مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد(2) – 2025: 201–212

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (2) -2025: 201-212

أثر التقادم الحراري على الخصائص الكهربائية للبولي فينيل كلوريد (PVC)[1]

علي عبده السيد*[1]

[1]* أستاذ، دكتور، مهندس في قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق. (Orchid iDhttps://orcid.org/0000-0003-4577-650X).

الملخص:

استخدمت المواد البوليميرية كمواد عازلة في كابلات التوتر المنخفض والمتوسط والعالي وفي صناعة علب النهاية وعلب الوصل منذ وقت طويل. وبدأت تأخذ هذه المواد مكان العوازل التقليدية السيراميكية نظراً لما تتمتع به من خواص كهربائية وفيزيائية جيدة كخاصية صد الماء والخفة والمرونة وعدم قابلية الكسر و سهولة النقل والتركيب. يستخدم في صناعة الكابلات الكهربائية: البولي فينيل كلوريد (PVC)، والبولي أيتيلين (PE)، والبولي أيتيلين المشبك (XLPE). حيث تستخدم مادة البولي فينيل كلوريد (PVC) في عزل كابلات التوتر المنخفض، بينما نستخدم مادة البولي ايتيلين في عزل كابلات التوتر المتوسط والعالي وذلك لما تحققه هذه المواد من خواص كهربائية جيدة.

يتعرض البولي فينيل كلوريد (PVC) في الحياة العملية إلى كافة الظروف المحيطية من حرارة وتلوث ورطوبة وضغط، وتؤثر هذه الظروف على خواصه. لذلك تم أخذ عدد من العينات من البولي فينيل كلوريد (PVC) وتعريضها للتقادم الحراري لأزمنة مختلفة ثم أجريت دراسة على الخواص الكهربائية للعينات المتقادمة حرارياً ومقارنتها مع العينة العذراء (الشاهد).

تمت مناقشة الخواص الكهربائية مع زيادة فترة التقادم في الفرن الحراري وشُرحت الأسباب المؤدية لتلك التغيرات التي طرأت على الخواص المذكورة.

الكلمات المفتاحية: توتر عالي، ثابت العزل، خواص البولي فينيل كلوريد الكهربائية، التقادم الحراري.

تاريخ الايداع: 2023/1/4
تاريخ القبول: 2023/2/1

حقوق النشر: جامعة دمشق –سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب
CC BY-NC-SA

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.pHp/index/index
ISSN (online): 2789-6854

The effect of thermal aging on the electrical properties of polyvinyl chloride[1] (PVC)

ALI Abdo ALSAYED*[1]

*1. Professor in Electric Power Department - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - University of Damascus.

(Orchid ID https://orcid.org/0000-0003-4577-650X)

Received: 4/1/2023
Accepted: 1/2/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract:

Polymeric materials have been used as insulation materials in medium and high voltage cables and in the manufacture of end boxes and junction boxes for a long time. These materials began to take the place of traditional ceramic insulators due to their good electrical and physical properties such as hydrophobicity, lightness, flexibility, non-fracture and ease of transportation and installation. One of the most important materials, which is used in the manufacture of electrical cables are: polyvinyl chloride (PVC), polyethylene (PE), and clamp polyethylene (XLPE). Where polyvinyl chloride (PVC) is used to insulate low voltage cables, while we use polyethylene to insulate medium and high voltage cables due to the good electrical and non-electrical properties of these materials.

In practical life, organic materials are exposed to all environmental conditions such as heat, pollution, moisture and pressure. These conditions affect the properties of organic materials and decline in these properties. Therefore, a number of PVC samples were taken and subjected to thermal aging for different times from one sample to another. Then a study was conducted on the electrical and mechanical properties of the thermally treated samples and compared with the virgin sample (the witness).

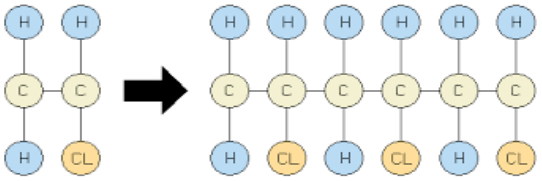
The electrical and mechanical properties are discussed with the increase in the aging period of the oven and the reasons, which caused these changes in the mentioned properties, are explained.

