



Original Article

Synthesis of Methyl Ester from Waste Cooking Oil Toward Application in Transformer's Insulating Liquid

Nguyen Van Dung*, Nguyen Thi Xuan Thi, Le Vinh Truong

Can Tho University, 3/2 Can Tho, Vietnam

Received 15 September 2022

Revised 11 January 2023; Accepted 21 March 2023

Abstract: This study evaluated the feasibility of using methyl ester prepared from waste cooking oil for electrical insulation in distribution transformers. Methyl ester is produced by a transesterification reaction between waste cooking oil and methanol using sodium hydroxide as a catalyst. The physicochemical parameters and breakdown voltage of the methyl ester were determined. The effects of aging on the breakdown voltage, viscosity, and acid value of methyl ester were also investigated. In addition, the breakdown voltage of Kraft paper impregnated with methyl ester was determined. Experimental results showed that methyl ester from waste cooking oil had low viscosity (5.17 cSt) and high breakdown voltage (40.3 kV). Other parameters also meet ASTM D6871 except for the pour and flash points. Aging insignificantly affected the breakdown voltage of the methyl ester. After aging, the breakdown voltage of the methyl ester increased to 42.1 kV. However, the viscosity of the methyl ester also increased by 23.5% and the acid value increased by 79.2 times. Finally, the breakdown voltage of Kraft paper impregnated with the methyl ester was about 5-10% lower than that of paper impregnated with the mineral oil.

Keywords: Methyl ester, waste cooking oil, insulating liquid, transformers.

* Corresponding author.

E-mail address: nvdung@ctu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5496>

Tổng hợp methyl ester từ dầu ăn phế thải hướng tới ứng dụng làm chất lỏng cách điện máy biến áp

Nguyễn Văn Dũng*, Nguyễn Thị Xuân Thi, Lê Vĩnh Trường

Trường Đại học Cần Thơ, 3/2 Cần Thơ, Việt Nam

Nhận ngày 15 tháng 9 năm 2022

Chỉnh sửa ngày 11 tháng 01 năm 2023; Chấp nhận đăng ngày 21 tháng 03 năm 2023

Tóm tắt: Nghiên cứu này đã đánh giá tính khả thi của việc sử dụng methyl ester được điều chế từ dầu ăn phế thải để cách điện trong máy biến áp phân phối. Methyl ester được sản xuất bằng phản ứng transesterification giữa dầu ăn phế thải và methanol với chất xúc tác là sodium hydroxide. Các thông số hóa lý và điện áp đánh thủng của methyl ester đã được xác định. Ảnh hưởng của sự lão hóa đến điện áp đánh thủng, độ nhớt và trị số acid của methyl ester cũng đã được khảo sát. Ngoài ra, điện áp đánh thủng của giấy Kraft được tẩm methyl ester cũng được xác định. Kết quả thí nghiệm cho thấy methyl ester từ dầu ăn phế thải có độ nhớt thấp (5,17 cSt) và điện áp đánh thủng khá cao (40,3 kV). Các thông số khác cũng đáp ứng tiêu chuẩn ASTM D6871 ngoại trừ điểm đông đặc và điểm chớp cháy. Sự lão hóa không ảnh hưởng đáng kể đến điện áp đánh thủng của methyl ester. Sau khi lão hóa, điện áp đánh thủng của methyl ester tăng nhẹ đến 42,1 kV. Tuy nhiên, độ nhớt của methyl ester đã tăng 23,5% và trị số acid tăng đến 79,2 lần. Cuối cùng, điện áp đánh thủng của giấy Kraft tẩm methyl ester thấp hơn khoảng 5÷10% so với trường hợp giấy được tẩm dầu khoáng.

Từ khóa: Methyl ester, dầu ăn phế thải, chất lỏng cách điện, máy biến áp.

