

تأثير بعض العوامل في متانة العزل الكهربائي لمتراكبات (PVC- كاولين)

د. شهاب أحمد زيدان الجبوري* و فرح جميل ابراهيم الزبيدي**

تاريخ التقديم: 2010/ 2 /9

تاريخ القبول: 2010/ 10/7

الخلاصة

يتضمن هذا البحث دراسة تأثير إضافة الكاولين كمادة مدعمة لبوليمر (PVC) ودراسة بعض العوامل المؤثرة في متانة العزل الكهربائي. أضيف الكاولين بنسب وزنية هي (1%، 2%، 3%، 4%) إلى مادة (PVC)، وحضرت النماذج بطريقة الكبس الساخن وبأسماك تراوحت بين (0.8-2 mm). أظهرت بعض نتائج الفحوصات تناقص متانة العزل الكهربائي مع زيادة نسبة الكاولين المضاف خصوصاً للسماكات الكبيرة بسبب تأثير وجود ماء التبلور والذي يملك ثابت عزل كهربائي عالي لكنه يتميز بمعامل فقدان عزلي عال مقارنة مع المواد العازلة الأخرى ولأن متانة العزل تتناقص مع زيادة معامل الفقدان العزلي فان تأثير تيارات التسرب يكون واضحاً في السماكات الكبيرة نتيجة التأثيرات الكهروحرارية. بينت النتائج للمترابك (PVC- كاولين) تناقصاً في متانة العزل مع زيادة السمك وزيادة متانة العزل الكهربائي مع زيادة المعدل الزمني لصعود للفولتية. أما تأثير عدد الدورات على متانة العزل الكهربائي للمترابك فقد تناقصت متانة العزل الكهربائي بشكل واضح بعد الدورة الأولى. وكذلك أدى ارتفاع درجة الحرارة إلى تناقص متانة العزل الكهربائي للمترابك. اما الصور المأخوذة لمنطقة الانهيار باستعمال المجهر الضوئي فقد بينت تفحم الأنموذج في منطقة الانهيار نتيجة تحطم السلاسل البوليمرية لبوليمر (PVC)، وحصول شقوق مجهرية نتيجة الانهيار خصوصاً عند اضافة نسب كبيرة من الكاولين تمتد مباشرة من نقطة الانهيار. الكلمات المرشدة: PVC, كاولين, متراكبات, متانة العزل الكهربائي.

Some Factors Effecting on the Dielectric Strength for (PVC- Kaolin) Composites

Abstract

This research includes the effect of kaolin additions to the polymer matrix (PVC) and study some factors affecting to dielectric strength.

The kaolin powder was added as percentage by weight (1,2,3 and 4%) to PVC, and the specimens formed by hot pressing method, with different thickness (0.8-2 mm). Some of the results was showed decrease in the electrical strength with kaolin additives, especially for large thickness due to presence of lattice water, which has high dielectric constant but in the same time has high dielectric loss factor, where the electrical strength decrease when dielectric loss factor increases. Thus the influence of leakage currents is evident in the large thickness as a result of the electro-thermal effects.

Electrical strength was decreased when the time rate of raising voltage increases.

The effect of the cycles number of breakdown for composite specimens was studied. Also the dielectric strength decreased with temperature increases.

Optical microscopy images for breakdown region was shown the carbonization in the breakdown points as a result of crashing polymers chains. Also, micro cracks occurring for specimens that has large amount of kaolin and this cracks extend directly from the breakdown region.

التصنيع (Recyclability)، الخزن والاداء. [3]
(b) متراكبات طور اساس كاربوني (Carbon- Matrix Composites) (تشير عموماً إلى متراكبات كربون- كربون).
[2] متراكبات طور اساس معدني (Metal- Matrix Composites).
[3] متراكبات طور اساس سيراميكي (Ceramic- Matrix Composites).
المواد المستخدمة:

1- بولي فينيل كلورايد (PVC)

مسحوق لا بلوري ابيض اللون، يملك تركيباً خطياً، ويوجد على شكلين الأول لدن (Plasticised) والآخر غير لدن (Unplasticised). كلا النوعين يتميزان بخصائص كهربائية ممتازة وخصائص سطحية جيدة. اللدن يمكن استخدامه في تغليف الأسلاك الكهربائية وبلاط الأرضيات والأنسجة والقفازات... الخ، أما الغير لدن (UPVC) فيستخدم في الإنشاءات مثل الأنابيب وإطارات النوافذ واطراف الجدران وكذلك بطاقات الائتمان تصنع من (UPVC). [4] يعد PVC ثالث اكبر مادة واسعة الاستعمال في مقياس استهلاك المواد، وله خصائص مهمة مثل: شفاف وديم اللون ومطواع للحرارة، له درجة حرارة انتقال زجاجي $T_g \approx 86^\circ C$ ، طارد للماء، مقاوم للتآكل، قابلية ذوبانه محدودة وتنخفض خصائصه بارتفاع درجة الحرارة ويتأثر بالأشعة فوق البنفسجية. [5] وجود الكلور العالي في PVC يجعله مقاوم للهب ويمنحه خصائص كهربائية وكيميائية جيدة ولكن يجعله صعب المعالجة، حيث تميل ذرات الكلور للانفصال خارج السلسلة البوليمرية عند المعاملة حرارياً

المقدمة

المواد المتراكبة Composite Materials

هي المواد التي تصنع أو تتركب من اتحاد مواد مختلفة لأخذ فوائد كل خواصها المختلفة، يعد الخشب والعظم والقرن أمثلة على المواد المتراكبة الطبيعية والتي اعتمدت على حدوثها ألياف طبيعية من السليلوز (Cellulose)، والكولاجين (Collagen) والكيراتين (Keratin) على التوالي. وفي الخشب ألياف أنبوبية من السليلوز ترتبط معاً في طور أساس من اللكتين (Lignin). [1]

المواد المتراكبة عموماً تصنف في مستويين واضحين. الاول يصنع من مكونات الطور الأساس (matrix constituent) ويتضمن:

[1] متراكبات طور اساس عضوي (Organic- Matrix Composites)، ويتضمن صنفين من المتراكبات:
(a) متراكبات طور اساس بوليمري (Polymer- Matrix Composites). [2]
ويتألف من راتنجات مطاوعة للحرارة (Thermoplastic) او راتنجات متصلدة حرارياً (Thermoset).

