



Review Article

Application of Vegetable Oil-Based Insulating Fluids for Transformers: A Review

Nguyen Van Dung*

Faculty of Engineering Technology, Cantho University, 3/2 street, Cantho, Vietnam

Received 06 August 2019

Revised 12 November 2019; Accepted 04 December 2019

Abstract: Vegetable oil-based insulating oils have been successfully applied in the field of insulation for distribution transformers because vegetable oils are fully biodegradable, high dielectric strength, high flash point and better compatible with paper insulators than mineral-based insulating oil. However, vegetable oils still have drawbacks such as high viscosity, high pour point, low oxidation stability and low resistance to the formation of fast mode streamers. Therefore, many studies have been performed to improve properties of vegetable oils. This paper will summarize the important research results on physicochemical properties of vegetable oils as well as the methods used to improve the efficiency of vegetable oils to establish a basis for determination of the research orientation in vegetable oil-based insulating oils in Vietnam.

Keywords: Vegetable oil, transformers, breakdown voltage, ageing, additives.

* Corresponding author.

Email address: nvdung@ctu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.4936>



Ứng dụng dầu thực vật trong máy biến áp: Tổng hợp tài liệu

Nguyễn Văn Dũng*

Khoa Công Nghệ, Trường Đại học Cần Thơ, Đường 3/2, Cần Thơ, Việt Nam

Nhận ngày 06 tháng 8 năm 2019

Chỉnh sửa ngày 12 tháng 11 năm 2019; Chấp nhận đăng ngày 04 tháng 12 năm 2019

Tóm tắt: Dầu cách điện gốc thực vật đã được ứng dụng thành công trong lĩnh vực cách điện cho các máy biến áp phân phối bởi vì dầu thực vật có khả năng phân hủy gốc thực vật hoàn toàn, độ bền điện cao, điểm chớp cháy cao và tương thích với giấy cách điện tốt hơn khi so sánh với dầu cách điện gốc khoáng. Tuy nhiên dầu thực vật vẫn có những điểm hạn chế như độ nhớt cao, điểm đông đặc cao, độ ổn định oxy hóa thấp và khả năng chống sự hình thành dòng điện tích nhanh thấp. Do đó đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện để cải thiện các nhược điểm của dầu thực vật. Bài báo này sẽ tổng hợp các kết quả nghiên cứu quan trọng về đặc tính lý hóa của dầu thực vật cũng như các phương pháp được sử dụng để nâng cao hiệu quả sử dụng dầu thực vật trong thực tế làm nền tảng cho việc định ra hướng nghiên cứu về dầu cách điện thực vật ở Việt Nam.

Từ khóa: Dầu thực vật, máy biến áp, điện áp đánh thủng, sự lão hóa, chất phụ gia.

1. Đặt vấn đề

Nhiều loại chất lỏng cách điện khác nhau đã và đang được sử dụng làm dầu biến thế. Dựa vào cấu trúc hóa học và nhiệt độ cháy, dầu biến thế được chia thành 04 loại như sau: dầu gốc khoáng, hydrocarbon có phân tử lượng lớn, chất lỏng tổng hợp và dầu thực vật [1]. Mặc dù không thân thiện môi trường và hầu như không bị phân hủy sinh học nhưng do có ưu thế về đặc tính cách điện, làm mát và giá thành nên dầu gốc khoáng vẫn tiếp tục là chất lỏng cách điện được sử dụng phổ biến trong các máy biến áp [2]. Gần đây, dầu cách điện gốc thực vật đã và đang thu hút được

sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trên thế giới [2-5]. Dầu cách điện gốc thực vật có các ưu điểm so với dầu máy biến áp gốc khoáng như độ bền điện cao, điểm chớp cháy cao, phân hủy hoàn toàn và không độc đối với con người và môi trường [6, 7]. Do đó, dầu cách điện gốc thực vật phù hợp sử dụng ở khu vực đông dân cư và những nơi cần phải hạn chế nguy cơ cháy nổ. Tuy nhiên dầu cách điện gốc thực vật vẫn tồn tại một số nhược điểm như: dễ bị oxy hóa, độ nhớt cao, nhiệt độ đông đặc cao và khả năng kháng dòng điện tích nhanh kém. Dầu cách điện gốc thực vật được CIGRE đánh giá là sử dụng đạt hiệu quả ở các máy biến áp phân phối [8]. Đến

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: nvdung@ctu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.4936>

2014 đã có khoảng 600.000 máy biến áp được cách điện bằng dầu thực vật đang vận hành ở các lưới điện trên thế giới [9]. Nhiều loại dầu thực vật đã được nghiên cứu làm dầu cách điện như dầu cọ, dầu cải, dầu đậu nành, dầu hướng dương, dầu bắp, dầu hoa rum, dầu gạo, dầu đậu phộng, dầu dừa... [5, 10, 11]. Hiện tại từ các nguồn dầu thực vật trên đã điều chế thành dầu cách điện với các nhãn hiệu như BIOTEMP[®], BIOTRANS[®], Envirotemp[®] FR₃, Bio Electra, Biovol A và Midel eN [6, 7, 12, 13].

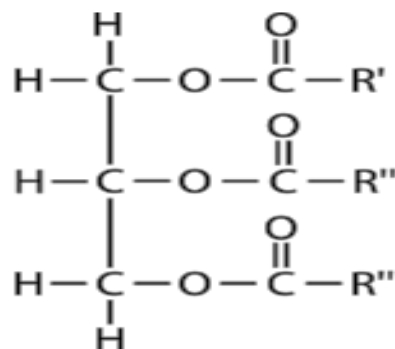
Mặc dù nước ta có nguồn nguyên liệu dồi dào để sản xuất nhiều loại dầu thực vật nhưng số lượng công trình nghiên cứu về dầu cách điện gốc thực vật là rất ít [14-17]. Do đó việc tổng hợp tài liệu về dầu cách điện gốc thực vật để góp phần nâng cao kiến thức về sử dụng dầu thực vật trong các máy biến áp trong tương lai cũng như làm nền tảng cho việc thiết kế mới các loại dầu cách điện từ nguồn nguyên liệu dầu thực vật trong nước là cần thiết và phù hợp với xu thế phát triển bền vững chung của thế giới. Bài báo này sẽ trình bày các kết quả nghiên cứu quan trọng về đặc tính điện, vật lý và hóa học của dầu cách điện gốc thực vật đã được thực hiện trên thế giới. Hơn nữa, ảnh hưởng của sự lão hóa và chất phụ gia đến dầu cách điện gốc thực vật cũng được phân tích. Ngoài ra, sự tương thích của dầu cách điện gốc thực vật với giấy cách điện cũng được tổng hợp.

2. Đặc tính của dầu cách điện gốc thực vật

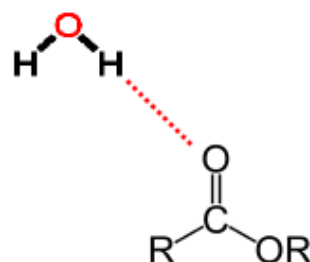
2.1. Công thức hóa học và thành phần axit béo của dầu cách điện gốc thực vật

Dầu cách điện gốc thực vật thông thường được điều chế từ hỗn hợp giữa các loại dầu thực vật và các chất phụ gia [6, 7, 12, 13]. Nguồn nguyên liệu đầu vào này được chọn dựa vào các thông số như trữ lượng, giá thành và đặc tính kỹ thuật. Dầu thực vật là hỗn hợp các triglyceride được tạo thành từ ba nhóm axit béo gắn kết với khung glycerol bằng các liên kết Este như Hình 1. Ba axit béo này có thể cùng hoặc khác loại. Do sự tồn tại của các liên kết Este nên dầu thực vật được xem như là chất lỏng có cực và có khả

năng hút ẩm thông qua liên kết Hi-đrô như Hình 2. Điều này dẫn đến hàm lượng nước hòa tan cực đại trong dầu thực vật cao gấp nhiều lần so với dầu gốc khoáng như thể hiện ở Bảng 1 nên sẽ làm giảm ảnh hưởng của độ ẩm đến độ bền điện của dầu thực vật [18].



Hình 1. Cấu trúc triglyceride.



Hình 2. Liên kết giữa triglyceride với phân tử nước.