Key words: High voltage, PVC's electrical properties, thermal aging,

المقدمة:

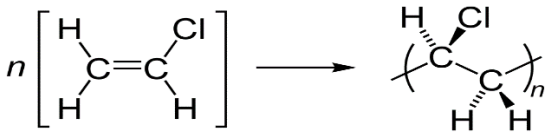
البولي فينيل كلوريد (PVC) [1] هو مادة بلاستيكية شائعة الاستعمال وهو من أكثر المنتجات المستخدمة في الصناعة الكيميائية. ويعتبر البولي فينيل كلوريد من أقدم اللدائن البلاستيكية الحرارية وقد تطور في السنوات الخمسين الأخيرة ليصبح أكثر المواد البلاستيكية استخداما ويعود السبب في هذا الى قابلية انسجامه مع عدد كبير من المواد المضافة اليه لتعديل خواصه. وفي السنوات الأخيرة قد استبدل البولي فينيل كلوريد مكان مواد إنشائية كثيرة في العديد من المناطق على الرغم من وجود مخاوف حول تأثير البولي فينيل كلوريد على البيئة و الصحة البشرية.

يعتبر هذا البوليمير غير مستقر اتجاه الضوء والحرارة وهذا يؤدي إلى تغيرات واسعة في البنية وذلك بسبب إزالة HClوهذا يؤثر أيضاً على خواصه الفيزيائية والكيميائية، ولكن فيما بعد تم تعديل خواصه الفيزيائية والكيميائية وذلك بخلطه مع بعض المواد الكيميائية أثناء تحضيره.



الشكل (1) البنية الجزيئية للبولي فينيل كلوريد

يحضر بوليمير البولي فينيل كلوريد من مونوميركلور الفينيل، وهو مركب هام جداً في الصناعة. (البوليمير هو المركب الكيميائي الذي ينتج جزيئه من تكرار لمجموعة ذرات يطلق عليها المونومير<احادي الحد> وهي جزيئة بسيطة قادرة على الاتحاد مع جزيئات مماثلة لها أو مختلفة عنها لتشكل البوليمير)، والشكل التالي يوضح كيفية بلمرة الفينيل كلوريد:



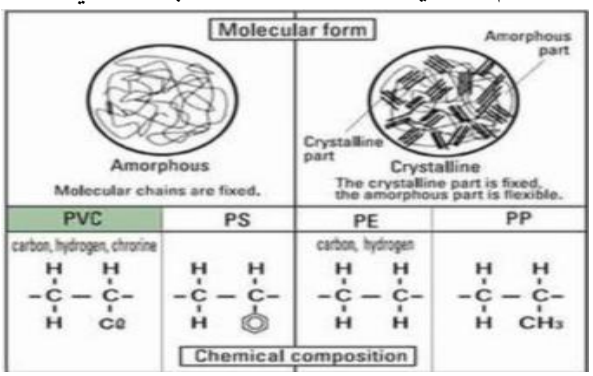
الشكل (2) كيفية بلمرة الفينيل كلوريد

يبلغ الإنتاج العالمي السنوي لفينيل كلوريد حوالي 17 مليون طن في عام 1985 وأكثر من 26 مليون طن في عام 1995 حيث أن أكثر من 64% منه ينتج في أوروبا وأمريكا. إن حوالي 95% من إنتاج العالم من فينيل كلوريد يستخدم لإنتاج البولي فينيل كلوريد.

1- تاريخ بولي فينيل كلوريد:[1]

اكتشف البولي فينيل كلوريد في القرن التاسع عشر أولاً في عام 1835 وذلك من قبل العالم(ريغنالت) ثم في عام 1872 من قبل العالم (بومان) وفي كلا الاكتشافين ظهر البوليمير كمادة بيضاء صلبة داخل قوارير فينيل كلوريد التي تركت معرضة لضوء الشمس.وفي مطلع القرن العشرين حاول العالم الروسي (أوستروميسلوسكي) استعمال البولي فينيل كلوريد في المنتجات التجارية لكن الصعوبات التي واجهته في معالجته كانت كبيرة وأحياناً كان يحصل على بوليمير هش.

في عام 1926 طور (سيمون) طريقة لمعالجة البولي فينيل كلوريد بمزجه بالمضافات المختلفة والنتيجة كانت مادة أكثر مرونة وسهولة في التصنيع وهذه الطريقة جعلت منه مادة ذات استعمال واسع في كل جوانب الحياة. كل هذه الأبحاث ساعدت في اكتشاف البنية الجزيئية للبولي فينيل كلوريد وطرق تحضيره والشكل التالي يوضح بنية كل من البولي فينيل كلوريد (PVC) والبولي ايتيلين (PE):



الشكل (3) مقارنة بين جزيء PVC وجزيء PE

2- التركيب الكيميائي للبولي فينيل كلوريد: [1]

تتعلق صفات البولي فينيل كلوريد PVC الميكانيكية والفيزيائية على تركيبه وعلى طرق إنتاج هذا المركب. وتُحدد الصفات الكيميائية للبولي فينيل كلوريد المتجانس بالبنية الكيميائية الأساسية لجزيء البوليمير ولكن من الأكيد أن بعض الصفات الكيميائية (كالثبوتية الحرارية) تتأثر بوجود عدم انتظام في البنية مثل السلاسل الجانبية وعدم الإشباع.