1. Mở đầu

Dầu cách điện được điều chế trực tiếp từ dầu thực vật, chẳng hạn như dầu hướng dương, dầu đậu nành và dầu hạt cải, để thay thế dầu cách điện gốc khoáng đã được ứng dụng thành công trong máy biến áp phân phối và ngày càng trở nên phổ biến [1]. Tuy nhiên, độ nhớt cao và giá thành đắt hơn so với dầu gốc khoáng là hai trong số các nhược điểm của loại dầu cách điện này [1]. Do đó, đã có một số nghiên cứu về một loại chất lỏng cách điện sinh học khác có độ nhớt cũng như giá thành thấp hơn so với dầu thực vật [2-4]. Chất lỏng cách điện đó là methyl ester được sản xuất từ dầu ăn phế thải. Tại các cơ sở lớn, dầu ăn phế thải được thu gom với giá thành thấp để tái chế thành nhiên liệu sinh học trong khi tại các hộ gia đình, dầu ăn phế thải

hầu như không được thu gom và tái chế nên phải bỏ đi. Do đó, việc nghiên cứu dầu cách điện từ nguyên liệu dầu ăn phế thải có ý nghĩa cả về mặt môi trường và kinh tế cũng như về mặt khoa học. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng methyl ester có độ nhớt rất thấp so với dầu thực vật nên sẽ tăng hiệu quả trao đổi nhiệt của máy biến áp cũng như nâng cao khả năng thâm thấu vào giấy cách điện làm tăng độ bền điện của giấy [2-4]. Ngoài ra, các thông số hóa lý khác của methyl ester đều đạt tiêu chuẩn qui định ngoại trừ điểm đông đặc và điểm chớp cháy [2, 3]. Trong quá trình vận hành máy biến áp, dầu cách điện sẽ chịu tác động của nhiệt độ cao có thể đến 80÷100 °C trong thời gian dài. Do đó, dầu cách điện được điều chế từ dầu thực vật đã bị lão hóa biểu hiện thông qua sự gia tăng độ nhớt và trị số acid [5-7]. Tuy nhiên, sự gia tăng trị số acid không làm giảm điện áp đánh thủng của dầu thực vật [5, 8]. Do đó, ảnh hưởng của sự lão hóa đến điện áp đánh thủng, độ nhớt và trị số acid của methyl ester cần phải

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: nvdung@ctu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5496>

được khảo sát. Tuy nhiên, nội dung nghiên cứu này chưa được thực hiện. Ngoài ra, giấy Kraft đã và đang được sử dụng kết hợp với dầu để cách điện cho máy biến áp nhưng điện áp đánh thủng của giấy cách điện Kraft tẩm methyl ester cũng chưa được đề cập đến. Chính vì vậy, nghiên cứu này sẽ đánh giá tác động của sự lão hóa đến methyl ester được sản xuất từ nguồn dầu ăn phế thải trong nước bên cạnh việc khảo sát điện áp đánh thủng của giấy Kraft tẩm methyl ester.