Bảng 1. Hàm lượng nước hòa tan cực đại trong dầu [8]

TT	Loại dầu	Hàm lượng nước tại 23°C (mg/kg)
1	Dầu khoáng	55
2	Dầu cách điện gốc thực vật	1100

Tỉ lệ giữa thành phần axit béo không bão hòa và bão hòa sẽ quyết định giá trị của nhiệt độ đông đặc và độ ổn định oxy hóa của dầu thực vật. Tỉ lệ này càng cao đồng nghĩa với nhiệt độ đông đặc càng thấp nhưng khả năng kháng oxy hóa càng kém và ngược lại như Bảng 2. Tuy nhiên tỉ lệ này sẽ luôn thay đổi theo vụ mùa cũng như đặc tính thổ nhưỡng của khu vực canh tác. Ngoài ra, khả

năng chống oxy hóa của dầu thực vật còn phụ thuộc vào hàm lượng axit béo không bão hòa đơn (axit oleic). Hàm lượng axit béo này càng cao sẽ làm tăng khả năng chống oxy hóa của dầu thực vật. Để tăng hàm lượng axit oleic của dầu thực vật, thông thường phương pháp biến đổi gen được áp dụng trong sản xuất quy mô công nghiệp. Chẳng hạn, sau khi bị biến đổi gen dầu từ hạt hướng dương có hàm lượng axit oleic tăng gấp khoảng 4 lần [22]. Một biện pháp khác cũng đã được áp dụng là pha trộn nhiều loại dầu thực vật với nhau để có hỗn hợp dầu với đặc tính phù hợp.

Bảng 2. Tỷ lệ giữa thành phần axit béo không bão hòa và bão hòa của một số loại dầu thực vật phổ biến

TT	Loại dầu	Tỷ lệ [8]	Nhiệt độ đông đặc (°C) [13, 19, 20]	Độ bền oxy hóa tại 120°C (h) [21]
1	Dầu dừa	0,1	21	33,0
2	Dầu cọ	1,0	24	7-12
3	Dầu đậu phộng	4,0	3	3-15
4	Dầu olive	4,6	-9	6-11
5	Dầu nành	5,7	-12	1-7
6	Dầu mè	6,6	-14	~5,0
7	Dầu hướng dương	7,3	-18	1-4
8	Dầu hướng dương (HO)	10,0	-12	8-16
9	Dầu hạt cải	14,6	-10	3-5
10	Dầu gạo	3,0	-15	~5,0
11	Dầu bắp	5,7	-11	~5,0

*HO: hàm lượng axit oleic cao

2.2. Đặc tính vật lý, hóa học và điện của dầu cách điện gốc thực vật

Đặc tính hóa học, vật lý và điện của dầu cách điện gốc thực vật điển hình được trình bày ở Bảng 3. Từ bảng này cho thấy BIOTEMP có các ưu điểm như bị phân hủy sinh học đạt đến 97-99% sau 21 ngày và có độ bền điện vượt trội so với dầu gốc khoáng Nytro 10XN [23]. Ngoài ra, nhiệt độ chớp cháy và nhiệt độ cháy của dầu thực vật cao hơn gấp đôi so với dầu khoáng. Một ưu

điểm khác của dầu thực vật là chất hấp thụ khí trong khi dầu khoáng là chất sinh khí dưới tác động của tia lửa điện. Đặc tính này sẽ hạn chế sự hình thành các kênh khí trong dầu dẫn đến ngăn cản sự phóng điện. Do đó sẽ nâng cao độ bền điện của dầu cách điện gốc thực vật [24]. Hằng số điện môi lớn là một ưu điểm nữa của dầu cách điện gốc thực vật. Hằng số điện môi của dầu thực vật lớn gấp 1,5 lần so với dầu khoáng sẽ làm giảm độ chênh lệch về giá trị của hằng số điện môi giữa dầu thực vật ($\epsilon_r = 3,1$) và giấy cách điện ($\epsilon_r \approx 4,0$). Kết quả là điện trường sẽ phân bố đều hơn trong hệ thống giấy/dầu thực vật khi so sánh với hệ thống giấy/dầu khoáng dẫn đến giảm nguy cơ phóng điện cục bộ và cho phép hệ thống cách điện giấy/dầu thực vật làm việc ở điện áp cao hơn [10]. Tuy nhiên từ Bảng 3 ta cũng thấy một trong những nhược điểm của dầu BIOTEMP là có nhiệt độ đông đặc cao gấp đôi so với dầu khoáng. Đây cũng là nhược điểm chung của các loại dầu thực vật khác. Kết quả này làm tăng khả năng đông đặc của dầu khi các máy biến áp hoạt động ở khu vực có nhiệt độ thấp. Ngoài ra, với độ nhớt cao gấp từ 3 - 4 lần so với dầu khoáng sẽ hạn chế khả năng làm mát bằng đối lưu của dầu cách điện gốc thực vật trong máy biến áp cũng như sẽ tăng công suất của hệ thống làm mát cưỡng bức [18]. Nhược điểm này cần phải được lưu ý khi thiết kế hệ thống làm mát cho máy biến áp cách điện bằng dầu cách điện gốc thực vật. Ngoài ra độ nhớt cao sẽ làm giảm chuyển động đối lưu tự nhiên của dầu thực vật dẫn đến gia tăng nhiệt độ tại các điểm phía trên cuộn dây cũng như tại các điểm quá nhiệt khoảng vài độ [18]. Tuy nhiên, với độ dẫn nhiệt cao hơn so với dầu gốc khoáng (~ 35%) đã làm giảm gradient nhiệt độ giữa bề mặt cuộn dây và dầu thực vật xung quanh [18]. Mặc dù tổn thất điện môi của dầu cách điện gốc thực vật lớn gấp khoảng 3 lần so với dầu cách điện gốc khoáng nhưng thông thường tổn hao điện môi có giá trị không đáng kể so với tổn hao đồng và sắt từ trong máy biến áp. Các chỉ tiêu còn lại mặc dù có khác biệt giữa dầu cách điện gốc thực vật và dầu cách điện gốc khoáng nhưng không gây tác động đáng kể.

BIOTEMP [6] được sản xuất từ thành phần chính là dầu từ hạt hướng dương có hàm lượng axit oleic cao kết hợp với dầu hoa rum và dầu đậu nành. Ngoài ra, BIOTEMP còn chứa hỗn hợp chất phụ gia chống oxy hóa chiếm khoảng 1,6% khối lượng. Tỷ lệ hàm lượng axit béo của dầu BIOTEMP được cho ở Bảng 4.

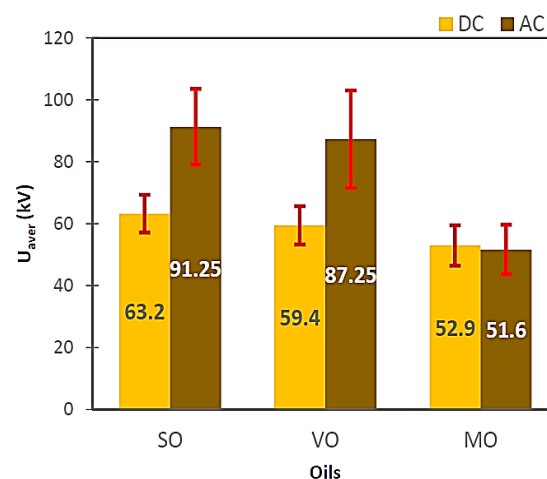
Bảng 3. Thông số hóa học, vật lý và điện của dầu BIOTEMP

TT	Chỉ tiêu	Nyro 10XN [19]	BIOTEMP [6]
1	Độ phân hủy gốc thực vật sau 21 ngày (%)	10	97-99
2	Lưu huỳnh ăn mòn	KPH	KPH
3	Hàm lượng nước (mg/kg)	35	<50
4	Chỉ số acid trung hòa (mg KOH/g)	0,03	0,03
5	Độ bền oxy hóa(164 h Cặn (% wt)		
	Trị số acid (mg KOH/g)	0,2	0,12
		0,4	0,36
6	Trọng lượng riêng (g/cm ³)	0,91	0,91
7	Độ nhớt tại 40°C (cSt)	12	42
8	Nhiệt độ chớp cháy (°C)	145	340
9	Nhiệt độ cháy (°C)	170	360
10	Nhiệt độ đông đặc (°C)	-40	-15 đến -20
11	Hệ số giãn nở nhiệt (/°C)	7,5×10 ⁻⁴	6,8 ×10 ⁻⁴
12	Nhiệt dung riêng tại 25°C (Cal/g.°C)	0,45	0,57
13	Độ dẫn nhiệt tại 25°C (W/m.K)	0,126	0,17
14	Điện áp đánh thủng 2mm (kV)	56	76
15	Độ tan δ tại 25°C (, %)	<0,03	0,09
16	Hằng số điện môi	2,2	3,1
17	Điện trở suất tại 25°C (Ω.cm)	10 ¹⁴ -10 ¹⁵	1,5 ×10 ¹³
18	Khả năng sinh khí (μL/min)	+35	-50