هناك خصائص مهمة تعتمد على الاساس البوليمري للمادة المتراكبة مثل المطيلية (Ductility) ومقاومة الصدمة... الخ. لذلك زيادة المطيلية تزيد من صلابة المادة المتراكبة (Toughness) وعليه فان زيادة الصلابة يتم بأختيار متراكب ذات اساس من بوليمر مطاوع للحرارة.

المتراكبات ذات الاساس المطاوع للحرارة والمتصلدة حرارياً لديهما فوائد ومضار من ناحية عمليات التشكيل والتصنيع، الكلفة، اعادة

وفي النهاية يتغير لون PVC، لذلك تضاف مثبتات خاصة (Stabilizer) لمنع التحلل. [6]

2- الكاولين (Kaolin)

يتكون جيولوجياً من تعرية الفلدسبار والميكا والغرانيت، ويتألف أساساً من معدن الكاولينايت وشوائب مختلفة (كالكوارتز والفلدسبار وغيرها من الأكاسيد). يمثل الكاولينايت سيليكات الألمنيوم المائية ورمزها الكيميائي:

$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ أو $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ والتركيب البلوري يتكون من طبقتين هما: طبقة (Silica tetrahedral) المتصلة بطبقة (Al- Octahedral).

ومكونات الكاولينايت الأساسية هي:

14% ماء تبلور، 39.5% أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 (ألومينا)، 46.5% أكسيد السيليكون SiO_2 (سليكا). [7]، [8]

إن هذه المكونات تمثل الصورة النقية للكاولين المتمثلة بالمعدن الطيني ولكن قلما يوجد بهذه النسب في الطبيعة، حيث يحتوي على بعض الشوائب العضوية وأكاسيد المعادن الأخرى مثل $(Fe_2O_3, MgO, TiO_2, K_2O, Na_2O, CaO, \dots)$ [9].

من مزايا استعمال الطين في البوليمر، توفره وقلة كلفته، ونسبة الطول إلى العرض بينما تتضمن مساوئه خواصه الأستراتيجية. فعند استعمال الكاولين مادة مضافة إلى الأساس البوليمري PVC لتحضير مترابك PVC- (Clay Composite) فإن الخصائص يحددها الأساس PVC ويعمل الطين على تحسين الخصائص الميكانيكية والحرارية للمترابك ولكن من أبرز مشاكل هذا النوع من المترابك هو كون PVC مركب عضوي والطين مركب مائي لذلك عملية المواءمة (compatibilization) تكون ضعيفة إلا إذا أضيف عامل آخر أو أن يحضر المترابك بالمعاملة الحرارية. [10]، [3]

متانة العزل الكهربائي (Dielectric Strength)

يطلق على الفولتية التي يحدث عندها الانهيار الكهربائي فولتية الانهيار

$$DielectricStrength = \frac{breakdownvoltage}{insulatorthickness} \text{ -----(1)}$$

$$E_{br} = \frac{U_{br}}{h}$$

لذلك

$$U_{br} = E_{br} \cdot h$$

حيث: E_{br} : متانة العزل الكهربائي، U_{br} : فولتية الانهيار الكهربائي، h : سمك الانموذج. [12]

وتمثل متانة العزل للعازل أقصى شدة للمجال الكهربائي المؤثر. وتقاس متانة العزل بوحدات (kV/mm) . [13]

تحضير النماذج

استعمل البولي فاينيل الكلورايد (PVC) وهو من البوليمرات المطاوعة للحرارة (Thermoset)، وهو على شكل مسحوق ناعم أبيض اللون كمادة أساس (Matrix)، إذ تم الحصول على مواصفاته من الشركة الوطنية للصناعات الكيماوية والبلاستيكية والمبينة في الجدول (1).

استعمل في البحث أيضاً الكاولين العراقي المأخوذ من منطقة الدويزة العراقية المبينة مكوناته في الجدول (2).

أضيف مسحوق الكاولين للمادة الأساس (PVC) ونسب وزنية مختلفة % (1, 2, 3, 4) على التوالي بعد غربلة الكاولين للحصول على حجم حبيبي أقل من $(53 \mu m)$ ، وتجفيفه بدرجة حرارة $(100^\circ C)$ لمدة ساعة للتخلص من المحتوى الرطوبي، وضع المزيج في وعاء زجاجي (Mortar) لخلط المزيج لمدة (20) دقيقة للحصول على أفضل تجانس ممكن. وقد تم الخلط يدوياً.

باستخدام طريقة الكبس الساخن تم تحضير العينات، إذ وضع المزيج داخل قالب معدني بقطر (2cm)، ووضع القالب المعدني في مسخن حراري مزود بمنظم حرارة للسيطرة على درجة حرارته والتي تمت مراقبتها

باستخدام مزدوج حراري رقمي (Thermocouple)، وباستعمال مكبس هيدروليكي وباستعمال طريقة الكبس المحوري (Axis Pressing) تم تسليط حمل مقداره (5kN) على القالب الموضوع داخل المسخن، وتم الحفاظ على حمل كبس ودرجة حرارة بحدود (100 ± 5 °C) لمدة (30) دقيقة، بعدها يتم سحب القالب من المسخن ويترك ليبرد لإخراج الأنموذج لاحقاً.

القياسات

1- قياس متانة العزل الكهربائي

يتكون جهاز متانة العزل الكهربائي من:

1- مجهز للفولتية بمدى (0-60kV) وبتردد (50Hz) من نوع (3- PGO-s- BAVR) ألماني المنشأ.

2- سائل ذي متانة عزل كهربائي عالية (زيت المحولات 40 kV/mm)، استعمل ليمنع حدوث انتقال الشرارة العرضي "Flashover"، إضافة الى سرعة ارتفاع درجة حرارة اشتعاله، مع مراعاة تبديل الزيت لضمان عدم تأينه مما يؤدي إلى عدم دقة القياس.

3- أقطاب من البراص جيدة التوصيل الكهربائي كروية الشكل بقطر (2mm).