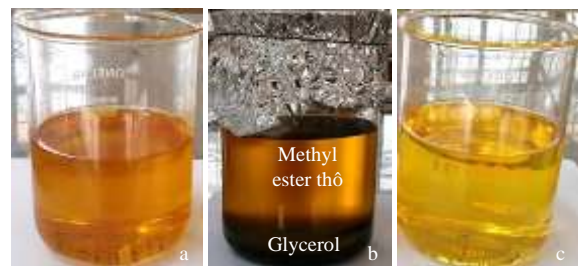
2. Thực nghiệm

2.1. Mẫu thí nghiệm

Dầu ăn phế thải được thu gom từ các hộ kinh doanh ăn uống trên địa bàn quận Ninh Kiều, thành phố Cần Thơ. Vì lý do kinh tế nên các hộ kinh doanh ăn uống chủ yếu sử dụng dầu ăn chứa thành phần chính là dầu cọ có giá thành thấp. Do đó, dầu ăn phế thải cũng chứa thành phần chính là dầu cọ. Methyl ester được điều chế theo qui trình đã được trình bày tại một nghiên cứu trước đây như sau [2]. Đầu tiên 1000 mL dầu ăn phế thải được lọc bỏ cặn và gia nhiệt đến 85 °C trong vòng 24 h trong lò chân không (10 mbar) để giảm hàm lượng nước và sau đó được để nguội tự nhiên trong môi trường chân không về 60 °C. Hàm lượng nước trong mẫu dầu ăn phế thải trước và sau khi sấy lần lượt là 500 mg/kg và 98,7 mg/kg. Đồng thời, cho 7,5 g NaOH vào trong cốc thủy tinh chứa 250 mL methanol tại 60 °C. Hỗn hợp NaOH và methanol được rót vào cốc thủy tinh chứa 1000 mL dầu ăn phế thải đã sấy khô ở trên và sau đó hỗn hợp được khuấy trộn bằng máy khuấy từ với tốc độ 500 v/p trong vòng 5 phút. Sau đó, cốc được bịt kín bằng màng nhôm và được ủ trong lò sấy ở nhiệt độ 60 °C trong vòng 24 h để phản ứng transesterification xảy ra hoàn toàn. Sau 24 h thu được methyl ester và glycerol như Hình 1. Sơ bộ, xác định được thể tích methyl ester thu được bằng khoảng 85,6% so với thể tích dầu ăn phế thải ban đầu. Glycerol được tách riêng bằng phễu chiết. Phần methyl ester thô còn lại được rửa bằng nước cất để loại bỏ glycerol, methanol và NaOH còn dư cũng như sắp hình thành. Sau đó methyl ester tinh chế

được sấy khô tại 85 °C trong vòng 24 h dưới điều kiện chân không (10 mbar) để loại bỏ nước và khí hòa tan. Methyl ester tinh chế sau sấy khô được sử dụng để xác định các thông số hóa lý và làm mẫu thí nghiệm. Mặc dù thí nghiệm với thời gian khuấy thay đổi lần lượt là 5 phút, 60 phút và 120 phút không được trình bày ở đây nhưng kết quả đã cho thấy giá trị của độ nhớt, điểm chớp cháy và điểm đông đặc của methyl ester thu được từ các mốc thời gian khuấy khác nhau không có sự khác biệt đáng kể. Điều này khẳng định thời gian khuấy mẫu là 5 phút tại tốc độ 500 v/p là phù hợp và mẫu sau đó được ủ tại 60 °C trong vòng 24 h là đủ dài để phản ứng transesterification xảy ra gần như hoàn toàn.

Giấy Kraft được sản xuất từ Trung Quốc có chiều dày 0,1 mm được sử dụng làm mẫu thí nghiệm. Khối lượng riêng của giấy được xác định là 1,1 g/cm³. Mẫu giấy cách điện được cắt thành miếng có hình vuông với mỗi cạnh có độ dài là 100 mm. Trước khi thí nghiệm phóng điện đánh thủng, các mẫu giấy cách điện được sấy khô trong chân không (10 mbar) ở 115 °C trong vòng 16 h theo tiêu chuẩn ASTM D2413-99 và sau đó được làm nguội đến nhiệt độ phòng trong môi trường chân không. Độ ẩm của giấy cách điện được đo bằng máy phân tích MX-50 hoạt động dựa trên phương pháp bay hơi nước. Hàm lượng ẩm trong giấy cách điện trước và sau khi sấy lần lượt là 11,1±0,15% và 1,0±0,19%. Sau khi sấy, các mẫu giấy cách điện ngay lập tức được ngâm trong methyl ester tinh chế ở điều kiện chân không trong vòng 24 h. Sau đó các mẫu giấy đã được tẩm methyl ester được sử dụng trong các thí nghiệm phóng điện đánh thủng.



Hình 1. Mẫu dầu thí nghiệm: Dầu ăn phế thải (a), Methyl ester thô/glycerol (b) và Methyl ester tinh chế (c).