Bảng 4. Hàm lượng axit béo trong dầu BIOTEMP [25]

TT	Thành phần axit béo	Hàm lượng (%)
1	Axit oleic	80,1±0,3%
2	Axit linoleic	10,5±0,1%
3	Axit linolenic	0,3±0,0%
4	Axit stearic	9,1±0,2%

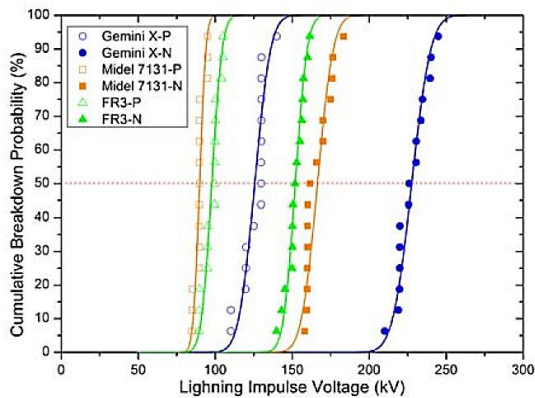
Dầu cách điện gốc thực vật không những có điện áp đánh thủng AC lớn mà còn thể hiện khả năng chịu đựng cao đối với điện áp DC như Hình 3 [26]. Như vậy cả điện áp đánh thủng AC và DC của dầu thực vật đều vượt trội so với dầu khoáng. Tuy nhiên điều quan trọng cần lưu ý là điện áp đánh thủng phụ thuộc rất lớn vào hàm lượng ẩm và nồng độ tạp chất trong dầu do đó rất khó kết luận độ bền điện cao của dầu thực vật là do chính cấu trúc của triglyceride và thành phần hóa học của dầu tạo nên [27]. Các nghiên cứu trước đây đã ghi nhận được độ bền điện của dầu thực vật dưới tác động của điện áp xung sét thấp hơn so với dầu khoáng như Hình 4. Kết quả này có thể giải thích là do dòng điện tích phát triển nhanh hơn trong dầu thực vật so với dầu khoáng [28]. Như vậy mặc dù có độ bền điện AC và DC cao nhưng dầu thực vật lại bộc lộ khả năng chịu đựng điện áp xung sét kém.



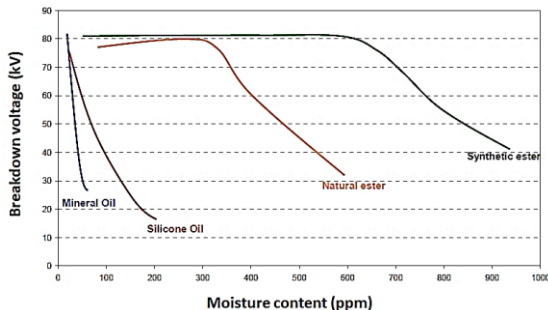
Hình 3. Điện áp đánh thủng của dầu với khe hở 2,5mm theo IEC-60156 (SO: dầu tổng hợp; VO: dầu thực vật; MO: dầu khoáng) [26].

2.3. Ảnh hưởng của hàm lượng nước hòa tan đến độ bền điện của dầu cách điện gốc thực vật

Do sự hiện diện của nhóm Este trong cấu trúc như đã đề cập ở phần trên, dầu thực vật thể hiện tính háo nước vượt trội so với dầu khoáng dẫn đến hàm lượng nước hòa tan cực đại trong dầu thực vật sẽ cao gấp nhiều lần so với dầu khoáng. Vì vậy, độ bền điện của dầu cách điện gốc thực vật ít bị ảnh hưởng bởi hàm lượng nước hòa tan hơn so với dầu cách điện gốc khoáng như Hình 5. Rõ ràng, điện áp đánh thủng của dầu thực vật hầu như không giảm khi hàm lượng nước thay đổi trong khoảng 100-300 mg/kg. Trong khi đó, độ bền điện của dầu khoáng rất nhạy với sự hiện diện của nước và giảm mạnh khi tăng hàm lượng nước hòa tan. Kết quả tương tự được ghi nhận tại một báo cáo khác [29]. Tuy nhiên, khi so sánh theo giá trị độ ẩm tương đối, điện áp đánh thủng của dầu thực vật (FR₃) giảm nhanh hơn so với dầu khoáng khi độ ẩm tăng lên [22, 27].



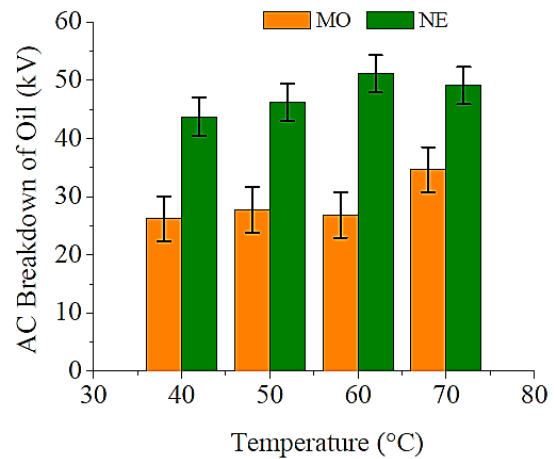
Hình 4. Điện áp đánh thủng xung sét của dầu (khe hở 50mm; hệ thống điện cực mũi nhọn-bán phẳng; P: xung dương; N: xung âm) [28].



Hình 5. Quan hệ giữa điện áp đánh thủng và hàm lượng ẩm trong dầu [8].

2.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến dầu cách điện gốc thực vật

Nhiệt độ có ảnh hưởng lớn đến các thông số vật lý và điện của dầu cách điện gốc thực vật. Độ nhớt, hằng số điện môi và điện trở suất tỉ lệ nghịch với nhiệt độ trong khi hệ số tổn hao điện môi tăng theo nhiệt độ [30, 31]. Nhiệt độ cao hơn sẽ thúc đẩy quá trình oxy hóa dầu làm gia tăng độ dẫn điện hay giảm điện trở suất và tăng hệ số tổn hao điện môi. Khi nhiệt độ tăng lên sẽ làm gia tăng động năng của các lưỡng cực điện dẫn đến các lưỡng cực có xu hướng sắp xếp ngẫu nhiên làm giảm sự phân cực và kết quả là hằng số điện môi sẽ giảm. Các nghiên cứu trước đây cũng đã chỉ ra rằng nhiệt độ có ảnh hưởng đáng kể đến điện áp phóng điện của dầu thực vật và nhiệt độ tăng lên sẽ làm gia tăng điện áp phóng điện như Hình 6 [10]. Kết quả này được giải thích là do hàm lượng nước hòa tan cực đại trong dầu sẽ tăng theo nhiệt độ làm giảm hàm lượng ẩm tương đối trong dầu do đó hơi ẩm sẽ khuếch tán từ dầu vào không khí dẫn đến điện áp phóng điện của dầu sẽ tăng.

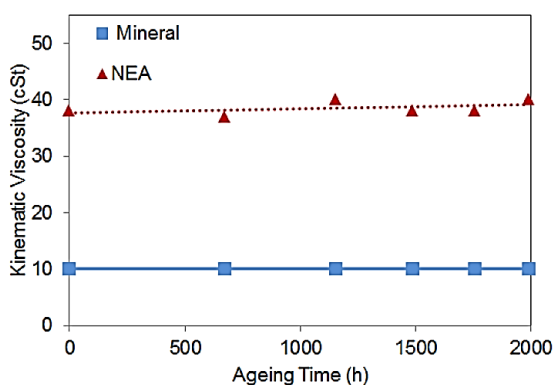


Hình 6. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện áp đánh thủng của dầu (MO: dầu khoáng; NE: dầu thực vật) [10].