يتميز البولي فينيل كلوريد بوزن جزيئي كبير، ففي درجات الحرارة العادية فإن عدد كبير من المركبات العضوية ليس لها تأثير عليه أما المركبات التي تؤثر عليه هي الهيدروكربونات العطرية الكلورية و بعض الاستيرات وفيمايلي الصيغ الكيميائية للبولي فينيل كلوريد.

$$CH_3-CH=\underset{\downarrow}{C}-CH_2-CH_3 \gg CH_3-\underset{\downarrow}{CH}-CH_2-CH_3$$
$$Cl \qquad\qquad Cl$$

$$CH_3-\underset{\downarrow}{CH}-CH_2-\underset{\downarrow}{CH}-CH_3 \approx$$
$$Cl \qquad Cl$$

$$CH_3-\underset{\downarrow}{CH}-CH_2-\underset{\downarrow}{CH}-CH_2-\underset{\downarrow}{CH}-CH_3 \geq$$
$$Cl \qquad Cl \qquad Cl$$

$$CH_2=CH-\underset{\downarrow}{CH}-CH_2-CH_3 > CH_3-\overset{\uparrow C_2H_5}{\underset{\downarrow}{C}}-CH_2-CH_3$$
$$Cl \qquad\qquad Cl$$

$$CH_3-CH=CH-\underset{\downarrow}{CH}-CH_2-CH_3 >$$
$$Cl$$

$$CH_3-CH=CH-CH=CH-\underset{\downarrow}{CH}-CH_3$$
$$Cl$$

الشكل (4) البنية الجزئية ل PVC

3- خواص البولي فينيل كلوريد (PVC): [2]

يتمتع البولي فينيل كلوريد بالمواصفات التالية:

1- الكتلة الحجمية (1.4 -1.6)

2- مجال العمل الحراري °C 60 - 105

3- مقاومة الإنضغاط : Kgf/cm² 87.5

4- الحرارة النوعية: cal/cm 0.4

5- المقاومة الحجمية : (12-14)

6- قابلية الشد : N/MM^2 2.6

7- معامل التمدد الحراري : 80×10^{-6}

8- الكثافة(الوزن النوعي): g/cm^3 1.38

4 -استخدامات البولي فينيل كلوريد:[2]

أثر التقادم الحراري على الخصائص الكهربائية للبولي فينيل كلوريد (PVC)

يستخدم البولي فينيل كلوريد في عزل الأبنية والمعادن والألياف الزجاجية و لإنتاج ورق الجدران و عوازل للأرض وفي صناعة الأقمشة المشمعة وكل استخدام له طريقة تحضير خاصة.

الشكل (5) منزل كامل مصنوع من البولي فينيل كلوريد

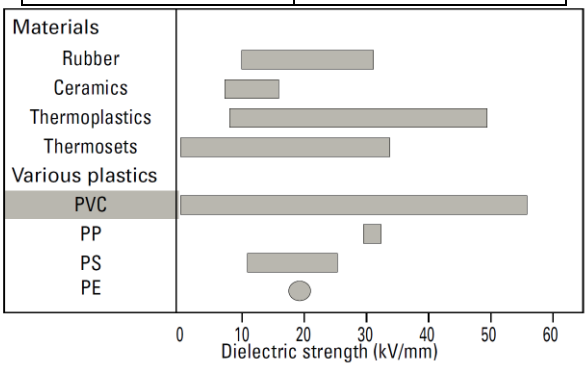
كما أن لهذه المادة البلاستيكية استخدامات كهربائية كبيرة وخصوصاً في مجال التوتر العالي ولأن هذه المادة. تتمتع بمقاومة عزل كهربائية عالية من رتبة (10^{14}-10^{16} Ω/cm). تستخدم كمادة عازلة في الكابلات الكهربائية كما تستخدم في صناعة عوازل العبور، كما تستخدم هذه المادة في عزل أجزاء محولات التوتر العالي عن بعضها البعض. والجدول(1) يوضح مقاومة العزل الكهربائية لبعض المواد العازلة. ويبين الشكل (5) المتانة الكهربائية لبعض المواد العازلة.