2.2. Bố trí thí nghiệm và phương pháp thí nghiệm

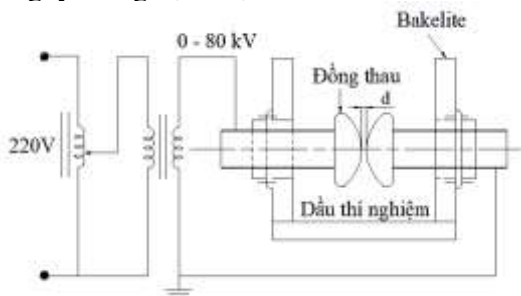
Thí nghiệm xác định điện áp đánh thủng của các mẫu methyl ester được bố trí như Hình 2. Thí nghiệm được thực hiện với điện áp AC-50 Hz theo tiêu chuẩn ASTM D1816 với khe hở điện cực được điều chỉnh lần lượt từ 0,5 mm đến 2,0 mm.

Thí nghiệm xác định điện áp đánh thủng của giấy Kraft tẩm methyl ester được bố trí tương tự như Hình 2 nhưng sử dụng hệ thống điện cực như Hình 3. Điện áp đánh thủng mẫu giấy được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D149. Số lớp giấy cách điện được thay đổi lần lượt là 1, 2, 3 và 4 lớp. Mẫu giấy sau khi bị đánh thủng sẽ được thay bằng mẫu giấy mới.

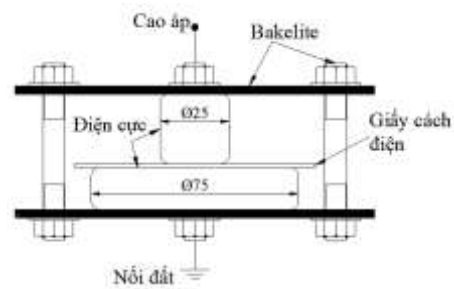
Thí nghiệm lão hóa dầu được thực hiện theo tiêu chuẩn IEC 61125C. Dầu được lão hóa tại 120 °C trong 164 h có bơm không khí với lưu lượng là 0,15 L/h. Mục đích của thí nghiệm lão hóa là nhằm tăng tốc quá trình thoái hóa hay suy giảm chất lượng dầu cách điện theo thời gian dưới tác động của oxy hòa tan trong dầu và nhiệt độ cao. Từ đó sẽ tạo ra được mẫu dầu bị lão hóa gần giống với mẫu dầu thu được trong các máy biến áp vận hành trong thực tế. Dầu sau lão hóa được lấy mẫu để xác định điện áp đánh thủng, độ nhớt và trị số acid.

Đối với thí nghiệm điện áp đánh thủng, dầu cách điện gốc khoáng (PLC supertrans) từ petrolimex cũng đã được sử dụng để tạo cơ sở dữ liệu nhằm giúp cho việc đánh giá methyl ester.

Các thông số kỹ thuật của methyl ester được xác định tại các phòng thí nghiệm thuộc Trường Đại học Cần Thơ, Trung tâm kỹ thuật tiêu chuẩn đo lường chất lượng Cần Thơ và Công ty thí nghiệm điện Miền Nam.



Hình 2. Bố trí thí nghiệm xác định điện áp đánh thủng methyl ester (d : khe hở điện cực).



Hình 3. Hệ thống điện cực thí nghiệm xác định điện áp đánh thủng của giấy Kraft tẩm methyl ester.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Thông số hóa lý của methyl ester

