

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ THIẾT BỊ ĐO ĐỘ NHỚT DẪN CỦA POLYME

TS. Nguyễn Ngọc Minh^{1*}

¹Trường Đại học Thủy lợi

*Tác giả liên hệ: Nguyễn Ngọc Minh, ngminh@tlu.edu.vn

THÔNG TIN CHUNG

Ngày nhận bài: 19/05/2023

Ngày nhận bài sửa: 14/06/2023

Ngày duyệt đăng: 24/06/2023

TỪ KHÓA

Độ nhớt trượt;

Độ nhớt dẫn;

Máy đo độ nhớt dẫn;

PEO.

TÓM TẮT

Một thiết bị đo độ nhớt dẫn được thiết kế để đo độ nhớt dẫn của polyme dựa trên nguyên lý của máy đo lưu biến dẫn CaBER (capillary breakup extensional rheometer). Thiết kế sử dụng các chi tiết dễ tìm ngoài thị trường như cuộn hút đẩy tác động nhanh và kính hiển vi điện tử. Phần mềm ImageJ được sử dụng để thu thập dữ liệu của sự thay đổi của đường kính cầu chất lỏng từ một loạt các hình ảnh tuần tự chụp được bằng kính hiển vi điện tử. Trong nghiên cứu này chúng tôi đã sử dụng polyethylene oxide (PEO15) để đo thử nghiệm với thiết bị đo độ nhớt dẫn thiết kế. Kết quả cho thấy thiết bị đo độ nhớt dẫn thiết kế có thể mô tả định tính quá trình dẫn và ước lượng được độ nhớt dẫn của polyme.

ABSTRACT

A capillary breakup extensional rheometer (CaBER) is a device designed to measure the extensional viscosity of polymers based on the principles of a CaBER. The design incorporates readily available components such as a quick-acting push-pull coil and an electronic microscope. The ImageJ software is used to collect data on the changes in the diameter of a liquid droplet from a series of sequentially captured images obtained using the electronic microscope. In this study, the authors utilized polyethylene oxide (PEO15) as a test material for measurements with the designed extensional viscosity measuring device. The results demonstrated that the designed extensional viscosity measuring device could qualitatively describe the extensional process and estimate the extensional viscosity of the polymer.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Đặc tính lưu biến dẫn là một thành phần quan trọng của chất lỏng đàn hồi nhớt trong nhiều quy trình công nghiệp. Một số loại polyme cho thấy sự khác biệt về lưu biến trượt không nhiều nhưng lại cho thấy sự khác biệt lớn về lưu biến dẫn. Độ nhớt dẫn là một đặc tính nội tại và không thể đo được bằng các thiết bị đo lưu biến trượt như máy đo lưu biến trượt (Shear Rheometer) hoặc máy đo độ nhớt trượt (Shear Viscometer). So với các thiết bị đo độ nhớt trượt đã có từ lâu thì các thiết bị đo độ nhớt dẫn là tương đối mới và đắt tiền. Các loại máy đo lưu biến dẫn, chẳng hạn như CaBER (Capillary Breakup Extensional Rheometer), FiSER (Filament Stretching Extensional Rheometer), SLR (Spin Line Rheometer) và DoS (Dripping-onto-Substrate) (Thermo Fisher Scientific, 2003; Yesilata, Clasen and McKinley, 2006; Dealy and Wang, 2013; Dinic, Jimenez and Sharma, 2017) theo dõi sự thất lại của các sợi chất lỏng dẫn theo thời gian, từ đó sẽ tính toán được các thông số lưu biến dẫn như độ nhớt dẫn, thời gian phục hồi và tốc độ biến dạng (Anna and McKinley, 2001). Hiện nay, đã có rất nhiều công trình nghiên cứu về độ nhớt dẫn của các polyme thiên nhiên và các loại chất lỏng có tính đàn hồi nhớt và các công trình này đều khẳng định rằng độ nhớt dẫn lớn hơn rất nhiều lần độ nhớt trượt (Ferguson, Walters and Wolff, 1990; Chen and Lolivret, 2011; Chesterton *et al.*, 2011). Böni *et al.* (2016) đã sử dụng CaBER khi khảo sát độ nhớt dẫn của dịch nhầy tiết ra từ cá mút đá (hag fish) để giải thích cơ chế tự bảo vệ của loại cá này trước các loài cá lớn khác (Böni *et al.*, 2016). Anna (2000) và McKinley *et al.* (2008) đã sử dụng FiSER để xác định một cách định lượng ảnh hưởng của ứng suất trước (pre-shear) đối với hành vi dẫn của một loạt polystyrene. Kết quả cho thấy, độ nhớt dẫn