الجدول(1) المقاومة الكهربائية لبعض المواد العازلة

المادة	المقاومة (Ω-cm))
PE	10^{16}~10^{29}
PP	10^{16}~10^{29}
PS	10^{17}~10^{19}
Tetrafluoroethylene	10^{15}~10^{19}
PVC	10^{14}~10^{16}
Methacrylate	10^{14}~10^{15}
PU	10^{13}~10^{15}
Nylon	10^{13}~10^{14}

السيد

Polyester	10^{12}~10^{14}
Neoprene	10^{11}~10^{13}
Epoxy resin	10^{8}~10^{14}



الشكل (6) المتانة الكهربائية لبعض المواد العازلة

5- أهم صفات البولي فنيل الكلوريد:[1]

- مقاوم للاحتراق ولكن يلين مع ارتفاع درجة الحرارة.
- متانة كيميائية جيدة، (متين ضد الانفراغات الجزئية

كما أنه مقاومة للأوزون والأحماض والقلويات والكحول ومعظم المحاليل). يوضح الجدول(2) المتانة الكيميائية للبولي فينيل كلوريد ولبعض العوازل ومقاومتها للأملاح والأسيدات.

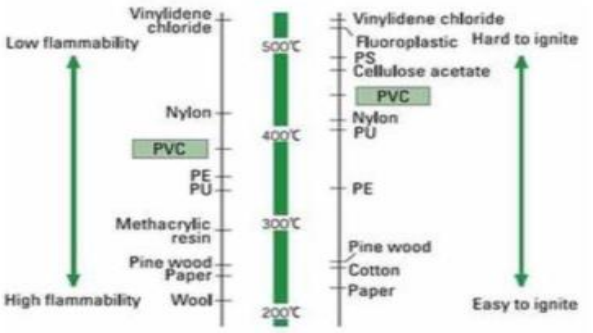
الجدول(2) مقارنة بين بعض المواد العازلة من حيث الصفات الكيميائية

Plastics	Relative resistance				
	Organic Solvents	Salts	Alkali	Acids	Oxidizing agents
Nylon 66	7	10	7	3	2
PC	6	10	1	7	6
Polyester (chemical	6	10	4	7	6
resistant)	5	10	10	10	8
PE	10	10	10	10	10
Poly-fluorocarbon	4	10	7	9	4
Polymethyl	5	10	10	10	8
methacrylate	2	10	10	10	4
PP	8	10	6	6	4
PS	4	10	9	10	6
PU	6	10	10	10	9

PVC (flexible)	4	10	8	9	4
PVC (rigid)	6	10	7	9	2
ABS					
Epoxy resin					

- عند درجة حرارة أقل من 60°C يكون صلبا وقليل المرونة وبتجاوز هذه الدرجة تنخفض المتانة وتزيد المرونة.
- صفاته الكهربائية جيدة (عدا المركبات المسماة بالمتكررات المستحلبة فهي غير ملائمة لأغراض العزل الكهربائي).
- يمكن أن يستخدم حتى 60°C أو 80°C بمزجه مع مواد ملينة ولكن متانته الميكانيكية. تقل وعلى الغالب عملية المزج لها تأثير سلبي على الخواص الكهربائية لـ PVC.
- يعتبر الـ PVC ومشتقاته من المواد البلاستيكية الحرارية أي تلين بارتفاع درجة الحرارة. وبارتفاع أكثر لدرجة الحرارة تصبح بلاستيكية تأخذ أي شكل مطلوب وتعود الى مواصفاتها بعد التبريد.
- عامل الفقد عالي وذلك بسبب وجود شاردة الكلور cl^- (السالبة) وهذا يجعله قابلا للاستقطاب.
- المادة مقاومة للإشتعال والرطوبة حيث لا تبدي هذه المادة أي امتصاص للماء. و بما أنها حاوية على الكلور فإنها تحتفظ بصفات مؤخرة للاشتعال الطبيع.

والشكل (7) يبين قابلية الاشتعال للبولي فينيل كلوريد و لبعض المواد العازلة ودرجة الحرارة الموافقة لاشتعال كل منها:



الشكل (7) قابلية الاشتعال لبعض المواد العازلة

- يتمتع بمتانة ميكانيكية عالية بالمقارنة مع المواد العازلة الأخرى، وخصوصا في درجات الحرارة العادية، ويتحمل الشد والضغط كما أنه مقاوم للكشط، يوضح والجدول(3) قدرة البولي فينيل كلوريد و بعض العوازل على تحمل اختبار الضغط لعشر مرات.