Thông số hóa học, vật lý và điện của methyl ester được trình bày ở Bảng 1. Giá trị của số liệu cho thấy độ nhớt của methyl ester thấp hơn khoảng 8 lần so với dầu ăn phế thải (5,17 cSt so với 45,9 cSt). Đây là ưu điểm nổi bật của methyl ester. Kết quả tương tự đã được quan sát ở các nghiên cứu trước đây [2-4]. Điểm đông đặc tăng nhẹ trong khi khối lượng riêng của methyl ester giảm nhẹ so với dầu ăn phế thải. Do dầu ăn phế thải chứa thành phần chính là dầu cọ nên các acid béo bão hòa như lauric (C12:0), myristic (C14:0), palmitic (C16:0) và stearic (C18:0) sẽ chiếm tỉ lệ lớn trong mẫu dầu. Chính vì vậy, điểm đông đặc của methyl ester sau điều chế sẽ cao [10]. Hàm lượng nước và trị số acid giảm mạnh dẫn đến điện áp đánh thủng của methyl ester tăng cao gấp 2,9 lần so với dầu ăn phế thải. Đây cũng là một ưu điểm khác của methyl ester so với dầu ăn phế thải. Tuy nhiên, điểm chớp cháy giảm mạnh (160 °C so với 320 °C) nên đây là nhược điểm của methyl ester so với dầu ăn phế thải. Kết quả này tương đồng với các báo cáo của các tác giả khác [2-4]. Tuy nhiên điểm chớp cháy của methyl ester vẫn cao hơn so với dầu gốc khoáng (160 °C so với 145 °C [3]). So với tiêu chuẩn qui định cho dầu cách điện gốc thực vật ASTM D6871 thì chỉ có hai chỉ tiêu là điểm đông đặc và điểm chớp cháy của methyl ester là không thỏa mãn yêu cầu theo qui định nên cần phải cải thiện hai chỉ tiêu này ở các nghiên cứu tiếp theo. Tất cả các chỉ tiêu còn lại của methyl ester đều đạt theo tiêu chuẩn.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của methyl ester

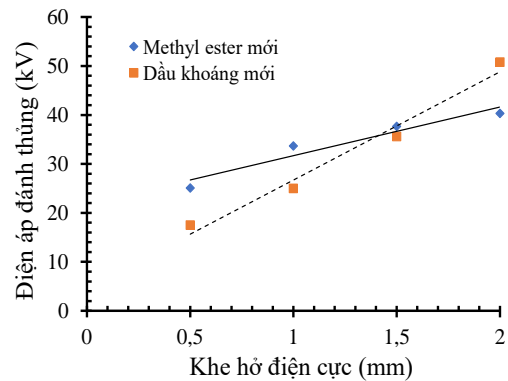
TT	Chỉ tiêu/Phương pháp xác định	Dầu ăn phế thải	Methyl ester	ASTM D6871
1	Độ nhớt tại 40 °C (cSt)/D445	45,9	5,17	≤ 50
2	Điểm đông đặc (°C)/D97	9,0	12	≤ -10
3	Điểm chớp cháy (°C)/D92	320	160	≥ 275
4	Khối lượng riêng tại 40 °C (g/ml)/D1298	0,919	0,87	≤ 0,96
5	Hàm lượng nước (mg/kg)/D1533	500	97,3	≤ 200
6	Điện áp đánh thủng tại khe hở 2,0 mm (kV)/D1816	14,0	40,3	≥ 35
7	Hàm lượng lưu huỳnh ăn mòn/D1275	Không	Không	Không
8	Trị số acid (mg KOH/g)/D974	1,35	0,05	≤ 0,06

3.2. Điện áp đánh thủng methyl ester

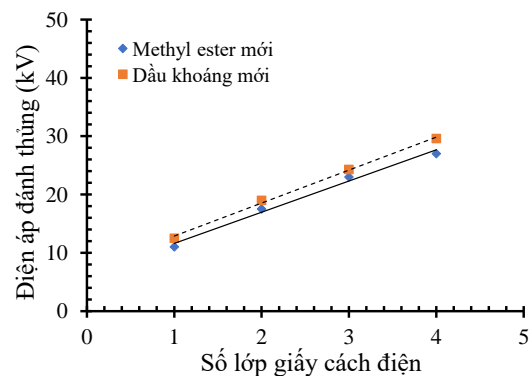
Hình 4 trình bày quan hệ giữa điện áp đánh thủng của methyl ester và độ lớn khe hở điện cực. Kết quả thí nghiệm cho thấy trong khoảng giá trị khe hở điện cực được khảo sát, điện áp đánh thủng tăng gần như tuyến tính khi khe hở điện cực tăng. So sánh với dầu khoáng, thấy rằng tốc độ gia tăng điện áp theo khe hở điện cực của methyl ester chỉ bằng 50% (10,1 kV/mm so với 22,2 kV/mm). Kết quả này có thể do giống như dầu thực vật, methyl ester không có khả năng ngăn chặn sự xuất hiện của dòng điện tích loại nhanh khi khe hở điện cực tăng nên điện áp đánh thủng sẽ tăng chậm [9]. Điều này cho thấy hạn chế của methyl ester khi áp dụng cho các máy biến áp ở các cấp điện áp cao hơn trung thế.