lớn hơn rất nhiều lần so với độ nhớt trượt của nó (Anna and McKinley, 2001). Độ nhớt dẫn của một số loại polyme như polyethylene oxide (PEO) và surfactant cũng được nghiên cứu vì sự ứng dụng rộng rãi của những loại polyme này trong công nghiệp (Lin *et al.*, 2000; Anna and McKinley, 2001). Hầu hết các nghiên cứu về lưu biến dẫn hiện nay đều sử dụng các máy đo lưu biến dẫn CaBER hoặc FiSER – đó là những thiết bị rất đắt tiền (hàng chục tỷ đồng). Tại Việt Nam, các nghiên cứu về độ nhớt dẫn của polyme vẫn chưa được phổ biến. Một trong những nguyên nhân là do không có các máy đo độ nhớt dẫn. Một số nghiên cứu của tác giả đã báo cáo về độ nhớt dẫn của dịch nhầy chiết xuất từ quả đậu bắp bằng thiết bị đo độ nhớt dẫn dạng CaBER (Minh, 2022b, 2022a). Ngoài ra, tác giả cũng đã báo cáo về độ nhớt dẫn của dịch mật (Minh *et al.*, 2019). Do dịch mật có tính đàn hồi nhớt khi vận chuyển trong ống mật độ nhớt dẫn của dịch mật xuất hiện dẫn tới xảy ra hiện tượng lắng cặn tại khu vực van Heister và tăng nguy cơ hình thành bùn mật và sỏi mật. Tuy nhiên, những nghiên cứu này được thực hiện với máy đo độ nhớt dẫn thương mại CaBER.

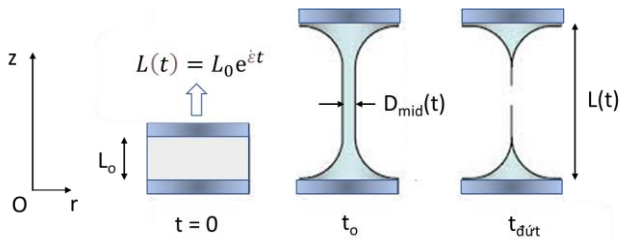
Qua quá trình nghiên cứu, tác giả nhận thấy việc xác định độ nhớt dẫn của polyme rất quan trọng trong nghiên cứu cũng như trong các ứng dụng công nghiệp, y tế và thực phẩm. Tuy nhiên, các thiết bị đo độ nhớt dẫn thương mại như CaBER hay FiSER rất đắt tiền nên việc tiếp cận với thiết bị này ở Việt Nam là rất khó. Xuất phát từ nhu cầu thực tế của thiết bị đo độ nhớt dẫn, trong nghiên cứu này, tác giả đã thiết kế chế tạo một thiết bị đo độ nhớt dẫn đơn giản nhưng có thể mô tả định tính được quá trình dẫn của polyme và ước lượng được độ nhớt dẫn của polyme với độ chính xác trong phạm vi chấp nhận được.

2. CÁC VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Vật liệu

Trong nghiên cứu này, dung dịch polyethylene oxide (PEO) (Sigma Aldrich, USA) có khối lượng phân tử 3.8×10^6 được chuẩn bị bằng cách thêm từ từ polyme vào nước khử ion (PEO15). Dung dịch được lắc rất nhẹ ở tốc độ 20 vòng trên phút trên máy lắc (MK161, Yamato Scientific) trong 2 ngày ở nhiệt độ phòng để đảm bảo rằng dung dịch đồng nhất và giảm thiểu sự đứt gãy chuỗi dưới ảnh hưởng của dòng khuấy có tốc độ cao. Để đo độ nhớt dẫn chúng tôi sử dụng PEO15 với nồng độ khối lượng là 1,0% và 2,5% do mẫu có nồng độ thấp thời gian kéo giãn không đủ để đo đường kính.