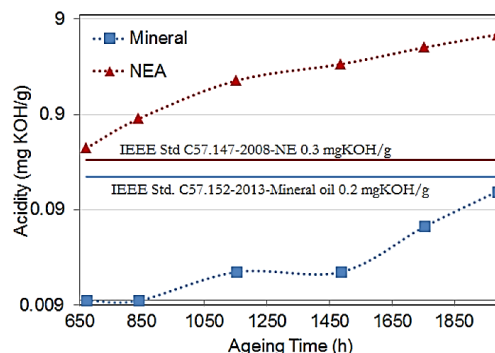
2.5. Ảnh hưởng của sự lão hóa đến dầu cách điện gốc thực vật

Dưới tác động của nhiệt độ cao và tiếp xúc oxy trong thời gian dài, dầu cách điện gốc thực vật sẽ bị lão hóa. Quá trình lão hóa dầu thực vật

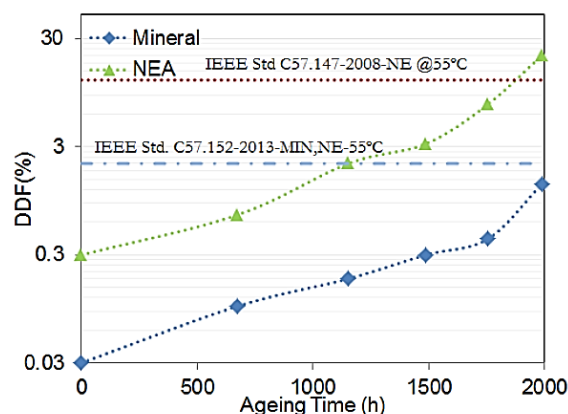
gây nên bởi quá trình thủy phân, oxy hóa và polyme hóa [22]. Sự oxy hóa dầu thực vật khởi đầu bằng sự hình thành các gốc tự do gây nên bởi sự tấn công của oxy vào các vị trí nối đôi trong cấu trúc triglyceride. Các gốc tự do này sẽ nhanh chóng phản ứng với oxy để hình thành các gốc peroxy. Các gốc peroxy tiếp tục tấn công các axit béo để hình thành nên hydroperoxide và các gốc tự do mới. Quá trình tự oxy hóa này diễn ra càng mãnh liệt khi có sự hiện diện của các chất xúc tác như nhiệt độ, độ ẩm và kim loại. Ngoài ra, sự hiện diện của nước sẽ làm thủy phân dầu thực vật thành các axit béo tự do và glycerol. Do đó, sau khi bị lão hóa dầu thực vật sẽ chứa các chất như polyme, cặn, andehit, axit béo tự do và ketone trong khi sự lão hóa dầu khoáng sẽ sinh ra cặn và axit hữu cơ [8]. Kết quả là dầu thực vật trở nên sậm màu, tăng độ nhớt (Hình 7), tăng mạnh hàm lượng axit hữu cơ (Hình 8) và tổn hao điện môi (Hình 9) nhưng lại giảm nhẹ độ bền điện [18, 32]. Khi so sánh với dầu khoáng, độ tăng của chỉ tiêu độ nhớt, trị số axit và hệ số tổn hao điện môi của dầu thực vật sau lão hóa đều lớn hơn. Kết quả này cho thấy tốc độ thoái hóa diễn ra trong dầu thực vật lớn hơn so với dầu khoáng. Do đó đối với các máy biến áp cách điện bằng dầu thực vật cần phải sử dụng thiết kế kiểu kín để hạn chế tác động của oxy trong không khí đến quá trình lão hóa dầu khi máy biến áp hoạt động tại nhiệt độ cao trong thời gian dài [21].



Hình 7. Ảnh hưởng của thời gian lão hóa đến độ nhớt động lực học của dầu (NEA: dầu thực vật; Mineral: dầu khoáng) [32].



Hình 8. Ảnh hưởng của thời gian lão hóa đến trị số axit của dầu (NEA: dầu thực vật; Mineral: dầu khoáng) [32].



Hình 9. Ảnh hưởng của thời gian lão hóa đến hệ số tổn hao điện môi (DDF) (NEA: dầu thực vật; Mineral: dầu khoáng) [32].

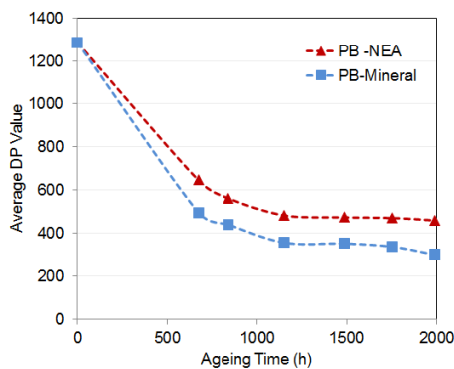
2.6. Ảnh hưởng của sự lão hóa đến giấy cách điện tẩm dầu cách điện gốc thực vật

Sự lão hóa đã ảnh hưởng mạnh đến giấy cách điện tẩm dầu thực vật thông qua sự sụt giảm độ polyme hóa (DP) và độ bền kéo (TS) như Hình 10 và 11 và độ sụt giảm này tăng theo thời gian lão hóa, nhiệt độ lão hóa và độ ẩm của giấy [32, 33]. Kết quả là giấy cách điện trở nên sậm màu, giòn, dễ vỡ và suy giảm độ bền điện [10, 34, 35]. Sự suy giảm độ bền điện của giấy tẩm dầu sau khi lão hóa được giải thích là do sự thay đổi về cấu trúc bên trong giấy cách điện hoặc là do xuất hiện vết nứt bên trong hoặc trên bề mặt như Hình 12 [35]. Giấy cách điện tẩm dầu thực vật bị lão hóa là do sự tác động tổng hợp của quá trình oxy hóa, thủy phân và nhiệt phân. Kết quả là sẽ sinh

ra nước, nhóm carbonyl, nhóm carboxyl, các hợp chất furan và các chất khí như CO và CO₂ [36]. Ngoài ra, axit tự do sinh ra do lão hóa dầu cũng tác động lên cấu trúc xenlulô tạo thêm nước và thúc đẩy quá trình lão hóa giấy [10, 22]. Khi so sánh với trường hợp tẩm dầu khoáng, giấy tẩm dầu thực vật có độ suy giảm về DP thấp hơn dẫn đến tuổi thọ của giấy cách điện tẩm dầu thực vật cao hơn 5-8 lần [5] và tuổi thọ giấy cách điện tẩm dầu cách điện được xác định bằng phương trình thực nghiệm như sau:

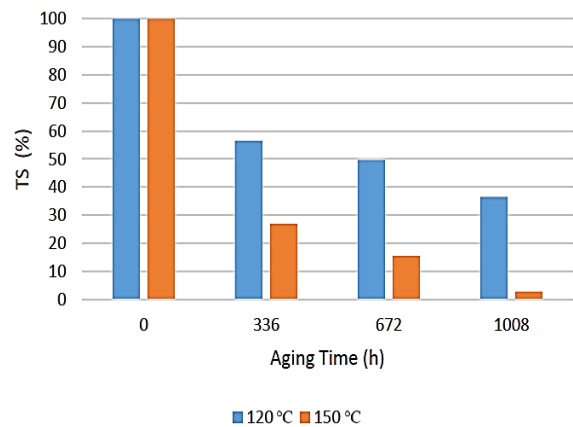
$$t = A \cdot e^{\left(\frac{15000}{T+273}\right)} (pu) \quad (1)$$

với $1 pu = 20,5$ năm; hệ số $A = 7,82 \cdot 10^{-17}$ đối với giấy tẩm dầu thực vật và $9,8 \cdot 10^{-18}$ đối với giấy tẩm dầu khoáng. Kết quả này cho thấy với cùng tuổi thọ, hệ thống giấy cách điện tẩm dầu cách điện gốc thực vật có thể hoạt động với phụ tải cao hơn so với hệ thống giấy tẩm dầu khoáng hoặc là với cùng phụ tải, sự xuất hiện của các điểm quá nhiệt có nhiệt độ cao hơn trong hệ thống giấy/dầu thực vật không làm cho hệ thống này có tuổi thọ thấp hơn so với hệ thống giấy/dầu khoáng. Tuổi thọ cao của giấy cách điện tẩm dầu thực vật được giải thích là do sự lão hóa giấy trong dầu thực vật sẽ sinh ra phần lớn là axit có phân tử lượng lớn chẳng hạn như axit oleic trong khi axit có phân tử lượng nhỏ (axit formic, acetic và levulinic) sẽ chiếm ưu thế trong trường hợp giấy tẩm dầu khoáng [10, 37]. Theo nghiên cứu từ Lundgaard và cộng sự cho thấy axit có phân tử lượng lớn ít gây thoái hóa giấy cách điện hơn so với axit có phân tử lượng nhỏ [38].

