu hiệu quả cho quy trình đùn một bước chế tạo blend PBAT/TPS. Phản ứng este hóa tinh bột bằng axit citric đã được chứng minh thông qua phổ FTIR. Đã nghiên cứu khảo sát và lựa chọn được các điều kiện phản ứng phù hợp để biến tính tinh bột cho ứng dụng chế tạo blend PBAT/TPS ở dạng màng: 2,5% khối lượng axit citric; nhiệt độ biến tính 90°C và 15% hàm lượng chất hóa dẻo glycerol.

Màng nhựa phân hủy sinh học trên cơ sở 60PBAT/40CTPS/15% glycerol cho tính chất tốt nhất với độ bền kéo đạt $23,5 \pm 3,5$ MPa, độ giãn dài đạt $258,9 \pm 5\%$ và chỉ số chảy đạt $4,1 \pm 1,2$ g/10 phút. Hàm lượng TPS trong blend nên giới hạn ở 50% để duy trì được các tính chất cơ học cần thiết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. Fatima, M. R. Khan, I. Ahmad, and M. B. Sadiq, "Recent advances in modified starch based biodegradable food packaging: A review," *Heliyon*, vol. 10, no. 6, 2024, Art. no. e27453.
- [2] X. He, Y. Jin, L. Tang, and R. Huang, "A Brief Review and Perspective on the Functional Biodegradable Films for Food Packaging," *Polymer Sci. Peer Rev. J.*, vol. 5, no. 2, 2023, Art. no. PSPRJ.000610.2023.
- [3] M. Zhang, H. Jia, B. Wang, C. Ma, F. He, Q. Fan, and W. Liu, "A Prospective Review on the Research Progress of Citric Acid Modified starch," *Foods*, vol. 12, no. 3, pp. 458-470, 2023.
- [4] A. M. Nafchi, M. Moradpour, M. Saeidi, and A. K. Alias, "Thermoplastic starches: Properties, challenges, and prospects," *Starch*, vol. 65, pp. 61-72, 2013.
- [5] M. R. Amin, F. Rahman, and M. A. Anannya, "Esterification of starch in search of a biodegradable," *Journal of Polymer Research*, vol. 27, pp. 3-16, 2020.
- [6] J. B. Olivato, C. M. O. Müller, G. M. Carvalho, F. Yamashita, and M. V. E. Grossmann, "Physical and structural characterisation of starch/polyester blends with tartaric acid," *Materials Science and Engineering C*, vol. 39, pp. 35-39, 2014.
- [7] P. S. Garcia, M. V. E. Grossmann, M. A. Shirai, M. M. Lazaretti, F. Yamashita, C. M. O. Muller, and S. Mali, "Improving action of citric acid as compatibiliser in starch/polyester blown films," *Industrial Crops and Products*, vol. 52, pp. 305-312, 2014.
- [8] M. Dammak, Y. Fourati, Q. Tarrés, M. D. Aguilar, P. Mutjé, and S. Boufi, "Blends of PBAT with plasticized starch for packaging applications: Mechanical properties, rheological behaviour and biodegradability," *Industrial Crops & Products*, vol. 144, 2020, Art. no.112061.
- [9] Y. Fourati, Q. Tarrés, P. Mutjé, and S. Boufi, "PBAT/thermoplastic starch blends: Effect of compatibilizers on the rheological, mechanical and morphological properties," *Carbohydrate Polymers*, vol. 199, pp. 51-57, 2018.
- [10] G. T. Torosian and P. E. A. M. Millan, "Chapter 6 - Physical properties, behavior, and testing of geotextiles," in *Geotextiles From Design to Applications*, Woodhead Publishing, 2016, pp. 105-113.
- [11] D. W. V. Krevelen and K. T. Nijenhuis, "Chapter 24 - Processing Properties," in *Properties of Polymers. Their correlation with Chemical Structure, Their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions*, Elsevier, 2009, pp. 799-818.