2.2. Phương pháp xác định độ nhớt dẫn



Hình 1. Mô hình bài toán

Đối với chất lỏng chịu lực dẫn một chiều, có thể xem xét một mẫu hình trụ có đường kính ban đầu D_0 và chiều dài L_0 , được kéo dài dọc theo hướng trục z bởi một lực tác dụng F , sao cho bán kính của nó giảm đều dọc theo chiều dài (hình 1). Đối với phần dòng chảy dẫn không chịu tác dụng của sự trượt, vận tốc dọc trục phải đồng đều trên mặt cắt ngang của cầu chất lỏng (dây tóc). Do đó, đối với chuyển động kéo dẫn một chiều với tốc độ dẫn không đổi $\dot{\epsilon}$, chúng ta có thể viết:

$$v_z = \dot{\epsilon} z \quad (1)$$

và, đối với chất lỏng không nén được:

$$v_r = \frac{1}{2} \dot{\epsilon} r \quad (2)$$

trong đó v_z là vận tốc dọc trục và v_r là vận tốc hướng tâm.

Đối với dòng chảy dẫn này, gradient vận tốc không đổi theo thời gian tại bất kỳ vị trí nào dọc theo chiều dài của cầu chất lỏng, đồng thời, một phần tử chất lỏng có tốc độ dẫn không đổi như được kéo dài. Do vậy, chiều dài tức thời của mẫu $L(t)$ bất cứ lúc nào t phải tăng theo thời gian theo phương trình sau:

$$L(t) = L_0 e^{\dot{\epsilon} t} \quad (3)$$

trong đó L_0 là chiều dài ban đầu của cầu chất lỏng. Đường kính của cầu chất lỏng $D_{mid}(t)$ giảm so với đường kính ban đầu D_0 theo công thức sau:

$$D(t) = D_0 e^{-\frac{\dot{\epsilon} t}{2}} \quad (4)$$

Độ nhớt dẫn η_E có thể được tính toán cho mỗi gia số thay đổi kích thước theo công thức:

$$\eta_E = \frac{-(2X-1)}{\frac{d(D_{mid}(t))}{dt}} \sigma \quad (5)$$

Trong đó X là một hệ số tính đến độ lệch trong hình dạng của cầu chất lỏng (Torres *et al.*, 2014), ở đây giá trị của $X = 0,7127$, $D_{mid}(t)$ là đường kính mặt cắt giữa của cầu chất lỏng hình thành giữa trụ trên và trụ dưới tại thời điểm t và σ là sức căng mặt ngoài của chất lỏng.

2.3. Đo sức căng mặt ngoài

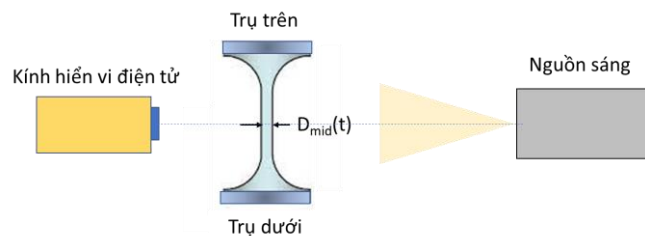
Sức căng mặt ngoài của dung dịch thí nghiệm được đo bằng máy đo sức căng mặt ngoài (Model CBVP-Z, Kyowa Interface Science) với độ chính xác 0,01 mN/m. Chúng tôi sử dụng phương pháp Wilhelmy để đo sức căng mặt ngoài tại nhiệt độ $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$. Tấm Wilhelmy được làm sạch bằng nước cất và nung bằng đèn cồn trước mỗi lần đo.

Sức căng mặt ngoài của dung dịch PEO15 nồng độ 1% và 2.5% lần lượt là 55 và 61 mN/m.