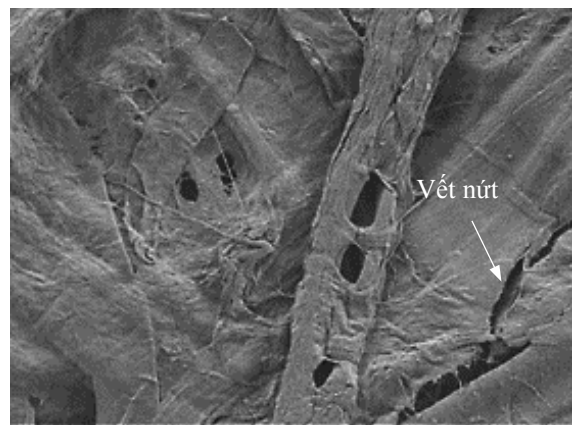


Hình 10. Ảnh hưởng của thời gian lão hóa đến độ polyme hóa (DP) của giấy ép cách điện (PB: giấy ép cách điện; NEA: dầu thực vật; Mineral: dầu khoáng) [32].

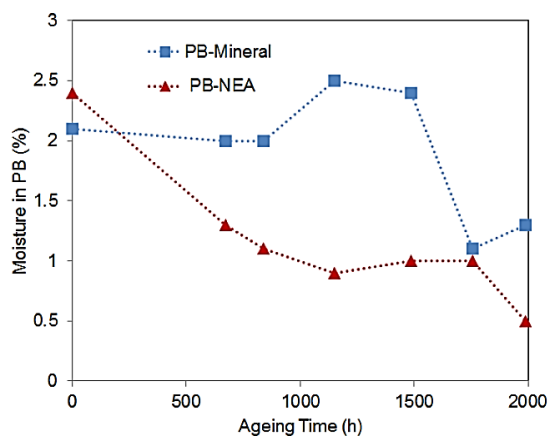
Do tính háo nước của dầu thực vật nên độ ẩm trong giấy tẩm dầu cách điện gốc thực vật sẽ giảm khi bị lão hóa trong khi nước có xu hướng bị giữ lại trong giấy đối với hệ thống giấy/dầu khoáng như Hình 13 [32]. Điều này làm cho giấy trở nên khô hơn khi lão hóa trong môi trường dầu thực vật. Kết quả tương tự đã được trình bày trong các nghiên cứu khác [10, 39]. Độ ẩm thấp hơn sẽ làm tăng tuổi thọ giấy do hạn chế được quá trình thủy phân giấy. Ngoài ra, độ ẩm thấp hơn sẽ có tác dụng bù trừ lại một phần sự sụt giảm độ bền điện gây ra bởi sự thoái hóa giấy như đề xuất tại nghiên cứu [35].



Hình 11. Ảnh hưởng của thời gian lão hóa đến độ bền kéo (TS) của giấy cách điện [33].



Hình 12. Hình SEM bề mặt giấy cách điện tẩm dầu sau khi lão hóa 35 ngày tại 130°C [35].



Hình 13. Ảnh hưởng của thời gian lão hóa đến độ ẩm của bìa cách điện (PB) (NEA: dầu thực vật; Mineral: dầu khoáng) [32].

2.7. Tiêu chuẩn dầu cách điện gốc thực vật

Dầu thực vật được sử dụng làm dầu cách điện khi đáp ứng được các yêu cầu theo qui định tại tiêu chuẩn ASTM D6871 hoặc IEC 62770 như Bảng 5. Ngoài ra, hướng dẫn sử dụng và kiểm tra tình trạng dầu cách điện gốc thực vật dùng cho máy biến áp được qui định tại IEEE C57.147.

Bảng 5. Tiêu chuẩn dầu cách điện gốc thực vật

TT	Chi tiêu	ASTM D6871	IEC 62770
1	Độ nhớt tại 40°C (cSt)	≤ 50	≤ 50
2	Điểm đông đặc (°C)	≤ -10	≤ -10
3	Điểm chớp cháy (°C)	≥ 275	≥ 250
4	Khối lượng riêng tại (g/ml) (40°C)	≤ 0,96	≤ 0,96
5	Hàm lượng nước (mg/kg)	≤ 200	≤ 200
6	Điện áp đánh thủng tại khe hở 2,5mm (kV)	≥ 30	≥ 35
7	Hệ số tổn hao điện môi tại (%) (25°C)	≤ 0,2	≤ 0,05
8	Hàm lượng lưu huỳnh ăn mòn	Không có	Không có
9	Chỉ số axit (mg KOH/g)	≤ 0,06	≤ 0,06

3. Cải thiện đặc tính của dầu cách điện gốc thực vật

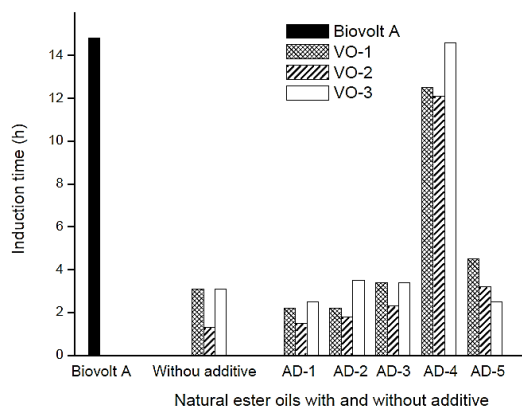
3.1. Ảnh hưởng của chất chống oxy hóa

Các chất phụ gia chống oxy hóa đã được sử dụng để cải thiện đặc tính của dầu thực vật và kết quả nghiên cứu cho thấy các chất chống oxy hóa có nguồn gốc tổng hợp có hiệu quả cao hơn so với các chất có nguồn gốc tự nhiên [13, 40]. Các chất chống oxy hóa sẽ phản ứng với gốc tự do được sinh ra do oxy tác động các phân tử chất béo không bão hòa. Điều này sẽ ngăn chặn các gốc tự do này hấp thụ điện tử từ các axit béo không bão hòa khác. Do đó sẽ hạn chế được quá trình tự oxy hóa [40]. Trong số các chất chống oxy hóa tổng hợp, tertiary butyl hydroxyquinone (TBHQ) có tác dụng hạn chế sự oxy hóa dầu thực vật vượt trội so với butylated hydroxytoluene (BHT), butylated hydroxyanisole (BHA) và propyl gallate (PG) [41]. Tuy nhiên nghiên cứu này sử dụng nồng độ chất oxy hóa (1-5 wt%) vượt quá nồng độ giới hạn khuyến nghị sử dụng (0,3 wt%) [42]. Bởi vì sự hiện diện của chất chống oxy hóa với nồng độ cao sẽ làm tăng độ dẫn điện [2]. Sự hiện diện của các chất chống oxy hóa (TBHQ và BHT) đã làm tăng độ bền oxy hóa của dầu thực vật như Hình 14 [13, 43]. Kết quả là đã làm chậm quá trình lão hóa dầu thực vật thể hiện qua việc giảm giá trị của các chỉ tiêu như độ nhớt động lực học, trị số axit và hệ số tổn hao điện môi của dầu sau lão hóa [13]. Ngoài ra, việc sử dụng BHT (0.5 wt%) cũng đã cải thiện độ bền oxy hóa của dầu hạt cải đạt tiêu chuẩn IEC-61125C [44]. Các chất phụ gia công nghiệp khác như Irganox L57 và L109 đã ghi nhận có tác động cải thiện độ bền oxy hóa của dầu thực vật [42]. Sự hiện diện của chất chống oxy hóa đặc biệt được điều chế từ phenol và amin đã tăng độ bền oxy hóa của dầu BIOTEMP đạt tiêu chuẩn IEC 61125C [2]. Ngoài việc tác động đến độ bền oxy hóa, chất chống oxy hóa đã có tác động đến các thông số vật lý và điện của dầu thực vật. Tuy nhiên mức độ tác động của chất phụ gia đến từng chỉ tiêu khác nhau là hoàn toàn khác nhau và phụ thuộc vào từng loại dầu thực vật [13, 45]. Ngoài ra, các kết quả thí nghiệm còn cho thấy khi sử dụng một lượng nhỏ các chất chống oxy hóa nêu

trên (0.1-0.5 wt%) có thể làm gia tăng đáng kể độ bền điện của dầu thực vật [46, 47]. Kết quả này là do các chất chống oxy hóa đều có nguồn gốc từ hợp chất thơm nên sẽ thúc đẩy quá trình hấp thu khí và phân nhánh dòng điện tích dẫn đến giảm tốc độ phát triển của dòng điện tích và tăng điện áp đánh thủng [48, 49].