يوضع الأنموذج المراد قياس متانة العزل الكهربائي له بين أقطاب البراص المغمورة في الزيت مع التأكد من إحكام تماس الأقطاب مع سطح الأنموذج وبتسليط فولتية على الأنموذج يحدث الانهيار الكهربائي عند قيمة معينة تعرض على شاشة الجهاز الرقمية وتعرض هذه القيمة بالمعادلة رقم (1) للحصول على متانة العزل الكهربائي بعد قياس سمك المنطقة التي حدث فيها الانهيار والتي يمكن الاستدلال عليها من خلال اثر الضرر الذي تركه الانهيار في العينة، اما العوامل التي تم دراسة تأثيرها على متانة العزل الكهربائي فهي:

1- تأثير السمك

تم قياس متانة العزل الكهربائي للنماذج المحضرة لاوطاً معدل صعود فولتية (0.5 kV/sec) واعلى معدل صعود فولتية (5

2- تأثير معدل صعود الفولتية

قيست متانة العزل الكهربائي للنماذج بمعدلات صعود مختلفة (0.5, 1, 2, 3, 5 kV/sec) لاقطاب سمك واطى سمك ودرجة حرارة (37 ± 2 °C) مع مراعاة عدم استخدام نقطة الفشل ثانيةً.

3- دراسة تأثير عدد الدورات

قيست متانة العزل الكهربائي للنماذج لأوطاً معدل صعود فولتية (0.5kV/sec) وأعلى معدل صعود فولتية (5kV/sec) لأقل سمك وأعلى سمك، إذ تسلط الفولتية لاكثر من مرة، مع مراعاة اخذ نفس النقطة لكل سمك وكررت العملية خمس مرات وبشكل دوري.

4- تأثير درجة الحرارة

لاجراء هذا الفحص اجريت بعض الخطوات التالية:

1- تثبيت معدل صعود الفولتية (5kV/sec).
2- عمل ماسك خشبي لوضع الاقطاب فيه.
3- غمر الماسك مع الاقطاب في حاوية مصنوعة من زجاج البايركس وترفع درجة حرارة الزيت.

4- وضع مقياس حراري رقمي (Thermocouple) داخل الحاوية الزجاجية لمراقبة ارتفاع درجة حرارة الزيت.

5- وضع الحاوية على مسخن لتسخين الزيت. تربط الأقطاب بمجهز الفولتية، وترفع درجة حرارة الزيت بواسطة المسخن وتتم مراقبة درجة الحرارة بواسطة المقياس الحراري، وبعد الوصول الى درجة الحرارة المطلوبة نجري الاختبار، وكما هو موضح بالشكل (1).

استعمل اقل سمك للنماذج وسخن الزيت لمدى حراري تراوح بين (80 ± 2 °C → 37).

5- الفحص بالمجهر الضوئي

أخذت صور باستعمال مجهر ضوئي من نوع (Nikon) ياباني المنشأ مزود بكاميرا مربوطة بجهاز الحاسوب لملاحظة التغيرات الحاصلة في منطقة الانهيار الكهربائي.

النتائج والمناقشة

1- متانة العزل الكهربائي تأثير السمك

الاشكال (1، 2، 3، 4، 5) توضح تأثير السمك على متانة العزل الكهربائي للنماذج المحضرة من مادة مترابكة ذات اساس لدائي (PVC) المدعمة بالكاولين بنسب وزنية هي (0%، 1%، 2%، 3%، 4%) على التوالي، وبأسماك مختلفة، إذ لوحظ على العموم تناقص متانة العزل الكهربائي مع زيادة السمك وهذا يعني ان فولتية الانهيار بوحدات (kV) لا تتغير بشكل خطي مع زيادة السمك، وذلك لان المادة العازلة تعمل على تناقص المجال الكهربائي المؤثر بسبب استجابة الوسط العازل للمجال الكهربائي بطريقة الاستقطاب ويزداد هذا التأثير والتناقص في المجال الكهربائي الخارجي مع زيادة سمك العازل، كذلك فان تأثير زيادة تيارات التسرب الناشئة من الشوائب الموجودة في الكاولين المتمثلة باكاسيد المعادن التي تولد مسارات توصيل كهربائي تؤدي الى ظهور الانهيار الكهربائي بوقت مبكر وانخفاض متانة العزل وكذلك صعوبة استرجاع الحرارة وطرحها من وسط العازل الى المحيط وكل هذه العوامل تؤدي الى انخفاض متانة العزل الكهربائي.

معدل صعود الفولتية

الاشكال (6، 7، 8، 9، 10) توضح تغير متانة العزل الكهربائي مع المعدل الزمني لزيادة الفولتيات لنماذج المترابك (PVC-كاولين) وبنفس النسب الوزنية السابقة، إذ لوحظ على العموم زيادة متانة العزل الكهربائي مع زيادة المعدل الزمني لزيادة الفولتية لكون المعدل الزمني لزيادة الفولتية البطيء (0.5kV/sec) مثلاً يؤدي الى زيادة تيارات التسرب الناشئة من التاثيرات الكهروحرارية [14]. وبما ان المواد العازلة تقل مقاومتها الكهربائية نتيجة زيادة الحرارة الموضوعية فإن انخفاضاً واضحاً سيظهر في متانة العزل الكهربائي مع تناقص المعدل الزمني لزيادة الفولتية. ومن اسباب انخفاض متانة العزل الكهربائي مع تناقص المعدل الزمني لزيادة الفولتية حدوث تأثيرات تراكمية للاصطدام (الكيميائي والكهروكيميائي)

والتآكل الذي بدوره يحطم المواد ويسرع الانهيار بوساطة التسخين وهذه القيم المنخفضة هي نفسها القيم التشغيلية عندما تستعمل العوازل في التطبيقات العملية، اما القيم التي نحصل عليها من معدلات الزيادة العالية فهي تمثل لحظة فتح او غلق الدوائر الكهربائية والتي تحتوي في تطبيقاتها على مثل هذه العوازل الكهربائية.

تأثير عدد دورات الانهيار الكهربائي

يعد اختيار تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد دورات الانهيار من الاختبارات التي يمكن بوساطتها معرفة امكانية استعمال العوازل الكهربائية التي تحصل فيها انهيارات كهربائية واعادتها الى الخدمة مرة أخرى في تطبيقات عملية تحتاج الى فولتيات اقل. الأشكال (11، 12، 13، 14، 15، 16، 17، 18) تبين تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لنماذج المترابك (PVC-كاولين)، ونلاحظ انخفاضاً حاداً في متانة العزل الكهربائي ولاسيما في الاسماك القليلة، ومن الممكن ان يعزى سبب ذلك الى التغيرات الكيميائية الكبيرة التي تظهر على طول انتشار الشرارة الكهربائية، اما الاسماك الكبيرة وبسبب التغيرات الكيميائية القليلة فإن تأثير عدد دورات الانهيار على متانة العزل الكهربائي اصبح اقل منه في حالة السماكات القليلة.