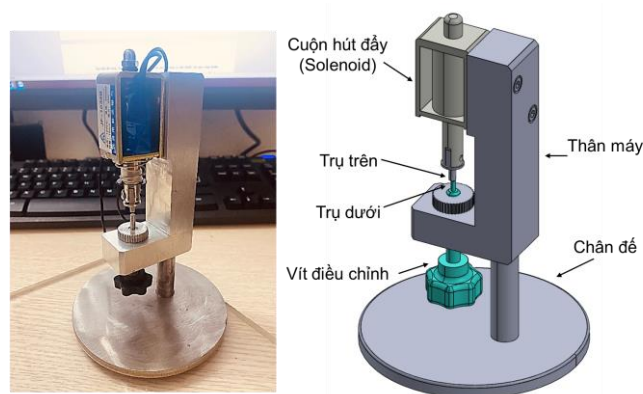
2.4. Thiết bị đo độ nhót dẫn

Thiết đo độ nhót dẫn được thiết kế bao gồm một cuộn điện từ (Loại: JF-0530B, Điện áp định mức: DC 6V, Dòng điện định mức: 300mA, Lực/hành trình: 5N/10mm) để dẫn động phần trụ trên với đường kính $3 \pm 0,01$ mm. Trụ dưới có đường kính $3 \pm 0,01$ mm một phần có ren và có núm vặn để có thể điều chỉnh khe hở ban đầu giữa hai trụ. Cuộn điện từ và vít điều chỉnh được lắp trên một giá đỡ bằng nhôm. Kết cấu của thiết bị như mô tả trong hình 2 và bảng 1. Thiết bị đo độ nhót dẫn hoạt động dựa trên nguyên tắc đo độ mỏng của sợi chất lỏng bị kéo dẫn hình thành giữa trụ trên và trụ dưới theo thời gian. Mẫu thí nghiệm ban đầu được đặt giữa hai bề mặt trụ kim loại, sau đó trụ kim loại được điều chỉnh nhanh chóng dịch chuyển ra xa nhau một khoảng xác định (10 mm) với tốc độ khoảng 0,2 mm/s rồi dừng lại (thời điểm đó được coi là thời điểm bắt đầu của thử nghiệm). Lúc đó, giữa hai trụ trên và dưới hình thành một cầu chất lỏng (Hình 3). Trong các thiết bị đo độ nhót dẫn thương mại như CaBER hay FiSER thì đường kính cầu chất lỏng $D_{mid}(t)$ được xác định bằng một trắc vi kế quang học (Laser Micrometer). Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, sự phát triển của cầu chất lỏng hình thành giữa hai trụ trên và dưới được ghi lại bằng kính hiển vi điện tử Dino-Lite 5MP (AnMo Electronics Corp., Taiwan) có độ phân giải đầy đủ là 5.0 Mpixels với độ phân giải hình ảnh 2560×1920 ở tốc độ 45 khung hình/giây. Các phép đo được thực hiện ở nhiệt độ phòng (25 ± 1 °C). Sau khi thu được các ảnh liên tiếp về quá trình phát triển của cầu chất lỏng, các ảnh liên tiếp này được xử lý bằng phần mềm ImageJ để thu được dữ liệu thay đổi của đường kính cầu chất lỏng theo thời gian. Tất cả các thí nghiệm đo đường kính của cầu chất lỏng đều được đo ba lần để đảm bảo độ

ổn định của số liệu. Từ thông số đường kính của cầu chất lỏng thu được, độ nhót dẫn có thể được ước lượng theo công thức (5).



(a)



(b)

Hình 2. Thiết bị đo độ nhót dẫn. (a) bố trí kính hiển vi điện tử, (b) thiết bị đo độ nhót dẫn

Bảng 1. Thông kê vật tư chế tạo

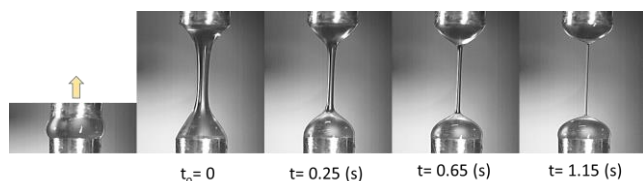
Loại vật tư	Vật liệu	Giá thành (VNĐ)
Thân máy	Nhôm	3.000.000
Cuộn hút dây	JF-0530B	500.000
Nguồn	MAISHENG 60V5A	1.800.000
Kính hiển vi	Dino-Lite 5MP	23.000.000
Vật tư phụ		500.000
Tổng		28.800.000

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phương pháp đo bằng máy đo độ nhót dẫn

Chất lỏng thử nghiệm được đặt cẩn thận vào khe hở ban đầu giữa trụ trên và trụ dưới bằng một xi lanh tiêm loại 25G (Temuro. Corp). Tiếp theo kính hiển vi điện tử được kích hoạt đồng thời với

cuộn điện từ để ghi lại diễn tiến quá trình dẫn của mẫu polyme. Quá trình kéo dẫn polyme được quay và ghi lại dưới định dạng video hoặc các ảnh tuần tự.