الجدول (3) مقارنة بين المواد العازلة وقدرة تحملها لاختبار الضغط

المادة	Fatigue strength at 10^7 time application of external stress [MPa]kg/mm2
PVC	1.7 (17)
PS	1.02 (10.0)
PE	1.12 (11.0)
PP	1.12 (11.0)
ABS	1.2 (11.8)

6- الإجراءات المخبرية:

حددت المواصفات القياسية الكهربائية الدولية والعالمية IEC طرائق محددة ودقيقة لإجراء اختبارات قياس الخواص الكهربائية وغير الكهربائية المميزة كثابت العزل وعامل الفقد وقياس السعة وتيار التسريب والناقلية النوعية ودرجة القساوة ومقاومة الشد والاستطالة، والتي تضمن أن تكون النتائج صحيحة ودقيقة وقابلة للتكرار والمقارنة في كافة الظروف المحيطية.

و انطلاقاً من الدراسة النظرية حول توقع تغير خواص المواد العضوية (البوليمرية) نتيجة لعمليات التقادم الحراري، فقد أجريت الاختبارات على عينات خاصة تم تحضيرها لذلك، وقد أجريت الاختبارات في مخابر التوتر العالي في قسم هندسة الطاقة الكهربائية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق.

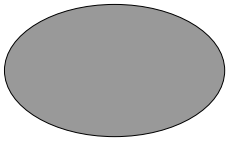
6-1 العينات المختبرة:

مواصفات العينات:

1) مادة PVC هي عبارة عن حبيبات صغيرة الحجم تتراوح أبعادها بين (2mm-5mm) وقد أخذت هذه المادة الخام

لكافة العينات المصنعة للاختبار من مصدر واحد و شحنة واحدة والتي تم الحصول عليها من معمل محلي لتصنيع وإنتاج الكابلات الكهربائية المعزولة PVC وقد صنعت منها جميع العينات وذلك لكي يكون لها نتائج قابلة للتكرار .

تم اختيار أبعاد العينات المصنعة كي تكون ملائمة لتجهيزات الاختبار والقياس وهذه الأبعاد هي (d=2mm،ϕ=100mm). ويبين الشكل (8) شكل العينة المختبرة .



الشكل (8) شكل العينة المختبرة من مادة PVC

الإجراء التجريبي:

تم تقسيم العينات المصنعة إلى مجموعتين وهي:

المجموعة الأولى: وهي العينات الشاهد، وتضم هذه مجموعة العينات المرجعية (Reference) التي لم تتعرض التقادم الحراري.

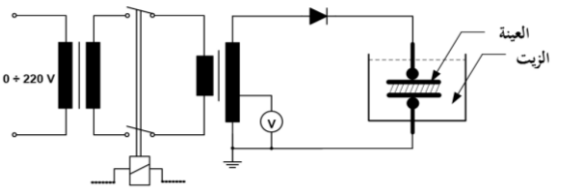
المجموعة الثانية: وهي العينات التي تعرضت لتقادم حراري وذلك بوضع عينات هذه المجموعة في فرن حراري بدرجة حرارة (70°C) ولمدة زمنية معينة. وبعدها تم إجراء التجارب على هذه العينات ولقياس القيم المميزة لخواص العزل الكهربائية والتي هي:

- توتر الانهيار والمتانة الكهربائية.
- السعة الكهربائية [C_X] وقياس عامل الفقد [$\tan\square$] وقياس ثابت العزل [ε_r].
- تيار التسريب [I] والناقلية النوعية[χ].

6-2 دارات الاختبار:

قياس توتر الانهيار الكهربائي U_d (kV)

لقياس توتر الانهيار للمادة العازلة استخدمت الدارة المبينة بالشكل (9).



الشكل (9) دارة قياس توتر الانهيار داخل المادة العازلة

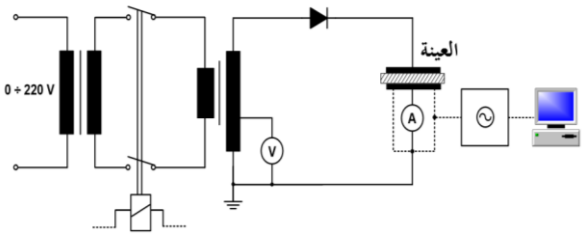
أجريت اختبارات قياس توتر الانهيار على عينات PVC قبل وبعد عملية التقادم الحراري باستخدام محول اختبار متناوب (100 kV). و يتم تطبيق التوتر على مساري كروية الشكل قطرها 5mm، موضوعة على سطحي العينة المختبرة ضمن وعاء مملوء بالزيت. ثم يرفع التوتر من الصفر وحتى حدوث الخرق بسرعة منتظمة و ثابتة و تجرى كل مرة ثلاث تجارب خرق بفاصل زمني قدره خمس دقائق بين كل تجربتين ليتخلص الزيت من الفقاعات الهوائية. ثم تحسب القيمة الوسطى الحسابية لتوتر الانهيار U_d.