تأثير درجة حرارة الاختبار

من بديهيات العوازل الكهربائية حصول ارتفاع في التوصيلية الكهربائية مع زيادة درجة الحرارة (درجات الحرارة الأكبر من درجة حرارة الغرفة) وهذا الارتفاع في التوصيلية يعني حصول زيادة في تيارات التسرب الكهربائية بسبب التاثيرات الكهروحرارية كما هو موضح في الأشكال (19، 20، 21، 22، 23) والتي توضح تغير متانة العزل الكهربائي مع درجة الحرارة لنماذج المترابك (PVC-كاولين) ولمعدل صعود فولتية 0.5 kV/sec. وقد لوحظ عموماً أن زيادة نسبة إضافة الكاولين تؤدي إلى تغيير شكل منحنى الانحدار الحاصل في متانة العزل الكهربائي مع زيادة درجة حرارة الاختبار وذلك بسبب الاستقرار العالية في الخواص مع زيادة درجة الحرارة التي

- [5] Muhamad Warsi, "PVC-Clay Nano Composite", Msc. Thesis, Quaid-I-Azam University, Islamabad, 2001.
- [6] Myer Kutz, "Handbook of Materials selection", John Wiley & sons, Inc, New york, 2002.
- [7] Alain Meunier, "Clays", Springer, 2005.
- [8] Carter C. Barry, Norton M. grant, "Ceramics Materials Science and Engineering, Springer, 2007.
- [9] Worrall, W. E., "Ceramic Raw Materials", 2nd ed., Institute of Ceramics, London, 1982, PP. 16-26 .
- [10] L.A.Utracki, M.R. Kamal, "Clay-Containing Polymeric Nano Composite, The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 27, No. 1C, June 2002.
- [11] A. Brent Strong, "Plastics Materials and Processing", 2nd ed., United State Of America, 2000, P. 176- 178.
- [12] W. Bolton, "Engineering Materials Technology", 3rd ed. Great Britain, 1998, P. 481, 176,16-17.
- [13] B. Tareev, "Physics of Dielectric Material", Moscow, 1979, P. 203, 152, 155, 160, 188-189, 198- 200.
- [14] شهاب الجبوري، "تحضير العوازل الكهربائية من الكاولين العراقي"، اطروحة ماجستير، جامعة بغداد، 1995.

تتميز بها السيراميكيات ومنها الكاولين ولمدى واسع من درجات الحرارة.

الصور المجهرية:

الشكل (24) يوضح صورة مأخوذة بالمجهر الضوئي لمنطقة الانهيار الكهربائي وتبين مقدار التقدم الحاصل في النموذج بعد عملية الانهيار الكهربائي دليلاً على تحطم السلاسل البوليمرية لبوليمر (PVC).

أما الشكل (25) فيوضح حصول شقوق مجهرية نتيجة الانهيار الكهربائي خصوصاً في حالة اضافة النسب الكبيرة من الكاولين والتي تمتد مباشرة من نقطة الانهيار.

الاستنتاج

بالرغم من التناقص الحاصل في متانة العزل الكهربائي نتيجة اضافة الكاولين إلا أن ظاهرة حصول الانتقاب في بوليمر PVC (نتيجة الانهيارات الكهربائية المتكررة) تقل بإضافة الكاولين ولكن يجب عدم استخدام اضافات كبيرة إلى الحد الذي يمكن أن تحصل شقوق مجهرية نتيجة الانهيار الكهربائي بسبب التحول الميكانيكي في خصائص المادة باتجاه المواد الهشة نتيجة اضافة المساحيق السيراميكية.

المصادر:

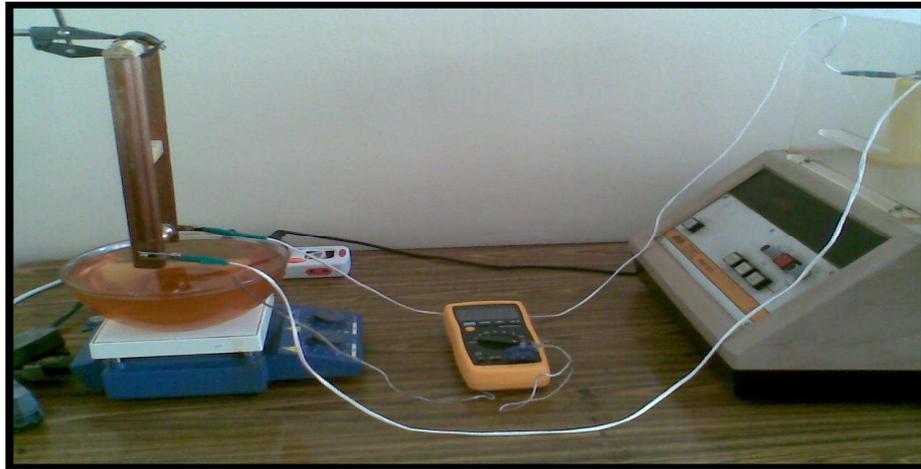
- [1] Theodore J. Reinhart, "Composites", Engineered Materials Handbook, V. 1, Ohio, 1987, P. 25.
- [2] Daniel B. Miracle and Steven, "Introduction to Composites", Air Force Research Laboratory, 2001, P. 3.
- [3] S. K. Mazumdar, "Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering", CRC Press LLC, USA, 2002.
- [4] R.J. Crawford, "Plastics Engineering", 3rd ed., Butterworth Heinemann, 2002.