3.2. Ảnh hưởng của chất hạ nhiệt độ đông đặc

Từ Bảng 2 ta thấy một trong những nhược điểm của dầu cách điện gốc thực vật là có nhiệt độ đông đặc cao gấp đôi so với dầu khoáng. Kết quả này làm tăng khả năng đông đặc của dầu thực vật khi máy biến áp hoạt động ở các khu vực có nhiệt độ thấp. Nhiệt độ đông đặc cao của dầu thực vật có thể hạ thấp bằng cách sử dụng chất phụ gia thích hợp như Lubrizol 7671A (polyalkyl methacrylate) và Viscoplex 10-930 (polymethyl methacrylate-PMMA) [41, 48]. Sự hiện diện của Lubrizol 7671A (1 wt%) đã hạ nhiệt độ của dầu *Jatropha* từ -6°C xuống -12°C trong khi Viscoplex 10-930 với nồng độ khoảng 1 wt% có thể giảm nhiệt độ đông đặc của dầu hướng dương, dầu thầu dầu, dầu đậu nành và dầu cải khoảng 10°C . PMMA hạ nhiệt độ đông đặc bằng cách ngăn cản sự phát triển các tinh thể có kích thước lớn trong quá trình đông đặc của dầu, thúc đẩy sự di động các nhân đông đặc, thay đổi kích thước và sự hình thành của các tinh thể và đồng tinh thể hóa [20].



Hình 14. Ảnh hưởng của phụ gia đến độ bền oxy hóa (VO-1: dầu đậu nành; VO-2: dầu gạo; VO-3: dầu hướng dương; AD-1: α -tocopherol; AD-2: BHA; AD-3: BHT; AD-4: TBHQ; AD-5: Baynox Plus) [13].

3.3. Ảnh hưởng của hạt nano

Một số loại hạt nano (Fe_3O_4 , TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO) đã được nghiên cứu để thay đổi đặc tính của dầu cọ và dầu hạt cải [44, 51, 52, 53]. Kết quả cho thấy hạt nano Fe_3O_4 (0,25 wt%) có thể tăng độ bền điện AC và xung sét của dầu hạt cải lần lượt là khoảng 20% và 37% [51]. Kết quả tương tự ghi nhận được đối với dầu cọ [52]. Các loại hạt nano còn lại cũng cho thấy hiệu quả đối với điện áp AC của dầu hạt cải như trình bày ở Bảng 6 và kết quả cho thấy hạt TiO_2 có hiệu quả cao hơn so với các loại hạt nano còn lại. Sự gia tăng độ bền điện của dầu dưới tác động của hạt nano là do sự giảm tập trung điện tích dẫn đến điện trường bên trong khe hở điện cực đồng nhất hơn [54]. Ngoài ảnh hưởng đến độ bền điện, hạt nano còn ảnh hưởng đến điện trở suất và hệ số tổn hao điện môi. Mặc dù cả Fe_3O_4 và TiO_2 đều gia tăng điện trở suất nhưng Fe_3O_4 lại tăng luôn hệ số tổn hao điện môi trong khi TiO_2 giảm đáng kể chỉ tiêu này của dầu hạt cải [44, 53].

Bảng 6. Ảnh hưởng của hạt nano đến điện áp đánh thủng của dầu hạt cải [44]

TT	Hạt nano	Hàm lượng [wt%]	Điện áp đánh thủng (kV/2,5 mm)
1	Dầu nguyên chất	0	60
2	TiO_2	0,25	80,1
3	Al_2O_3	0,2	73,2
4	SiO_2	0,2	65,9
5	ZnO	0,3	72

3.4. Ảnh hưởng của chất có điện thế ion hóa thấp

Dầu cách điện gốc thực vật đã thể hiện độ bền điện vượt trội so với dầu khoáng được trình bày ở các nghiên cứu [2-5] và các bảng thông số kỹ thuật từ nhà sản xuất [6, 7]. Tuy nhiên khi chịu tác động của xung quá điện áp với khe hở điện cực lớn (5-10 cm), khả năng kháng dòng điện tích loại nhanh của dầu thực vật kém xa so với dầu khoáng [49]. Trị số điện áp làm xuất hiện dòng điện tích nhanh của dầu thực vật chỉ bằng khoảng 40-70% so với dầu khoáng [49]. Điều

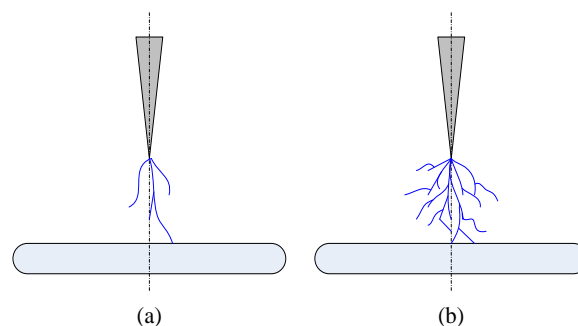
này có nghĩa là khả năng xảy ra phóng điện đánh thủng dầu cách điện gốc thực vật dưới tác động của xung quá điện áp sẽ cao hơn so với dầu cách điện gốc khoáng. Kết quả này là do dầu cách điện gốc thực vật không chứa các hợp chất thơm nên dòng điện tích ít bị phân nhánh nhưng lại phát ra xung ánh sáng có tần số cao hơn so với dầu cách điện gốc khoáng khi bị tác động của quá điện áp [55]. Kết quả này làm phạm vi ứng dụng thành công của dầu cách điện gốc thực vật chỉ giới hạn trong các máy biến áp ở cấp phân phối. Tuy nhiên ở cấp truyền tải cũng đã thử nghiệm sử dụng dầu cách điện gốc thực vật ở một số máy biến áp [9, 56, 57]. Một trong những biện pháp để cải thiện khả năng ngăn chặn sự xuất hiện của dòng điện tích loại nhanh là sử dụng các chất phụ gia có năng lượng ion hóa và năng lượng mức kích thích thứ nhất thấp như dimethylaniline - DMA (IP = 7.1 eV) and azobenzene - Azo (IP = 7.8-8.6 eV) [49]. Các chất phụ gia này đã làm tăng đáng kể sự phân nhánh của dòng điện tích khi phát triển trong khe hở điện cực chứa dầu BIOTEMP như Hình 15 dẫn đến làm giảm điện trường tại đầu các nhánh của dòng điện tích do tác động tương hỗ giữa các nhánh. Kết quả là làm giảm vận tốc của dòng điện tích và gia tăng mạnh giá trị điện áp, làm xuất hiện dòng điện tích loại nhanh như Hình 16 [49]. Mặc dù có điện thế ion hóa cao hơn dimethylaniline nhưng năng lượng mức kích thích thứ nhất của azobenzene lại thấp hơn nhiều (2.2 eV so với 4 eV) dẫn đến hiệu quả kháng dòng điện tích loại nhanh của azobenzene cao hơn nhiều so với dimethylaniline [49]. Kết quả này phù hợp với giả thuyết sự phát triển của dòng điện tích trong dầu cách điện có liên quan đến sự ion hóa [49].

4. Kết quả nghiên cứu trong nước

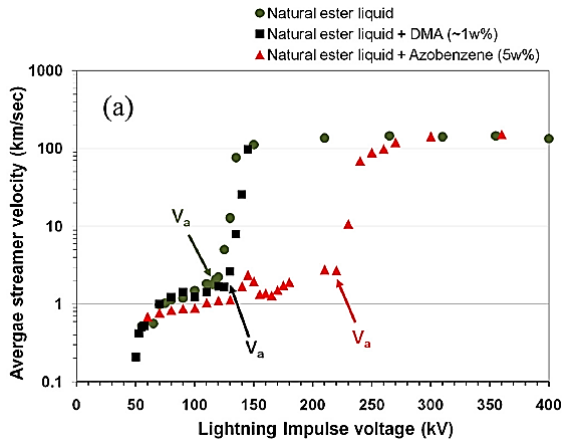
Nước ta có nguồn nguyên liệu dồi dào để sản xuất dầu thực vật. Trong số đó, dầu từ cám gạo, bắp, đậu phộng, cơm dừa và hạt cải được chọn để nghiên cứu vì có các thông số vật lý, hóa học và điện phù hợp theo tiêu chuẩn ASTM D6871

như Bảng 7 cũng như có giá thành không quá đắt so với dầu khoáng. Ta thấy tất cả các thông số của dầu bắp và dầu cải đều đạt tiêu chuẩn qui định. Riêng dầu gạo, dầu phộng và dầu dừa có chỉ tiêu nhiệt độ đông đặc không đạt tiêu chuẩn. Tuy nhiên dầu dừa có đặc điểm là chứa hàm lượng cao các axit béo bão hòa nên độ bền oxy hóa rất cao như trình bày Bảng 2. Ngoài ra, giá thành dầu dừa xấp xỉ dầu gạo và dầu hạt cải nhưng lại thấp hơn rất nhiều so với dầu bắp và dầu phộng. Do đó việc pha trộn giữa các loại dầu nêu trên với tỉ lệ thích hợp cùng với chất phụ gia sẽ tạo nên được một loại dầu cách điện gốc thực vật đạt tiêu chuẩn.