ولقياس المتانة الكهربائية تم استخدام العينات التي قمنا بتصنيعها على شكل أقراص دائرية قطرها 10 cm وسماكتها 2mm وذلك لتتلائم مع حجيرة القياس.

توضع العينة في حجيرة القياس ضمن الزيت بحيث يثبت المسرى الكروي العلوي على السطح العلوي للعينة والمسرى الكروي السفلي على السطح السفلي وبحيث يغمر الزيت كلاً من المساري الكروية والعينة. بعدها يتم رفع التوتر حتى حدوث الانهيار عندها تحسب المتانة الكهربائية Ed بتقسيم توتر الانهيار U_d الذي حصلنا عليه على سماكة المادة العازلة dأي: $E_d = U_d/d$ (kV/cm)

قياس تيار التسريب ومقاومة العبور

لقياس تيار التسريب ومقاومة العبور في المادة العازلة استخدمت الدارة المبينة بالشكل (10).



الشكل (10) لقياس تيار التسريب داخل المادة العازلة

لقياس تيار التسريب المار في العينات يتم وضع العينات المختبرة في حجيرة الاختبار تحت الزيت، ويطبق عليها توتر عالي مستمر وقدره (2.5Kv) . وتم إظهار تيار التسريب على راسم إشارة، ويتم نقل نقل هذه الإشارة إلى حاسب مربوط مع راسم إشارة وذلك لمعالجتها وتخزينها وحساب القيمة العددية لتيار التسريب. وبعد رفع التوتر حتى قيمة 2.5 kV على العينة المختبرة يسري بداخلها تيار تسريبي ونشاهد شكل هذا التيار التسريبي على شاشة راسم الإشارة كما يتم نقل إشارة التيار إلى الحاسب للمعالجة والتخزين والحساب، ويتم الحساب كما يلي:

$$I = \frac{N \times K}{R \times A}$$

حيث: N: عدد المربعات، K: ثابت الراسم: K=0.02 V، A: مساحة المقطع، $A=20\ cm^2$، R: مقاومة الدخل للراسم وتساوي R=10kΩ. بالتعويض في علاقة التيارنجد أنه:

$$I = \frac{N \times 0.02}{10 \times 10^3 \times 2000} = N\,(nA)$$

وتحسب الناقلية النوعية كما يلي:

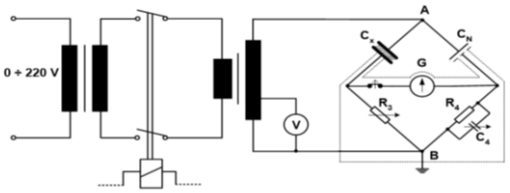
$$R = \frac{U(kV)}{I(nA)} = \frac{U}{I} \times 10^{12}$$

$$R = \rho \frac{A}{d} = \frac{A}{x\,d} \Rightarrow x = \frac{A}{R\,d} = \frac{20 \times I \times 10^{-12}}{0.2U}$$

$$x = \frac{1}{R} \times 10^{-12}\ \Omega cm^{-1}$$

– قياس السعة C_x و [tan□] وقياس ثابت العزل [ε_r]

تم استخدام جسر شيرنك(Schering bridge) المبين بالشكل (11) لقياس كل من السعة C_x وعامل الفقد [tan□] وقياس ثابت العزل [ε_r].



الشكل (11) جسر شيرنك لقياس السعة الكهربائية Cx

حيث يتألف هذا الجسر من:

C_x: سعة العينة C_N: مكثفة عيارية. R_3: مقاومات متغيرة.

C_4: مكثفة متغيرة. R_4: مقاومة عيارية.

ويتكون جسر القياس من العينة المختبرة المجهول سعتها C_x ومقاومتها R_x، ومن مكثفة عيارية مفرغة من الهواء (C_n=18.5 pF)، مربوطة مع العينة على التوازي، حيث يرتبطان في النقطة المشتركة بطرف التوتر العالي لمحول الاختبار. أما الفرعين الآخرين للجسر فتحتوي على المقاومة المتغيرة R_3 المربوطة على التفرع مع السعة المتغيرة C_4. وتلتقي الفرعتين في النقطة (B) المؤرضة. وتقع عناصر التوتر المنخفض خارج منطقة التوتر العالي، بحيث يمكن العمل عليها والتحكم بها بدون التعرض لأي خطر.