جدول (1): مواصفات بوليمر PVC المستعمل

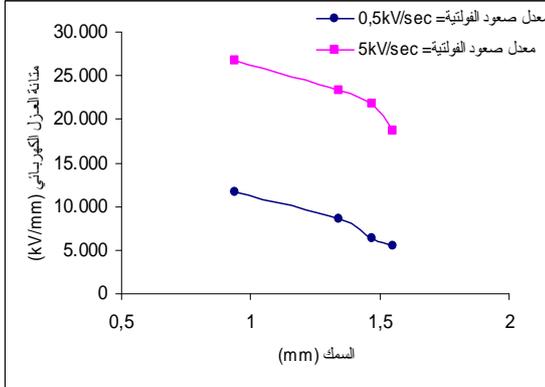
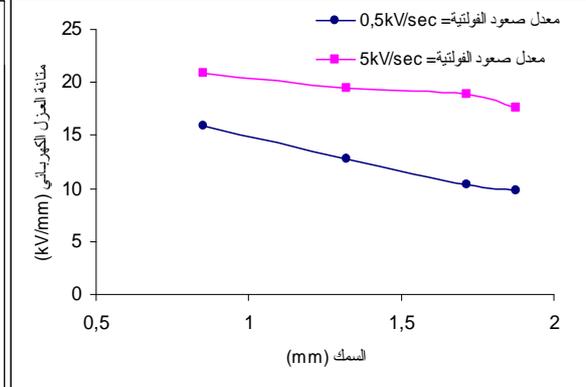
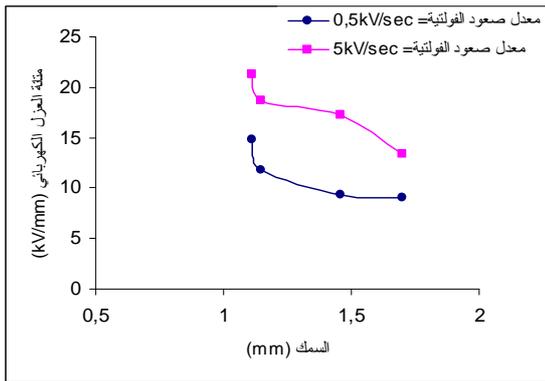
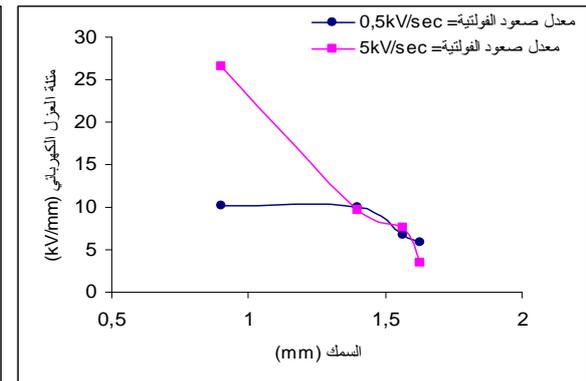
الخاصية	القيمة
صلادة ثنور	5+ 80
مقاومة الشد kg/m^2	125
الوزن النوعي	حد ادنى 1.7
الاستطالة%	حد اعلى 150
الفقدان بالتسخين% (لمدة 1 ساعة عند 150°C)	اقل من 0.5
معامل اللزوجة	120
الحجم الحبيبي%	(اعلى قيمة) 1 5
	اكبر من $250\mu\text{m}$ اقل من $63\mu\text{m}$

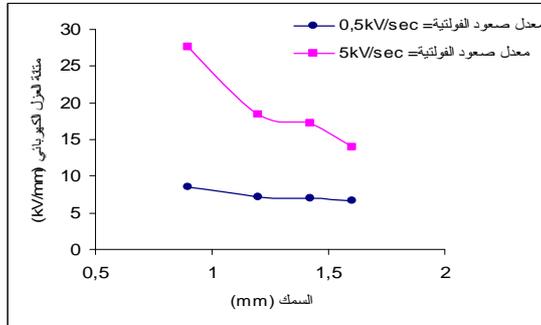
جدول (2): النسب المئوية الوزنية للكاولين المستعمل

SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	Other Oxides %	Loss On Ignition %
47.34	36.37	0.63	2.2	0.02	0.08	0.31	0.53	0.09	12.43

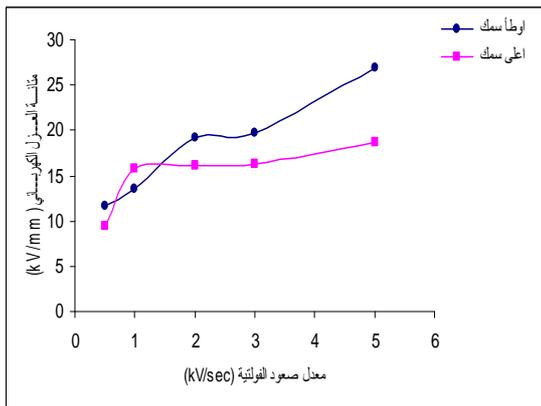


شكل (1): منظومة قياس متانة العزل مع ارتفاع درجة الحرارة.

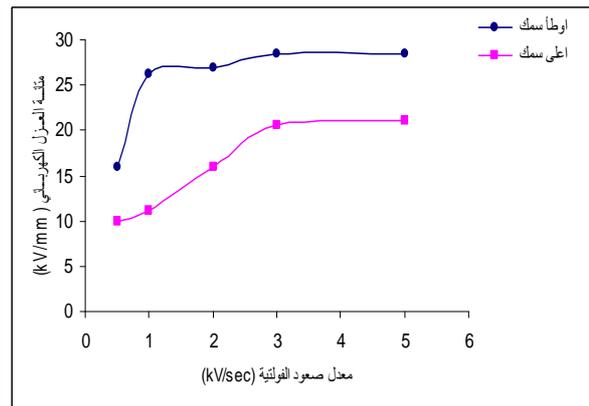
الشكل (2) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك
لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin).الشكل (1) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك
لأنموذج (PVC Pure).الشكل (4) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك
لأنموذج (97% PVC + 3% Kaolin).الشكل (3) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك
لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin).



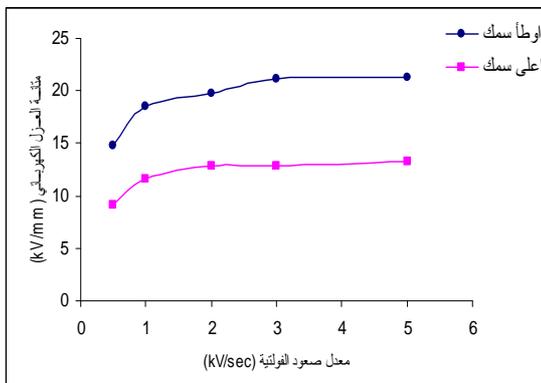
الشكل (5) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك
لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin).



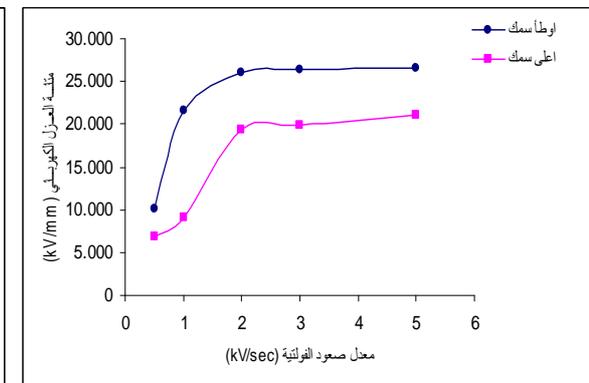
الشكل (7) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود الفولتية
لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin not burnt).