3.3. Điện áp đánh thủng giấy Kraft tẩm methyl ester

Hình 5 trình bày điện áp đánh thủng của giấy Kraft tẩm methyl ester. Kết quả thí nghiệm cho thấy điện áp đánh thủng cũng tăng tuyến tính theo số lớp cách điện. So sánh với dầu khoáng, ta thấy điện áp đánh thủng của giấy Kraft tẩm methyl ester chỉ thấp hơn khoảng 5÷10%. Điều này cho thấy sự tương thích giữa methyl ester và giấy Kraft về phương diện ngăn chặn phóng điện đánh thủng.



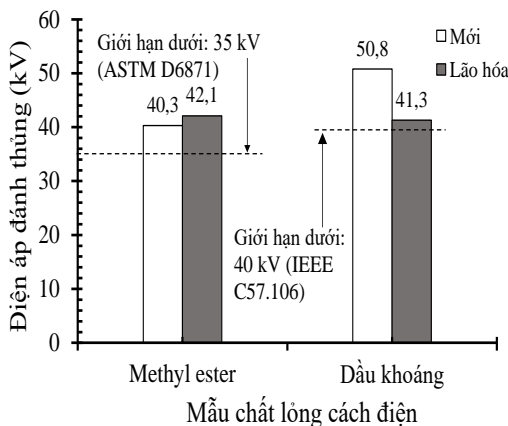
Hình 4. Tương quan giữa điện áp đánh thủng và khe hở điện cực.



Hình 5. Tương quan giữa điện áp đánh thủng và số lớp giấy cách điện.

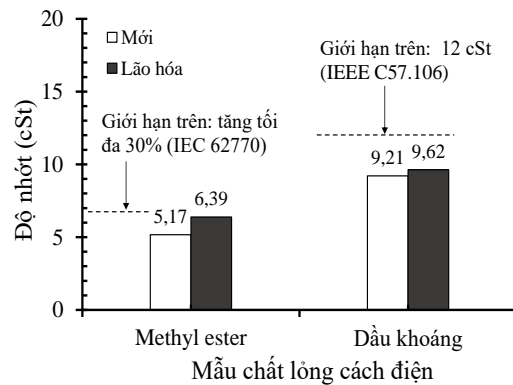
3.4. Sự lão hóa methyl ester

Sau khi điều chế, methyl ester được lão hóa ở nhiệt độ 120 °C trong vòng 164 h như đã trình bày ở trên. Methyl ester sau lão hóa được sử dụng để đo điện áp đánh thủng, độ nhớt và trị số acid nhằm để đánh giá ảnh hưởng của sự lão hóa đến các thông số này. Điện áp đánh thủng của methyl ester sau khi lão hóa được trình bày ở Hình 6. Kết quả cho thấy sau lão hóa, điện áp đánh thủng có xu hướng tăng nhẹ ($\approx 5\%$). Điều này phù hợp với các quan sát trước đây đối với dầu thực vật [5]. Kết quả này có thể do hàm lượng nước của methyl ester giảm sau khi bị lão hóa. So sánh với dầu khoáng, ta thấy mặc dù điện áp đánh thủng của methyl ester mới thấp hơn dầu khoáng mới khoảng 21% (40,3 kV so với 50,8 kV) nhưng sau khi bị lão hóa, điện áp đánh thủng của methyl ester lại cao hơn (42,1 kV so với 41,3 kV). Kết quả này cho thấy điện áp đánh thủng của methyl ester hầu như không bị ảnh hưởng bởi sự lão hóa trong khi dầu khoáng bị giảm mạnh ($\approx 19\%$). Đây là ưu điểm của methyl ester so với dầu khoáng khi được sử dụng để cách điện trong quá trình hoạt động mang tải lâu dài của máy biến áp. Nguyên nhân là do acid có mạch phân tử ngắn sinh ra trong dầu khoáng bị lão hóa đã làm giảm điện áp đánh thủng tuy nhiên acid có mạch phân tử dài sinh ra trong methyl ester sau khi bị lão hóa ảnh hưởng không đáng kể đến điện áp đánh thủng [8].



