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

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

تاريخ التقديم: 9/ 2 /2010
تاريخ القبول: 10/7 /2010

الخلاصة

يتضمن هذا البحث دراسة تأثير إضافة الكاؤلين كمادة مدعمة لبوليمر (PVC) ودراسة بعض العوامل المؤثرة في متانة العزل الكهربائي.

أضيف الكاؤلين 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 الكاؤلين 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 ولان متانة العزل تتناقص مع زيادة معامل الفقدان العزلي فان تأثير تيارات التسرب يكون واضحاً في السماكات الكبيرة نتيجة التأثيرات الكهروحرارية.

بينت النتائج للمتراكب (PVC- كاؤلين) 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 للمتراكب فقد تناقصت متانة العزل الكهربائي بشكل واضح بعد الدورة الأولى. وكذلك أدى ارتفاع درجة الحرارة إلى تناقص متانة العزل الكهربائي للمتراكب.

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 الكاؤلين تمتد مباشرة من نقطة الانهيار.

الكلمات المرشدة: PVC, كاؤلين, 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.

* قسم العلوم التطبيقية، الجامعة التكنولوجية / بغداد
**وزارة العلوم والتكنولوجيا/ بغداد

The effect of the cycles number of breakdown for composite specimens was studded. 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.

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 السيليلوز (Cellulose)، والكولاجين (Collagen) والكيراتين (Keratin) على التوالي. وفي الخشب ألياف أنبوبية من السيليلوز ترتبط معاً في طور أساس من اللكنين (Lignin).[1]

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

[1] متراكبات طور أساس عضوي (Organic- Matrix Composites)، ويتضمن صنفين من المتراكبات:

(a) متراكبات طور أساس 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) و مقاومة 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 التصنيع (Recyclability)، الخزن والاداء.[3]

(b) متراكبات طور اساس كاربوني (Carbon- Matrix Composites) (تشير عموماً إلى متراكبات كربون- كربون).

[2] متراكبات طور أساس معدني (Metal- Matrix Composites).

[3] متراكبات طور أساس 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) والأخر 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 واغلفة الجدران وكذلك بطاقات الائتمان تصنع من (UPVC) .[4] يعد PVC ثالث اكبر مادة واسعة الاستعمال في مقياس استهلاك المواد، وله خصائص مهمة مثل: شفاف وعديم اللون ومطاوع للحرارة، له درجة حرارة انتقال زجاجي $Tg \approx 86\ ^{o}C$ ، طارد للماء، مقاوم للتآكل، قابلية ذوبانه محدودة وتنخفض خصائصه بارتفاع درجة الحرارة ويتأثر بالأشعة فوق البنفسجية.[5] وجود الكلور العالي في PVC يجعله مقاوم للّهب ويمنحه خصائص كهربائية وكيميائية جيدة ولكن يجعله صعب المعالجة، حيث تميل ذرات الكلور للانفصال خارج السلسلة البوليمرية عند المعاملة حرارياً

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

2- الكاؤلين (Kaolin)

يتكون جيولوجياً من تعرية الفلدسبار والميكا والغرانيت، ويتألف أساسا من معدن الكاؤليناييت وشوائب مختلفة (كالكوارتز والفلدسبار وغيرها من الاكاسيد). يمثل الكاؤليناييت سيليكات الالمنيوم المائية ورمزها الكيميائي:

$Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ او $Al_2Si_2O_5(OH)_4$

والتركيب البلوري يتكون من طبقتين هما: طبقة (Silica tetrahedral) المتصلبة بطبقة (Al- Octahedral).

ومكونات الكاؤليناييت الاساسية هي:

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

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

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

متانة العزل الكهربائي (Dielectric Strength)

يطلق على الفولتية التي يحدث عندها الانهيار الكهربائي فولتية الانهيار (Breakdown Voltage) وعندما تقسم على سمك الانموذج تدعى بمتانة العزل (Dielectric Strength).[11]

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

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

لذلك

$$U_{br} = E_{br}.h$$

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 ابيض اللون كمادة أساس (Matrix)، إذ تم الحصول على مواصفاته من الشركة الوطنية للصناعات الكيمياوية والبلاستيكية والمبينة في الجدول (1).