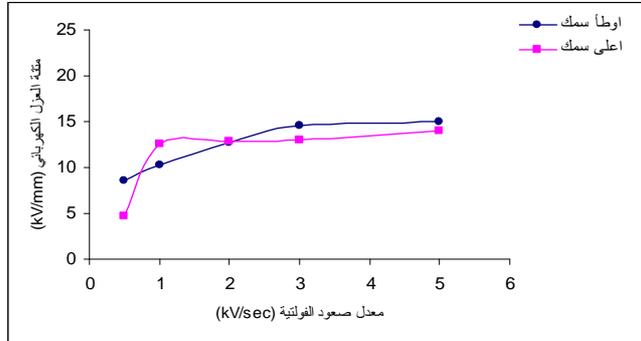
الشكل (6) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود
الفولتية لأنموذج (PVC Pure).



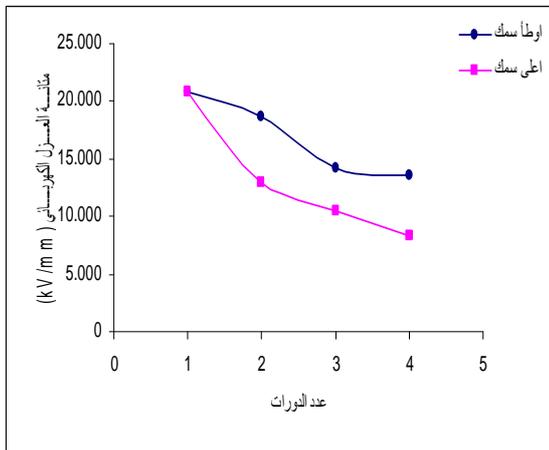
الشكل (9) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود
الفولتية لأنموذج (97% PVC + 3% Kaolin).



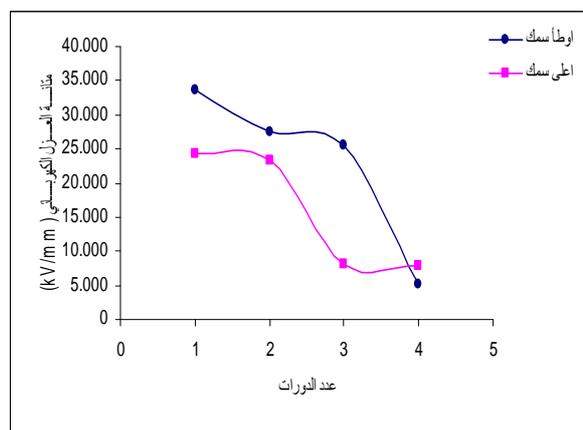
الشكل (8) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود
الفولتية لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin).



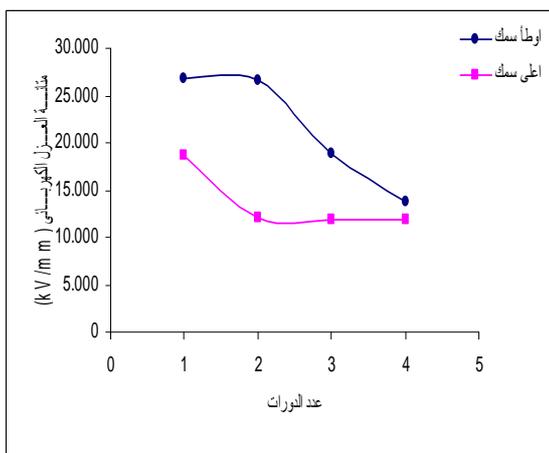
الشكل (10) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود الفولتية لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin).



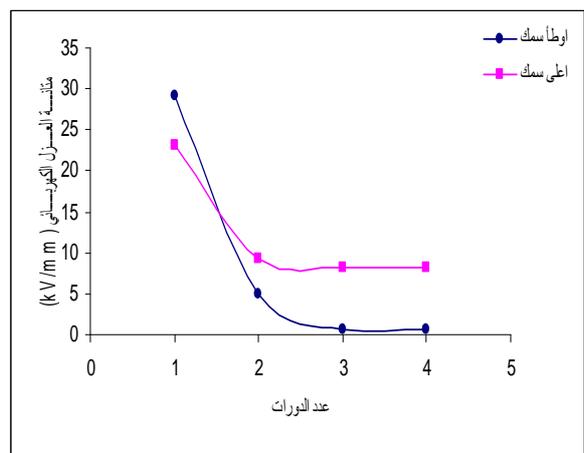
الشكل (12) تغير متانة العزل مع عدد الدورات لأنموذج (PVC Pure) لاعلى معدل صعود للفولتية (5 kV/sec).



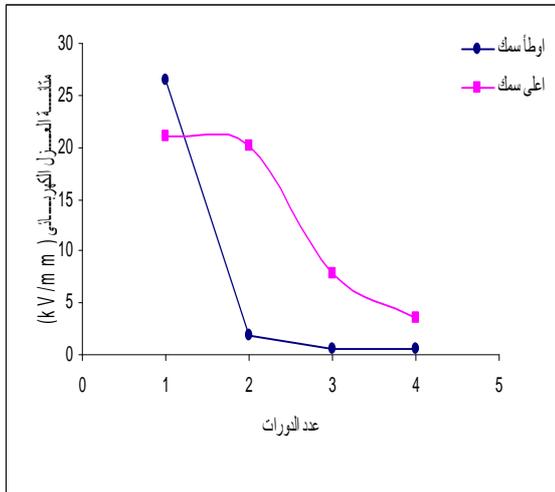
الشكل (11) تغير متانة العزل مع عدد الدورات لأنموذج (PVC Pure) لاقل معدل صعود الفولتية (0.5 kV/sec).



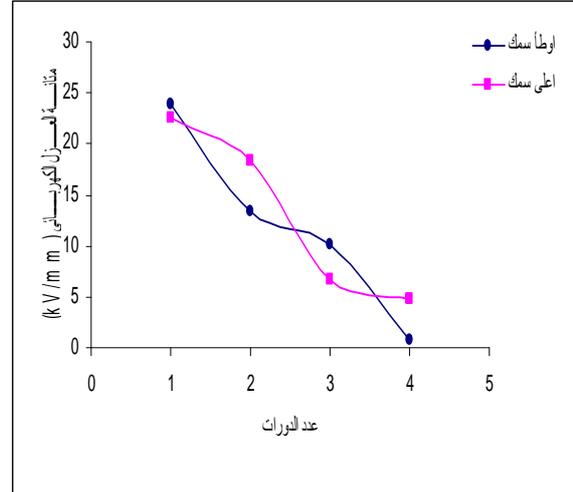
الشكل (14) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin) لاعلى معدل صعود للفولتية (5kV/sec).