Hình 3. Quá trình giảm kích thước của cầu chất lỏng đối với dung dịch PEO15 2.5%

Hình 3 thể hiện quá trình giảm kích thước của cầu chất lỏng đối với dung dịch PEO15 nồng độ 2.5%. Quá trình giảm kích thước đường kính của cầu chất lỏng có thể được chia thành bốn giai đoạn. Giai đoạn đầu tiên là giai đoạn chịu ảnh hưởng của trọng lực nên chất lỏng như bị tụt xuống. Giai đoạn thứ hai là giai đoạn hình thành sự cân bằng giữa áp suất mao quản và ứng suất nhớt. Trong giai đoạn thứ ba, mẫu thí nghiệm vẫn ở trạng thái cân bằng giữa áp suất mao quản và ứng suất nhớt và trong giai đoạn này bắt đầu có sự tách rời cao hơn của các chuỗi polyme. Cuối cùng, giai đoạn thứ tư được đặc trưng bởi sự cân bằng đàn hồi - mao dẫn giữa sức căng bề mặt và ứng suất đàn hồi của các chuỗi polyme bị kéo căng. Trong hình 3, dung dịch chùng xuống dưới tác dụng của trọng lực sau khi các trụ tách ra và đạt đến một khoảng cách nhất định. Khi đó, sự cân bằng giữa áp suất mao dẫn và ứng suất nhớt đạt được, lúc đó đường kính của cầu chất lỏng sẽ giảm từ từ. Kết quả trên cho thấy, thiết bị đo độ nhớt dẫn thiết kế có thể mô tả được định tính quá trình dẫn của polyme dưới tác dụng của lực kéo dẫn.

3.2. Xử lý hình ảnh

Độ phân giải của hình ảnh chụp được khi sử dụng kính hiển vi điện tử là khoảng 7 μm mỗi pixel trong khi đường kính cầu chất lỏng thay đổi từ 145 pixel đến 3 pixel tại thời điểm bắt đầu và

khi cầu chất lỏng bị đứt. Điều chỉnh ngưỡng sáng “Threshold” để chuyển hình ảnh thành trắng đen với độ tương phản cao từ đó có thể đưa ra một đồ thị của đường kính cầu chất lỏng theo thời gian. Do vậy cần phải phát hiện biên của cầu chất lỏng để theo dõi sự thay đổi hình dạng của nó. Dưới đây là một số bước nhằm xác định được sự thay đổi đường kính cầu chất lỏng bằng phần mềm xử lý ảnh ImageJ:

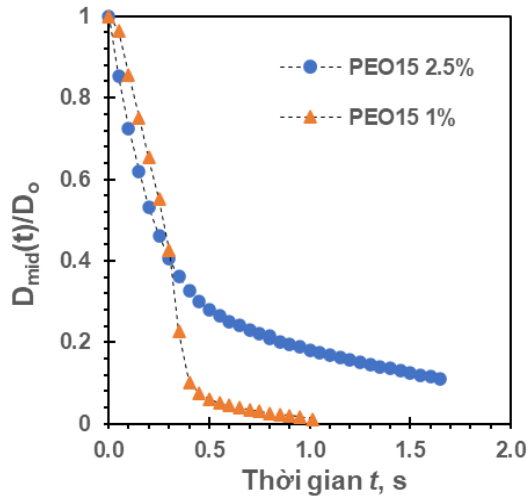
- (1). Làm sắc nét hình ảnh với bán kính pixel là 2 để làm nổi bật các đường biên,
- (2). Chuyển đổi hình ảnh sang thang màu xám 8 bit,
- (3). Điều chỉnh độ tương phản bằng công cụ “gamma correction” để tăng cường thang màu xám nhằm đảm bảo rằng màu xám sáng hơn và giảm sự thay đổi tỷ lệ khi cầu chất lỏng tiếp tục giảm kích thước,
- (4). Phát hiện biên bằng thuật toán phát hiện cạnh Canny (Canny detection algorithm) với phạm vi pixel được chỉ định thay đổi từ 2 đến 5.
- (5). Vị trí của biên xác định đường kính cầu chất lỏng và cường độ thang màu xám dọc theo mặt cắt giữa của cầu chất lỏng.