استعمل في البحث ايضاً الكاؤلين العراقي المأخوذ من منطقة الدويخلة العراقية المبينة مكوناته في الجدول (2).

أضيف مسحوق الكاؤلين للمادة الاساس (PVC) وبنسب وزنية مختلفة %(1, 2, 3, 4) على التوالي بعد غربلة الكاؤلين للحصول على حجم حبيبي اقل من $(53\mu m)$، وتجفيفه بدرجة حرارة (100 ^{o}C) لمدة ساعة للتخلص من المحتوى الرطوبي، وضع المزيج في وعاء زجاجي (Mortar) لخلط المزيج لمدة (20) دقيقة للحصول على افضل تجانس ممكن. وقد تم الخلط يدوياً.

باستخدام طريقة الكبس الساخن تم تحضر 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 (Axisl Pressing) تم تسليط حمل مقداره (5kN) على القالب الموضوع داخل المسخن، وتم الحفاظ على حمل كبس ودرجة حرارة بحدود ($100\pm5\ ^oC$) 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 (60kV- 0) وبتردد (50Hz) من نوع (BAVR- PGO-s- 3) 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 الانموذج المراد قياس متانة العزل الكهربائي له بين اقطاب البراص المغمورة في الزيت مع التأكد من إحكام تماس الاقطاب مع سطح الانموذج وبتسليط فولتية على الانموذج يحدث الانهيار الكهربائي عند قيمة معينة تعرض على شاشة الجهاز الرقمية وتعوض 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 لاوطأ معدل صعود فولتية (0.5 kV/sec) واعلى معدل صعود فولتية (5 kV/sec) وباسماك مختلفة تراوحت بين ($0.8-2mm$) وبدرجة حرارة ($37\pm2\ ^oC$).

2- تأثير معدل صعود الفولتية

قيست متانة العزل الكهربائي للنماذج بمعدلات صعود مختلفة (0.5, 1, 2, 3, 5 kV/sec) لاقل سمك واعلى سمك وبدرجة حرارة ($37\pm2\ ^oC$) مع مراعاة عدم استخدام نقطة الفشل ثانيةً.

3- دراسة تأثير عدد الدورات

قيست متانة العزل الكهربائي للنماذج لأوطأ 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 بوساطة المسخن وتتم مراقبة درجة الحرارة بوساطة 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 ($37 \rightarrow 80 \pm 2\ ^oC$).

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 متراكبة ذات اساس لدائني (PVC) المدعمة بالكاؤلين 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 الكاؤلين 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 المتراكب (PVC- كاؤلين) 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 الموضعية 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 اختبار تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد دورات الانهيار من الاختبارت 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 المتراكب (PVC- كاؤلين)، 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 التأثيرات الكهروحرارية كما هو موضح في الأشكال (19، 20، 21، 22، 23) والتي توضح تغير متانة العزل الكهربائي مع درجة الحرارة لنماذج المتراكب (PVC- كاؤلين) ولمعدل صعود فولتية 0.5 kV/sec . وقد لوحظ عموماً أن زيادة نسبة إضافة الكاؤلين تؤدي إلى تغيير شكل منحني الانحدار الحاصل في متانة العزل الكهربائي مع زيادة درجة حرارة الاختبار وذلك بسبب الاستقرارية العالية في الخواص مع زيادة درجة الحرارة التي

تتميز بها السيراميكيات ومنها الكاؤلين ولمدى واسع من درجات الحرارة.

الصور المجهرية:

الشكل (24) يوضح صورة مأخوذة بالمجهر الضوئي لمنطقة الانهيار الكهربائي وتبين مقدار التفحم الحاصل في الانموذج 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 الكاؤلين والتي تمتد مباشرة من نقطة الانهيار.

الاستنتاج

بالرغم من التناقص الحاصل في متانة العزل الكهربائي نتيجة إضافة الكاولين إلا أن ظاهرة حصول الانثقاب 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 إضافة 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.

[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 Btritain, 1998, P. 481, 176,16-17.

[13] B. Tareev, "Physics of Dielectric Material", Moscow, 1979, P. 203, 152, 155, 160, 188-189, 198- 200.