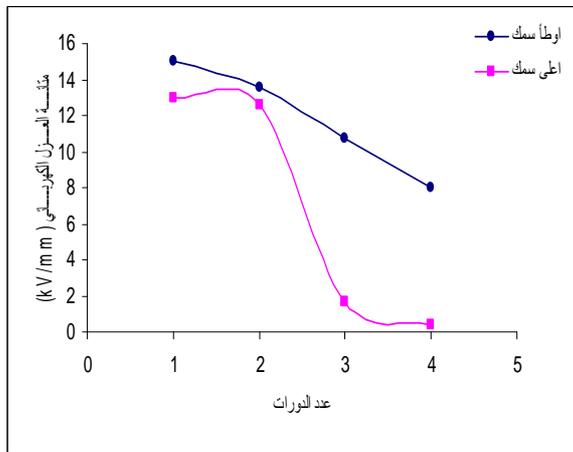
الشكل (13) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin) لاقل معدل صعود للفولتية (0.5 kV/sec).



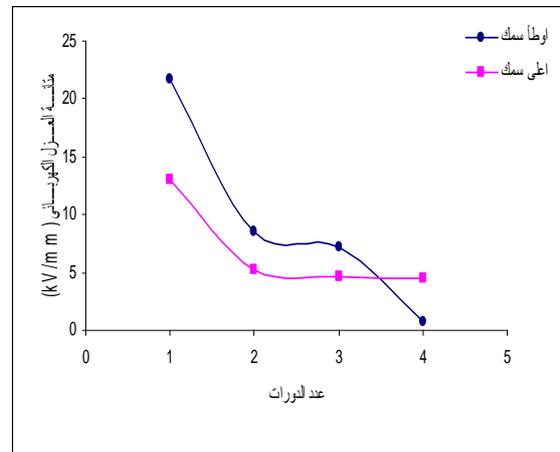
الشكل (16) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات
لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin) لأعلى معدل
صعود للفولتية (5 kV/sec).



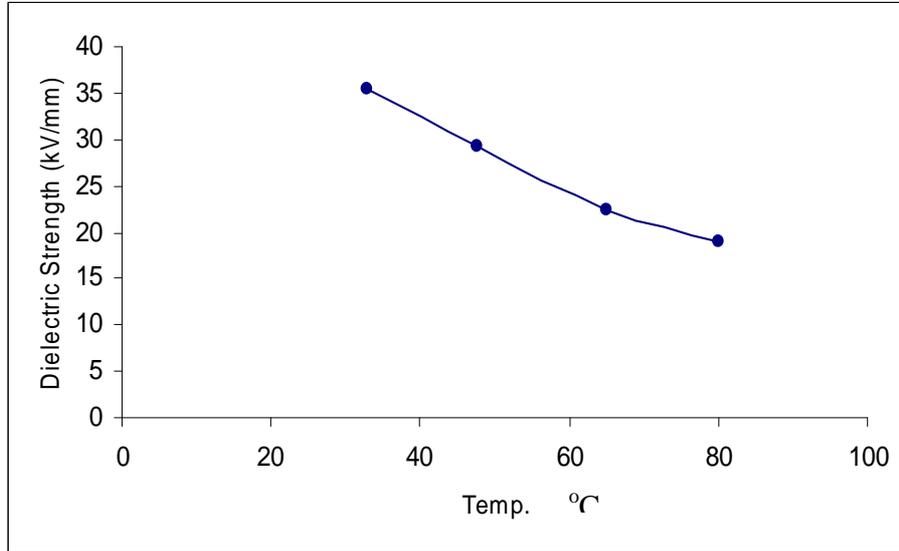
الشكل (15) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات
لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin) لأقل معدل
صعود للفولتية (0.5 kV/sec).



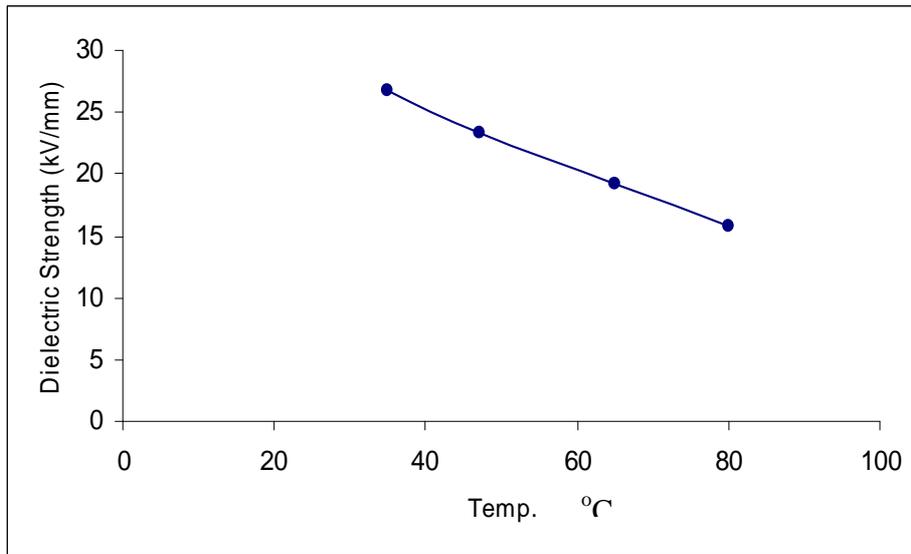
الشكل (18) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات
لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin) لأعلى معدل صعود
للفولتية (5 kV/sec).