Các kết quả thí nghiệm cho thấy sau khi bị lão hóa ở 115°C trong vòng 96h, cả dầu gạo, dầu bắp, dầu phộng và dầu dừa đều bị sậm màu do tác động của sự oxy hóa [14, 15, 58]. Điện áp đánh thủng của dầu sau lão hóa giảm trong khi chỉ số axit, hệ số tổn hao điện môi và độ nhớt đều tăng [16]. Chất phụ gia TBHQ (0,5 wt%) được ghi nhận có tác động cải thiện điện áp đánh thủng và độ nhớt của các loại dầu thực vật đã khảo sát sau khi bị lão hóa [16]. Ngoài ra, các loại dầu thực vật nêu trên đều cho thấy mức độ tương thích cao với giấy cách điện, bìa cách điện và men cách điện [16, 17]. Điện áp đánh thủng của giấy cách điện, bìa cách điện và men cách điện tẩm dầu thực vật tương đương với trường hợp tẩm dầu khoáng [16, 17].



Hình 15. Sự phát triển của dòng điện tích trong dầu BIOTEMP không có chất phụ gia (a) và có chất phụ gia (b) dưới tác động của xung sét [49].



Hình 16. Ảnh hưởng của chất phụ gia đến vận tốc dòng điện tích trong dầu BIOTEMP [49].

5. Kết luận

Dầu cách điện gốc thực vật được xem như là giải pháp thân thiện môi trường thay thế dầu cách điện gốc khoáng. Đặc biệt tại các khu vực có quy định bảo vệ môi trường nghiêm ngặt hoặc có yêu cầu chống cháy nổ cao. Bên cạnh các ưu điểm như độ phân hủy gốc thực vật cao, nhiệt độ chớp cháy cao và tính háo nước, dầu cách điện gốc thực vật cần phải được cải tiến để hạn chế các nhược điểm như dễ bị oxy hóa, độ nhớt cao, nhiệt độ đông đặc cao cũng như khả năng kháng dòng điện tích nhanh kém. Nước ta có nguồn nguyên liệu phong phú để sản xuất dầu thực vật như cơm dừa, cám gạo, đậu phộng, bắp, hạt cải... Do đó tiềm năng phát triển các loại dầu cách điện gốc thực vật dựa vào nguồn dầu thực vật tinh chế sẵn có trong nước kết hợp với các chất phụ gia là rất triển vọng và thiết thực để thay thế dầu cách điện gốc khoáng trong tương lai.

Bảng 7. Thông số vật lý, hóa học và điện của dầu gạo, dầu bắp, dầu phộng, dầu dừa và dầu cải [14-17, 58]

Chỉ tiêu	Loại dầu					ASTM D6871
	Dầu gạo	Dầu bắp	Dầu phộng	Dầu dừa	Dầu cải	
Độ nhớt tại 40°C (cSt)	36,9	32,9	34,0	25,9	35,2	≤ 50
Điểm đông đặc (°C)	0	-12	0	18	-21	≤ -10

Điểm chớp cháy (°C)	328	329	336	314	342	≥ 275
Khối lượng riêng tại 40°C (g/ml)	0,9170	0,916	0,911	0,919	0,92	≤ 0,96
Hàm lượng nước (mg/kg)	106,1	77,9	88,2	93,4	95,1	≤ 200
Điện áp đánh thủng tại khe hở 2,5 mm (kV)	49,5	40,7	41,8	40,3	41,0	≥ 30
Hệ số tổn hao điện môi tại 25°C (%)	0,12	0,15	0,17	0,16	0,14	≤ 0,2
Hàm lượng lưu huỳnh ăn mòn	KPH	KPH	KPH	KPH	KPH	Không có
Chỉ số axit (mg KOH/g)	0,0060	0,008	0,008	0,01	0,01	≤ 0,06

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.99-2015.57.

Tài liệu tham khảo

- [1] Fotana, 50 years in the development of insulating liquids, IEEE Elec. Ins. Mag 29 (2013) 13-25. <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6585853>.
- [2] T.V. Oommen, Vegetable oils for liquid-filled transformer, IEEE Elec. Ins. Mag 18 (2002) 6-16. <https://doi.org/10.1109/57.981322>.
- [3] Y. Bertrand and L.C. Hoang, Vegetable Oils as Substitute for Mineral Oils, IEEE Proceeding of the 7th international Conference on Properties and Application Dielectric Materials, Nagoya, Japan, 2003. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2003.1218460>.
- [4] D. Martin, Z.D. Wang, A.W. Darwin and I. James, A comparative study of the chemical stability of esters for use in large power transformers, Annual report of CEIDP, 2006. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2006.311977>.
- [5] C.P. McShane, J.L. Corkran, K.J. Rapp and J. Luksich, Natural ester dielectric fluid development, IEEE/PES Transmission & Distribution conference, USA, 2006. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2006.311977>.

- [6] M. Hrkac, P. Papageorgiou, I. Kosmoglou, G. Miatto, BIOTEMP® Transformer Technology for Innovative Compact Substation, 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, Agia Napa, Cyprus, 2010. <https://doi.org/10.1049/cp.2010.0954>.
- [7] Cooper, Envirotemp®FR3 fluid formulated for performance, 2018. <https://www.cargill.com/doc/1432076501275/envirotemp-fr3-brochure.pdf> (accessed 4 December 2019).
- [8] Working group A2.35, Technical brochure 436-Experiences in Service with New Insulating Liquids, Cigre, 2010. <https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/New Experiences in Service with New Insulating Liquids.pdf> (accessed 4 December 2019).
- [9] K. J. Rapp, J. Luksich and A. Sbravati, Application of natural ester insulating liquids in power transformers, Proceedings of My Transfo, 2014. <https://smsystems.co.in/Natural Ester Power Transformers My Transfo 2014Final.pdf> (accessed 4 December 2019).
- [10] R. Liao, J. Hao, G. Chen, Z. Ma, L. Yang, A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul 18 (2011) 1626-1637. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.6032833>
- [11] S. Rahmat, Suwarno and S. Aminuddin, Effects of thermal ageing on the dielectric properties and dissolved gas analysis in ester from palm oil and kraft composite paper insulation, IEEE ICPEIRE, Indonesia, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICPEIRE.2016.7904873>.
- [12] M&I MATERIALS, MIDEL eN 1215, 2018. <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/midel-en-1215-product-brochure.pdf> (accessed 4 December 2019).
- [13] 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 20 (2013) 1395-1401. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6571461>.
- [14] Nguyen Van Dung, A study on breakdown properties of rice bran oil, Journal of Science and Technology-Da Nang University 7 (2016) 11-14. (in Vietnamese). http://tailieuso.udn.vn/handle/TTHL_125/8625.
- [15] Nguyen Van Dung, A study on breakdown properties of corn oil and peanut oil, Journal of Science and Technology-Da Nang University 3 (2017) 34-37. (in Vietnamese). http://tailieuso.udn.vn/handle/TTHL_125/8241.
- [16] D.V. Nguyen, L.P. Nguyen, T.N. Quach, An investigation on breakdown properties of paper insulators impregnated with vegetable oils for transformers, IET Science, Measurement & Technology 13(2019), 1352-1361. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5580>.
- [17] N.V. Dung, N.P. Long and L.Q. Khuong, Influence of vegetable oils on breakdown voltages of enamel insulation of transformer wire, IEEE GTSD 2018, Vietnam, 2018. <https://doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595539>.
- [18] A. Darwin, C. Perrier, P. Folliot, The use of natural ester fluids in transformers, Proceeding of Matpost 07, 2007.
- [19] S. Salaji, G. Ajithkumar, N. H. Jayadas, Pour point of vegetable oil based lubricants: effect of polymorphism, Technology letter 1 (2014) 23-37.
- [20] S. Asadauskas, S. Z. Erhan, Depression of pour points of vegetable oils by blending with diluents used for biodegradable lubricants, JAOCS 76 (1999) 313-316. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0237-6>.
- [21] Metrohm, Application bulletin 204/2e, Oxidation stability of oils and fats-Rancimat method. <https://www.metrohm.com/en-vn/applications/AB-204> (accessed 4 December 2019).
- [22] S. Tenbohlen, and M. Koch, Ageing performance and moisture solubility of vegetable oils for power transformers, IEEE Trans. Power. Del 25 (2010) 825-830. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2034747>.
- [23] Nynas Nytro 10XN product data sheet. <https://www.nynas.com/en/product-areas/transformer-oils/oils/nytro-10xn/> (accessed 4 December 2019).
- [24] S.A. Ghani, N.A. Muhamad, Z.B.A. Noorden, H. Zainuddin, N.F. Ambo, Impact of using antioxidants on the breakdown voltage properties of natural ester insulation oil, International multi-disciplinary graduate conference of Terengganu, Malaysia, 2016. https://www.researchgate.net/publication/309732973_Impact_of_Using_Antioxidants_on_the_Breakdown_Voltage_Properties_of_Natural_Ester_Insulation_Oil (accessed 4 December 2019).
- [25] EPA, 2002, Environmental technology verification report on BIOTEMP vegetable oil based insulating dielectric fluid. <https://archive.epa.gov/research/nrmrl/archive-etv/web/pdf/06vsabb.pdf> (accessed 4 December 2019).
- [26] A. Beroual, U. Khaled, P.S. M. Noah, H. Sitorus, Comparative study of breakdown voltage of