3.3. Đo độ nhớt dẫn của polyethylene oxide (PEO15) bằng thiết bị đo độ nhớt dẫn chế tạo

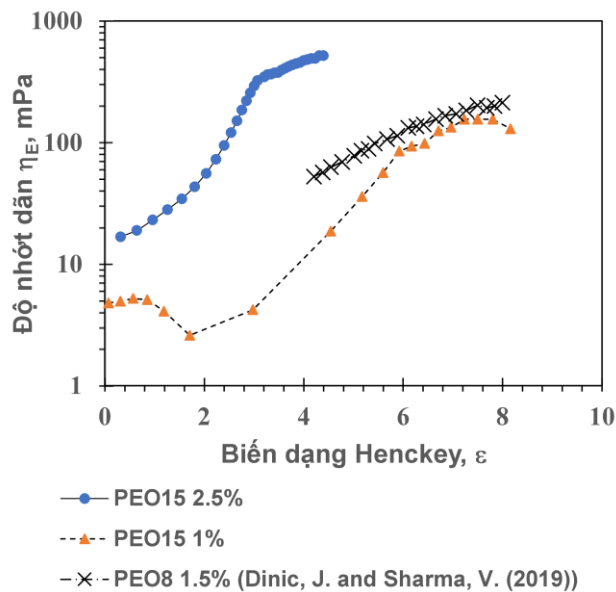
3.3.1. Thời gian dẫn

Hình 4 biểu diễn sự thay đổi của đường kính không thứ nguyên của cầu chất lỏng theo thời gian. Ở đây “đường kính không thứ nguyên” là tỷ lệ của đường kính của sợi chất lỏng tại thời điểm t so với đường kính ban đầu của nó. Độ nhớt dẫn lớn hơn được mong đợi để tạo ra các sợi có thể tồn tại trong một khoảng thời gian dài hơn trước khi kết cấu sợi bị phá vỡ. Có thể thấy, ở nồng độ cao cầu chất lỏng sẽ tồn tại lâu hơn. Hơn nữa, tốc độ giảm đường kính của cầu chất lỏng cũng phụ thuộc vào sức căng mặt ngoài của dung dịch.

Hình 4 cũng cho thấy với dung dịch polyme có nồng độ thấp (PEO15 1%) thì độ dốc của đường cong lớn hơn hay tốc độ giảm đường kính nhanh hơn và thời gian tồn tại cũng ngắn hơn dung dịch polyme có nồng độ cao (PEO15 2.5%).



Hình 4. Sự thay đổi của đường kính không thứ nguyên của cầu chất lỏng theo thời gian



Hình 5. Độ nhớt dẫn của PEO15 với các nồng độ khác nhau

3.3.2. Độ nhớt dẫn

Sau khi xác định được sự thay đổi đường kính của cầu chất lỏng theo thời gian như ở phần trên chúng ta có thể tính toán được độ nhớt dẫn theo công thức (1). Độ nhớt dẫn của PEO được thể hiện trong hình 5 như là hàm số của biến dạng Hencky:

$$\varepsilon = 2 \ln \left(\frac{D_c}{D_{mid}(t)} \right) \quad (6)$$

Hình 5 cho thấy dung dịch PEO15 thể hiện độ nhớt dẫn rất cao (lớn hơn 600 Pa.s), trong khi đó độ lớn trượt lớn nhất chưa đến 3 Pa.s (Minh *et al.*, 2019). Khi biến dạng Hencky tăng thì độ nhớt dẫn cũng tăng lên. Độ nhớt dẫn đo được bằng thiết bị chúng tôi thiết kế cũng được so sánh với độ nhớt dẫn của PEO8 (có khối lượng phân tử 2×10^6 g/mol) được Dinic và Sharma đo bằng máy DoS (Dinic and Sharma, 2019). Kết quả cho thấy có sự phù hợp tương đối giữa kết quả đo bằng thiết bị đo thương mại và sản phẩm thiết kế của chúng tôi. Tuy nhiên, do hạn chế về vật tư tiêu hao nên trong nghiên cứu này chúng tôi không có được những hóa chất tương đồng để so sánh cụ thể với các nghiên cứu khác. Trong những nghiên cứu tới chúng tôi sẽ tập trung vào hiệu chỉnh để thiết bị đạt được độ chính xác phù hợp.