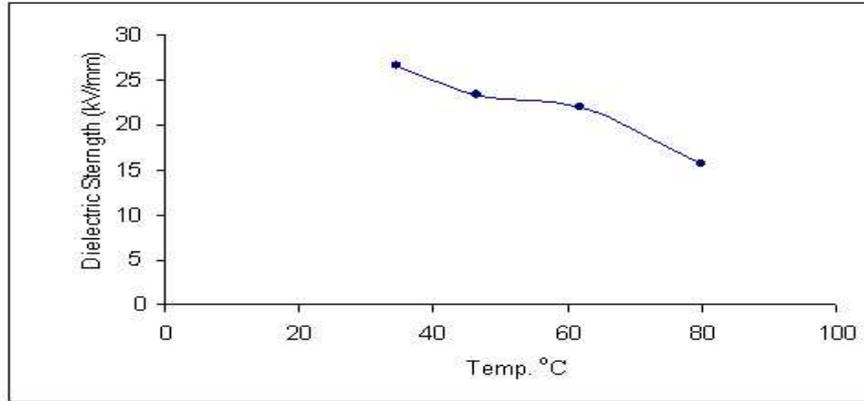


الشكل (17) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات
لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin) لأقل معدل صعود
للفولتية (0.5 kV/sec).

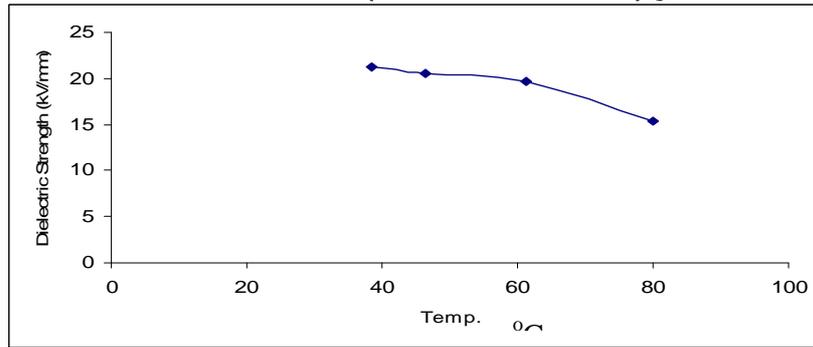


الشكل (19) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة لأنموذج (PVC Pure).

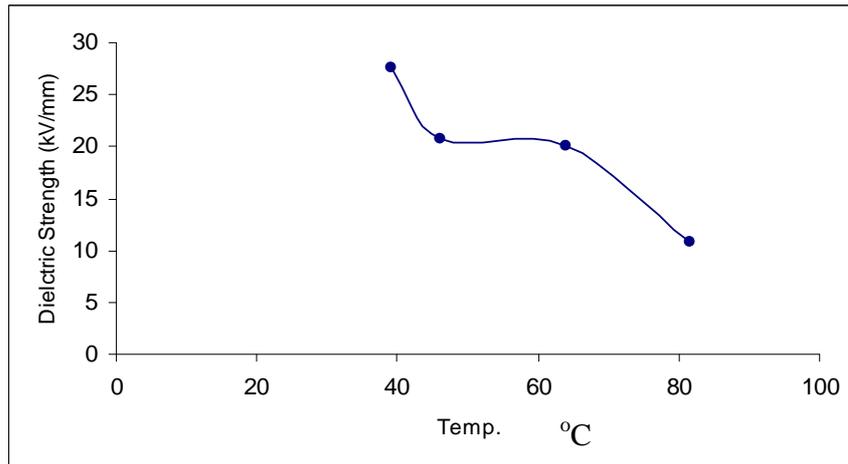
الشكل (20) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة
لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin).



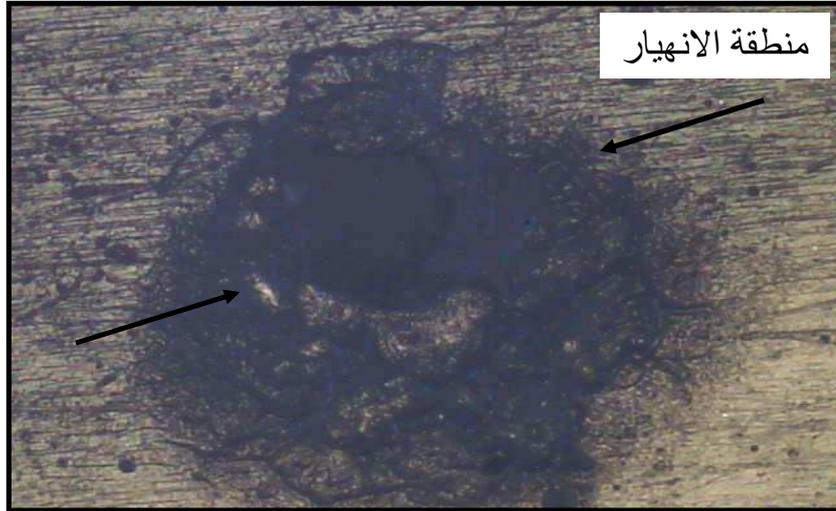
الشكل (21) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة
لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin).



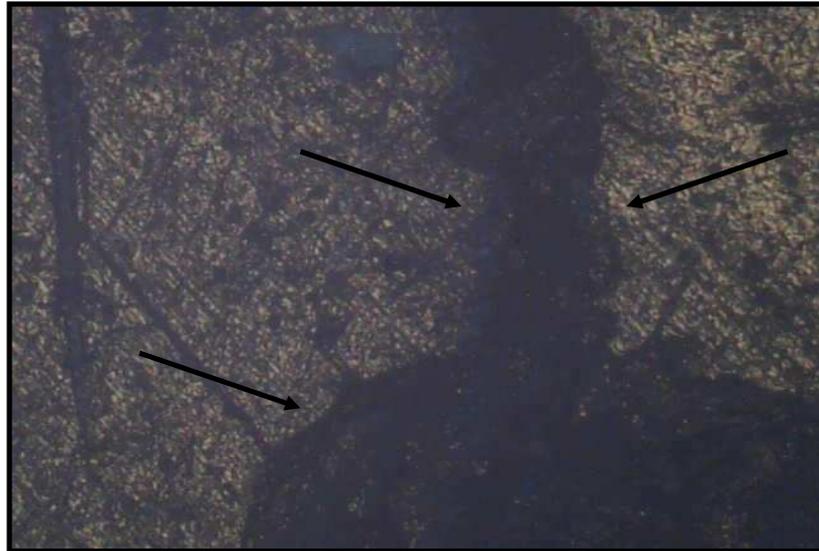
الشكل (22) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة



الشكل (23) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة
لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin).



الشكل (24) حصول تفحم في أنموذج (PVC Pure)
بعد الانهيار الكهربائي.



الشكل (25) حصول ثقوب وشقوق مجهرية في منطقة الانهيار لأنموذج (97%)
(PVC + 3% Kaolin).