ويستخدم للتأكد من تعديل الجسر مقياس صفري ذي حساسية عالية ومقاومة دخل كبيرة جداً ويتم وضع العينات المختبرة C_x ضمن حجيرة اختبار مغمورة بالزيت وبدرجة حرارة 25 درجة مئوية، ومجهزة بإطارات واقية لإزالة آثار تيار التسريب الجانبية. ويطبق توتر اختبار متناوب قدره (1kV)، عندها نجد أن مؤشر المقياس G ينحرف عن وضعية الصفر ولإعادة التوازن للجسر نغير من قيم

أثر التقادم الحراري على الخصائص الكهربائية للبولي فينيل كلوريد (PVC) السيد

المقاومة R_3 والسعة C_4 حتى يعود المقياس G إلى وضعية الصفر، عندها نسجل قيم المقاومة الكهربائية والسعة وتحسب القيم المجهولة وهي سعة العينة المختبرة C_x وعامل الفقد و ثابت العزل وذلك بالاستعانة بالعلاقات التالية:

$$\varepsilon_r = C_x / 8.85$$

$$\tan\delta = 0.1 \times C_4$$

$$C_x = 5888 / R_3$$

7- الإجراء العملي:

بعد إجراء بعض الاختبارات الكهربائية حسب الأجهزة المتوفرة لدينا على العينات المطلوبة والمصنعة محلياً في مخابر التوتر العالي في قسم هندسة الطاقة الكهربائية وذلك لقياس الخواص الكهربائية لمادة البولي فينيل كلوريد PVC تم التوصل إلى النتائج التالية:

7-1 نتائج الاختبارات الكهربائية:

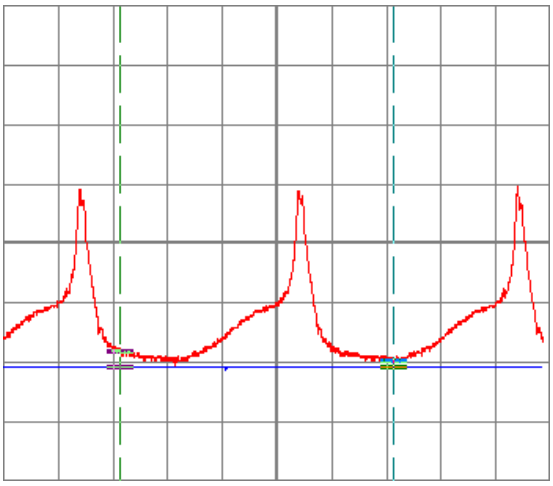
لقد تمّ قياس كل من السعة (C_x) وعامل الفقد tgδ وثابت العازلية ε_r للعينات وكانت كما في الجدول (4).

الجدول (4) نتائج قياس السعة وثابت العزل وعامل الفقد.

العينة	التوتر المطبق	R_3 [Ω]	C_4 [μ F]	C_X [μ F]	ε_r	Tan δ
0 h	1 kV	175.8	0.64	33.4	3.77	0.064
100 h	1 kV	178.2	0.56	33.04	3.73	0.056
180 h	1 kV	179.4	0.55	32.82	3.70	0.055
280 h	1 kV	181	0.54	32.6	3.68	0.054
320 h	1 kV	181.3	0.52	32.47	3.66	0.052

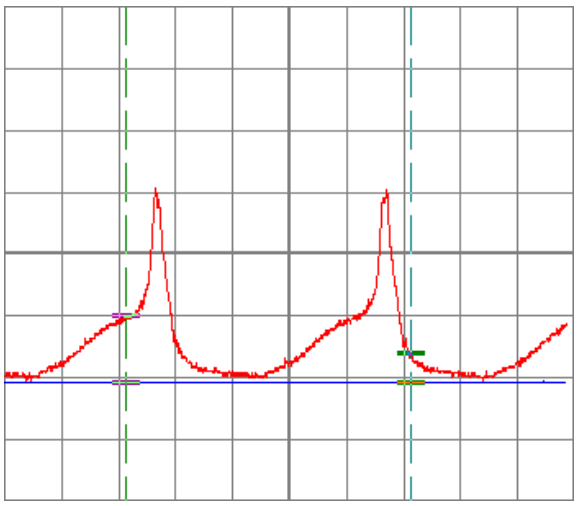
كما تم قياس كل من تيار التسريب ومقاومة العبور وكانت النتائج كما في الجدول(4) ويبين الشكلان (14) و(15) شكل تيار التسريب على بعض العينات المتقادمة حرارياً.