Hình 6. Ảnh hưởng của sự lão hóa đến điện áp đánh thủng (khe hở 2 mm).

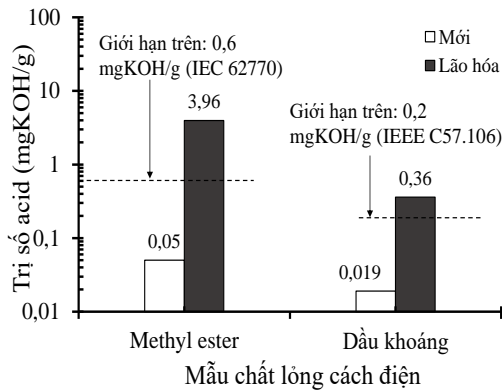
Độ nhớt của methyl ester sau khi lão hóa được trình bày ở Hình 7. Kết quả cho thấy sau lão hóa, độ nhớt tăng từ 5,17 cSt lên 6,39 cSt tức tăng khoảng 23,5%. So với tiêu chuẩn IEC 62770, sự gia tăng độ nhớt thấp hơn mức tăng cho phép lớn nhất là 30%. Sự gia tăng độ nhớt của chất lỏng cách điện sau khi bị lão hóa ở nhiệt độ cao cũng đã được quan sát ở dầu thực vật [5-7]. Ngoài ra, ta thấy độ nhớt của dầu khoáng sau lão hóa chỉ tăng khoảng 4,5% (9,62 cSt so với 9,21 cSt). Kết quả này cho thấy độ nhớt của methyl ester chịu tác động mạnh hơn bởi sự lão hóa so với dầu khoáng. Đây là nhược điểm của methyl ester so với dầu khoáng và cần được cải thiện ở các nghiên cứu tiếp theo.



Hình 7. Ảnh hưởng của sự lão hóa đến độ nhớt.

Hình 8 trình bày ảnh hưởng của sự lão hóa đến trị số acid của methyl ester. Kết quả thí nghiệm cho thấy trị số acid của methyl ester tăng mạnh sau lão hóa (3,96 mgKOH/g so với 0,05 mgKOH/g). Giá trị này vượt quá mức tối đa theo qui định tại IEC 62770 là 0,6 mgKOH/g. Mặc dù nồng độ acid sau lão hóa cao nhưng do đây là acid có mạch phân tử dài nên sẽ không ảnh hưởng đến giấy cách điện trong máy biến áp cũng như điện áp đánh thủng của methyl ester như đã quan sát ở trên [8]. Tuy nhiên, đây cũng là nhược điểm của methyl ester và cần phải nghiên cứu thêm để cải thiện. So sánh với dầu khoáng, ta thấy trị số acid của methyl ester bị ảnh hưởng mạnh hơn bởi sự lão hóa. Sau lão hóa, trị số acid của methyl ester tăng 79,2 lần trong khi giá trị tương ứng của dầu khoáng tăng 18,9 lần. Ngoài ra, kết quả thí nghiệm cũng cho thấy trị số acid của dầu khoáng sau lão hóa

cũng đã vượt quá giá trị theo qui định (0,36 mgKOH/g so với 0,2 mgKOH/g).