Như vậy với thiết bị chế tạo trong nghiên cứu này hoàn toàn có thể mô tả một cách định tính quá trình dẫn của polyme và ước lượng được độ nhớt dẫn của polyme. Việc sử dụng các vật tư sẵn có và không đắt tiền là hoàn toàn khả thi trong điều kiện ở nước ta.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày thiết kế và thử nghiệm một thiết bị đo độ nhớt dẫn có kết cấu đơn giản, thiết bị này có thể dễ dàng xây dựng từ các vật tư dễ tìm ngoài thị trường. Kết quả nghiên cứu và thử nghiệm cho thấy thiết bị đã có thể mô

tả một cách định tính quá trình dẫn cũng như ước lượng được độ nhớt dẫn của polyme. Bài báo cũng tiến hành đo thử nghiệm với dung dịch polyethylene oxide PEO15 với nồng độ 1% và 2.5%. Bằng thiết bị chế tạo, tác giả đã đo được độ nhớt dẫn của PEO15, khi nồng độ polyme tăng lên độ nhớt dẫn cũng tăng lên đáng kể. Rõ ràng, thiết bị chế tạo được có thể phục vụ cho các ứng dụng cần đo độ nhớt dẫn và phù hợp với điều kiện Việt Nam hiện nay.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Anna, S. L. and McKinley, G. H. (2001) 'Elasto-capillary thinning and breakup of model elastic liquids', *Journal of Rheology*, 45(1), pp. 115–138. doi: 10.1122/1.1332389.
- Böni, L. et al. (2016) 'Hagfish slime and mucin flow properties and their implications for defense', *Nature Publishing Group*, (June), pp. 1–8. doi: 10.1038/srep30371.
- Chen, J. and Lolivret, L. (2011) 'The determining role of bolus rheology in triggering a swallowing', *Food Hydrocolloids*, 25(3), pp. 325–332. doi: 10.1016/j.foodhyd.2010.06.010.
- Chesterton, A. K. S. et al. (2011) 'Rheological characterisation of cake batters generated by planetary mixing: Elastic versus viscous effects', *Journal of Food Engineering*, 105(2), pp. 332–342. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.02.043.
- Dealy, J. M. and Wang, J. (2013) *Melt Rheology and its Applications in the Plastics Industry*. Edited by B. Derby. London: Springer Dordrecht Heidelberg New York London. doi: 10.1007/978-94-007-6395-1.
- Dinic, J., Jimenez, L. N. and Sharma, V. (2017) 'Pinch-off dynamics and dripping-onto-substrate (DoS) rheometry of complex fluids', *Lab Chip*, 17(3), pp. 460–473. doi: 10.1039/C6LC01155A.
- Dinic, J. and Sharma, V. (2019) 'Macromolecular relaxation, strain, and extensibility determine elastocapillary thinning and extensional viscosity of polymer solutions', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(18), pp. 8766–8774. doi: 10.1073/pnas.1820277116.
- Ferguson, J., Walters, K. and Wolff, C. (1990) 'Shear and extensional flow of polyacrylamide solutions', *Rheologica Acta*, pp. 571–579. doi: 10.1007/BF01329303.
- Lin, Z. et al. (2000) 'Unusual effects of counterion to surfactant concentration ratio on viscoelasticity of a cationic surfactant drag reducer', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 93(2–3), pp. 363–373. doi: 10.1016/S0377-0257(00)00112-9.
- Minh, N. N. et al. (2019) 'Tensile Behavior and Extensional Viscosity of Bile', *Journal of Biorheology*, 1, pp. 1–16. doi: 10.3233/BIR-190216.
- Minh, N. N. (2022a) 'Investigation and prediction the extensional viscosity of okra mucilage using Giesekus model', *Biorheology*, 59, p. 14. doi: DOI: 10.3233/BIR-220006.
- Minh, N. N. (2022b) 'Nghiên cứu đặc tính độ nhớt của dịch nhầy chiết xuất từ quả đậu bắp', *Tạp chí KHHT Thủy lợi và Môi trường*, 78(3), p. 7.
- Thermo Fisher Scientific (2003) 'Instruction Manual HAAKE CaBER 1', Control.
- Torres, M. D. et al. (2014) 'Natural Giesekus fluids: Shear and extensional behavior of food gum solutions in the semidilute regime', *AIChE Journal*, 60(11), pp. 3902–3915. doi: 10.1002/aic.14611.
- Yesilata, B., Clasen, C. and McKinley, G. H. (2006) 'Nonlinear shear and extensional flow dynamics of wormlike surfactant solutions', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 133(2–3), pp. 73–90. doi: 10.1016/j.jnnfm.2005.10.009.