- مثال1: العينة الأولى : 0 h



الشكل (14) تيار التسريب (5.8μ A) PVC / 0 h

مثال2: العينة الثانية : 100 h



الشكل (15) تيار التسريب ((6μ A) 100h/PVC)

يبين الجدول(6) نتائج قياس تيار التسريب السابقة ومقاومة العبور للعينات المتقادمة حرارياً.

الجدول (6) نتائج قياس تيار التسريب

العينة	التوتر المطبق	I [μ A]	$Rx10^9$ (□)	x

0 h	2.5 kv	5.8	0.43	2.325
100 h	2.5 kv	6	0.416	2.403
180 h	2.5 kv	6.2	0.403	2.481
280 h	2.5 kv	6.8	0.367	2.724
320 h	2.5 kv	7	0.357	2.801

مناقشة النتائج:

بالعودة إلى الجدول السابق نلاحظ ما يلي:

- بالنسبة لعلاقة السعة C_x للعينات المختبرة من البولي فينيل كلوريد المتقادمة حرارياً مع فترة التقادم حيث نلاحظ تناقص السعة C_x مع تزايد فترة التقادم التي تتعرض لها هذه العينات ويفسر تناقص السعة C_x لأن ثابت العزل لها يتناقص وذلك لأن زيادة فترة التقادم تؤدي إلى تكسير وتحطيم الروابط الحرة المتوضعة على الجزيئات وانطلاقها كزمر حرة قابلة للحركة وتخفض من ثابت العزل في العينات مما يؤدي إلى تناقص السعة C_x.
- أما علاقة ثابت العزل ε_r للعينات المختبرة من البولي فينيل كلوريد مع فترة التقادم، يلاحظ انخفاض ثابت العزل كلما زادت فترة التقادم لأن ذلك يؤدي إلى تكسير وتحطيم الروابط الحرة المتوضع وانطلاقها كزمر حرة قابلة للحركة تخفض من ثابت العزل ε_r.
- وعن علاقة عامل الفقد للعينات المختبرة من البولي فينيل كلوريد مع تزايد فترة التقادم التي تتعرض لها هذه العينات، فقد زاد عامل الفقد tagδ لأن عمليات التقادم تساعد في كسر الروابط بين الجزيئات ونشوء الزمر الحرة التي تزيد من عمليات الفقد في العينات.
- أما بالنسبة لعلاقة تيار التسريب في العينات المختبرة من البولي فينيل كلوريد PVC مع فترة التقادم التي تتعرض لها هذه العينات، فقد تبين أنه مع تزايد فترة التقادم الحراري فإن عدد الزمر الحرة القابلة للحركة في المادة تتزايد نتيجة تكسير و تحطيم الروابط الحرة المتوضعة على الجزيئات وانطلاقها كزمر حرة قابلة للحركة مما يؤدي إلى زيادة تيار التسريب.

الخاتمة:

أجرت هذه الدراسة تقادم حراري على عينات من مادة البولي فينيل كلوريد (PVC)، وذلك خلال فترات زمنية مختلفة من عينة لأخرى، بعد ذلك قيست المحددات الكهربائية الأساسية لهذه العينات،وقورنت مع العينة العذراء (الشاهد). أهم النتائج التي تم التوصل إليها هي:

- التعرف على المادة البوليميرية من خلال التعرف إلى عدد من خواصها المميزة.
-

صنيع العينات المناسبة لكل اختبار.

-

راسة تغير بعض الخواص الكهربائية لمادة PVC بسبب التقادم الحراري.

وقد شُرحت الأسباب المؤدية لتلك التغيرات التي طرأت على الخصائص الكهربائية المدروسة.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).

References:

[1] www.pvc-information.com
[2]-www.pvc.Org
[3]-INVESTIGATION AND ANALYSIS OF THERMAL AGING OF XLPE AND PVC
[4] -CABLE INSULATION MATERIALS MANUFACTURED, BY Ali Muhammad Ali Abu-Gurain.
[5] -Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 2010.
[6]- تشعيع المواد البوليميرية والاستخدامات الكهربائية لها، رسالة الدكتوراه للدكتور المهندس علي السيد.
[7]- كتاب هندسة التوتر العالي/3/ للدكتور المهندس محمد نضال الريس، منشورات جامعة دمشق.
[8]- كتاب خواص المواد الكهربائية للدكتور محمد نضال الريس، منشورات جامعة دمشق.