Hình 8. Ảnh hưởng của sự lão hóa đến trị số acid.

4. Kết luận

Nghiên cứu cơ bản về khả năng ứng dụng làm chất lỏng cách điện của methyl ester đã hoàn thành. Kết quả nghiên cứu cho thấy ưu điểm của methyl ester, được điều chế từ dầu ăn phế thải chứa chủ yếu là dầu cọ, là độ nhớt rất thấp và điện áp đánh thủng khá cao. Ngoài ra, điện áp đánh thủng của giấy Kraft tẩm methyl ester xấp xỉ với trường hợp tẩm dầu khoáng cũng là ưu điểm của loại chất lỏng này. Tuy nhiên, nhược điểm của chất lỏng này là điểm đông đặc cao trong khi điểm chớp cháy lại thấp. Ngoài ra, độ nhớt và trị số acid của methyl ester tăng mạnh sau khi bị lão hóa cũng là nhược điểm của chất lỏng này. Do đó, hướng nghiên cứu tiếp theo để cải tiến methyl ester là hòa trộn chất lỏng này với một loại dầu thực vật khác cũng như sử dụng phụ gia chống oxy hóa.

Tài liệu tham khảo

- [1] Working Group A2.35, Technical Brochure 436-Experiences in Service with New Insulating Liquids, Cigre, 2010.
- [2] M. N. Deraman, N. A. Bakar, N. H. A. Aziz, I. S. Chairul, S. A. Ghani, The Experimental Study on the Potential of Waste Cooking Oil as a New Transformer Insulating Oil, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, Vol. 69, No. 1, 2020, pp. 74-84, <https://doi.org/10.37934/arfmts.69.1.7484>.
- [3] I. S. Chairul, N. A. Bakar, M. N. Othman, S. A. Ghani, M. N. Deraman, Development of Waste Cooking Oil Methyl Ester as Potential Electrical Insulating Fluid for Power Transformer, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 13, No. 20, 2018, pp. 8154-8162.
- [4] M. M. Ghislain, O. B. Gerard, T. N. Emeric, M. I. Adolphe, Improvement of Environmental Characteristics of Natural Monoesters for Use as Insulating Liquid in Power Transformers, Environmental Technology and Innovation, Vol. 27, 2022, pp. 102784, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102784>.
- [5] N. V. Dung, H. L. Huong, The Effect of Antioxidants on the Physical and Chemical Properties of Rice Oil, Corn Oil, Peanut Oil and Kraft Paper, IEEE Trans, Dielectr, Electr, Insul, Vol. 27, No. 5, 2020, pp. 1698-1706, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2020.008422>.
- [6] S. Tenbohlen, M. Koch, Ageing Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers, IEEE Trans, Power, Del, Vol. 25, No. 2, 2010, pp. 825-830, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2034747>.
- [7] H. M. Wilhelm, M. B. C. Stocco, L. Tulio, W. Uhren, S. G. Batista, Edible Natural Ester Oils as Potential Insulating Fluids, IEEE Trans, Dielectr, Electr, Insul, Vol. 20, No. 4, 2013, pp. 1395-1401, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6571461>.
- [8] L. E. Lundgaard, W. Hansen, S. Ingebrigtsen, Ageing of Mineral Oil Impregnated Cellulose by Acid Catalysis, IEEE Trans, Dielectr, Electr, Insul, Vol. 15, No. 2, 2008, pp. 540-546, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4483475>.
- [9] M. Unge, S. Singha, N. V. Dung, D. Linhjell, S. Ingebrigtsen, L. E. Lundgaard, Enhancements in the Lightning Impulse Breakdown Characteristics of Natural Ester Dielectric Liquids, Applied Physics Letters, Vol. 102, No. 17, 2013, pp. 172905, <https://doi.org/10.1063/1.4803710>.
- [10] M. K. Lam, K. T. Lee, Production of Biodiesel Using Palm Oil, Biofuels, 2011, pp. 353-374, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00016-4>.