- mineral oil, synthetic and natural oils and based mineral oil mixtures under AC and DC voltages, *Energies*, 10 (2017) 1-17. <https://doi.org/10.3390/en10040511>.
- [27] X. Wang, Z. D. Wang, Particle effect on breakdown voltage of mineral and ester based transformer oils, Annual report of CEIDP, Canada, 2008. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2008.4772859>.
- [28] Q. Liu, Z. Wang, Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse voltage, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 18 (2011) 285-294. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5704520>.
- [29] L. Lewand, Doble engineering, Understanding water in transformer systems, Neta World report, 2002. <https://www.scribd.com/document/49912551/Understanding-Water-in-Transformer-Systems> (accessed 4 December 2019).
- [30] M.H.A. Hamid, M.T. Ishak, M.F.M. Din, N.S. Suhaimi, N.I.A. Katim, Dielectric properties of natural ester oils used for transformer application under temperature variation, *Proceeding of PECon, Malaysia*, 2016. <https://doi.org/10.1109/PECON.2016.7951472>.
- [31] C. Perrier, A. Beroual, Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester, and silicone oils, *IEEE Elec. Ins. Mag* 25 (2009) 6-13. <https://doi.org/10.1109/MEI.2009.5313705>.
- [32] K. Bandara, C. Ekanayake, T. Saha, H. Ma, Performance of natural ester as a transformer oil in moisture-rich environments, *Energies* 9 (2016) 1-13. <https://doi.org/10.3390/en9040258>.
- [33] A. Munajad, C. Subroto, Suwarno, Study on the effect of thermal ageing on insulating paper for high voltage transformer composite with natural ester from palm oil using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), *Energies* 10 (2017) 1-15. <https://doi.org/10.3390/en10111857>.
- [34] A.P. McShane, K. J. Rapp, J. L. Corkran, G. A. Gauger, J. Luksich, Ageing of paper insulation in natural ester dielectric fluid, *Proceeding of 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing new perspectives, USA*, 2001. <https://doi.org/10.1109/TDC.2001.971319>.
- [35] J. Zhang, F. Wang, J. Li, H. Ran, X. Li, Q. Fu, Breakdown voltage and its influencing factors of thermally aged oil-impregnated paper at pulsating DC voltage, *Energies* 10 (2017) 1-16. <https://doi.org/10.3390/en10091411>.
- [36] CIGRE, Ageing of cellulose in mineral oil insulated transformers, *CIGRE Brochure 323*, 2007. <https://www.academia.edu/37442177/323-AGEING-OF-CELLULOSE-IN-MINERAL-OIL-INSULATED-TRANSFORMERS> (accessed 4 December 2019).
- [37] L.E. Lundgaard, W. Hansen, S. Ingebrigtsen, Ageing of mineral oil impregnated cellulose by acid catalysis, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 15 (2008) 540-546. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4483475>.
- [38] L.E. Lundgaard, W. Hansen, S. Ingebrigtsen, D. Linhjell, M. Dahlund, Ageing of Kraft paper by acid catalyzed hydrolysis, *IEEE ICDL, Portugal*, 2005. <https://doi.org/10.1109/ICDL.2005.1490105>.
- [39] K.J. Rapp, C.P. McShane, J. Luksich, Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper, *IEEE ICDL, Portugal*, 2005. <https://doi.org/10.1109/ICDL.2005.1490108>.
- [40] E. O. Aluyor, M.O. Jesu, The use of antioxidants in vegetable oils-A review, *African Journal of Biotechnology* 7 (2008) 4836-4842. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/59677/47963> (accessed 4 December 2019).
- [41] A.A. Abdelmalik, Chemically modified palm kernel oil ester: a possible sustainable alternative insulating fluid, *Sustain. Mater. Technol* 1-2 (2014) 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.06.001>.
- [42] T.V. Oommen, C.C. Claiborne, E.J. Walsh and J.P. Baker, A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification, *IEEE CEIDP, Canada*, 2000. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2000.885288>.
- [43] N. Belrán, E. Palacios, G. Blass, Potential of *Jatropha curcas* oil as a dielectric fluid for power transformers, *IEEE Electr. Insul. Mag* 33 (2017) 8-15. <https://doi.org/10.1109/MEI.2017.7866674>.
- [44] V. Mentlik, P. Trnka, J. Hornak, P. Totzauer, Development of a biodegradable electro-insulating liquid and its subsequent modification by nanoparticles, *Energies* 11 (2018) 1-16. <https://doi.org/10.3390/en11030508>.
- [45] M. Karthik, M.W. Iruthayarajan and M. Bakruthen, Investigation of vegetable oil blended with antioxidant, *IEEE ICECCT, India*, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2015.7225935>.
- [46] A. Raymon, P.S. Pakianathan, M.P.E. Rajamani, R. Karthik, Enhancing the critical characteristics of natural esters with antioxidants for power

- transformer application, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 20 (2013) 899-912. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6518959>.
- [47] S.S. Kumar, M.W. Iruthayarajan, M. Bakrtheen, S.G. Kannan, Effect of antioxidants on critical properties of natural esters for liquid insulations, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 23 (2016) 2068-2078. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.7556480>.
- [48] A.A. Zaky, I.Y. Megahed, C. Evangelou, The effect of organic additives on the breakdown and gassing properties of mineral oils, *J. Phys. D Appl. Phys* 9 (1976) 841-849. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/9/5/017>.
- [49] 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* 102 (2013) 1-4. <https://doi.org/10.1063/1.4803710>.
- [50] L.A. Quinchia, M.A. Delgado, J.M. Franco, H.A. Spikes, C. Gallegos, Low-temperature flow behaviour of vegetable oil-based lubricants, *Ind. Crops Prod* 37 (2012) 383-388. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.021>.
- [51] J. Li, Z. Zhang, P. Zou, S. Grzybowski, M. Zahn, Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties, *IEEE Electr. Insul. Mag* 28 (2012) 43-50. <https://doi.org/10.1109/MEI.2012.6268441>.
- [52] M.S. Mohamad, H. Zainuddin, S.A. Ghani, I.S. Chairul, AC breakdown of natural ester mixed with iron oxide for oil-immersed power transformer application, *IEEE SCOR ED*, Malaysia, 2015. <https://doi.org/10.1109/SCOR ED.2015.7449315>.
- [53] P. Zou, J. Li, C. X. Sun, Z. T. Zhang, R. J. Liao, Dielectric properties and electrodynamic process of natural ester-based insulating nanofluid, *Mod. Phys. Lett. B* 25 (2011) 2021-2031. <https://doi.org/10.1142/S0217984911027285>.
- [54] Y. Zhong, Y. Lv, C. Li, Y. Du, M. Chen, S. Zhang, Y. Zhou, L. Chen, Insulating properties and charge characteristics of natural ester fluid modified by TiO₂ semiconductive nanoparticles, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* 2 (2013) 135-140. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6451351>.
- [55] C. Tran Duy, O. Lesaint, A. Denat, N. Bonifaci, Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage, *IEEE TDEI* 16 (2009) 1582-1593. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.5361578>.
- [56] J.C. Mendes et al., Advanced application of a natural ester vegetable oil in a HV power transformer, *CIGRE*, paper A2-101, 2008. <https://library.e.abb.com/public/d9c7f1ba8834e4adc12577bb0037033c/Cigre%20Session%20P aper.pdf> (accessed 4 December 2019).
- [57] Cooper power systems, B900-04062, E-FR3 large and medium power transformers users list (Retrofill & New installations), 2007.
- [58] Nguyen Van Dung, Nguyen Hoai Trung, A study on breakdown properties of coconut oil, *Vietnam Journal of Science and Technology* 57 (2019) 320-328. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/57/3/13212>.