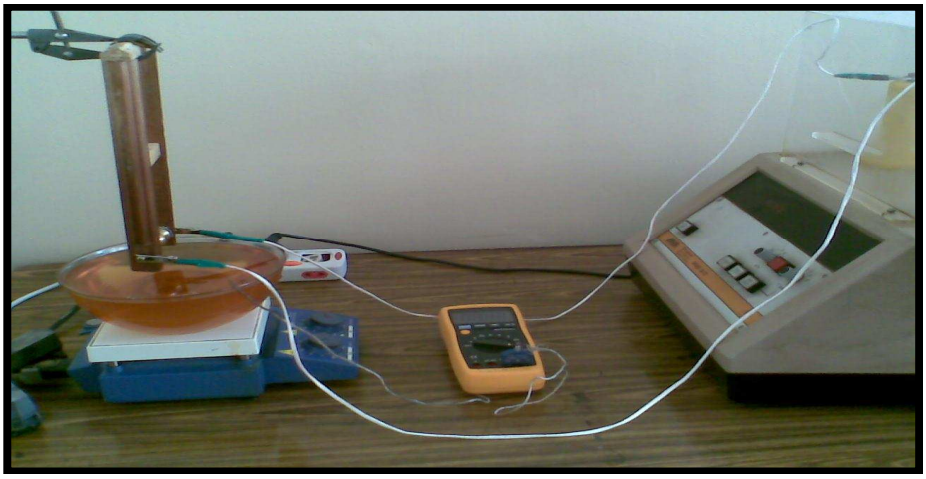
[14] شهاب الجبوري ،"تحضير العوازل الكهربائية من الكاولين العراقي"، اطروحة ماجستير،جامعة بغداد،1995.

جدول (1): مواصفات بوليمر PVC المستعمل

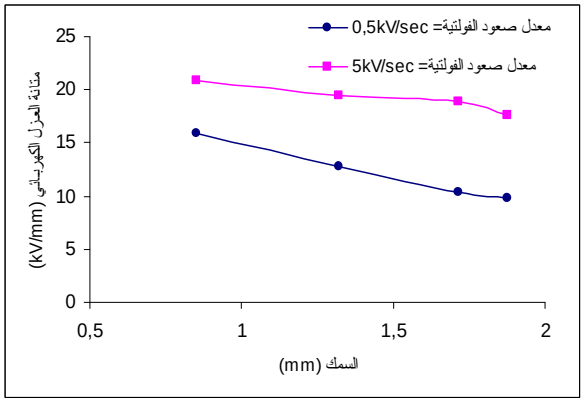
الخاصية	القيمة
صلادة شور	**80 ±5**
مقاومة الشد kg/m^2	**125**
الوزن النوعي	حد ادنى **1.7**
الاستطالة%	حد اعلى **150**
الفقدان بالتسخين% (لمدة 1 ساعة عند **150 °C**)	اقل من **0.5**
معامل اللزوجة	**120**
الحجم الحبيبي%	(اعلى قيمة)
اكبر من **250µm**	1
اقل من **63µm**	5

جدول (2): النسب المئوية الوزنية للكاولين المستعمل

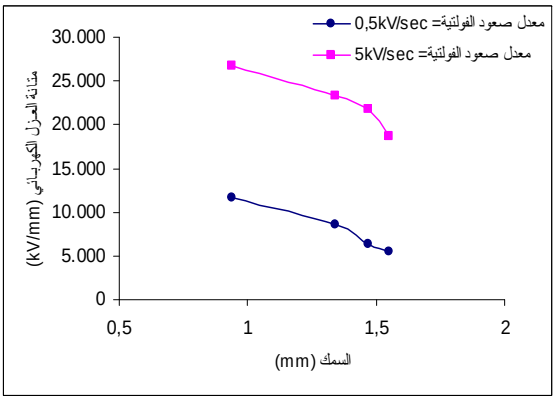
SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	TiO_2 %	CaO %	MgO %	Na_2O %	K_2O %	Other Oxides %	Loss On Ignition %
47.34	**36.37**	**0.63**	**2.2**	**0.02**	**0.08**	**0.31**	**0.53**	**0.09**	**12.43**



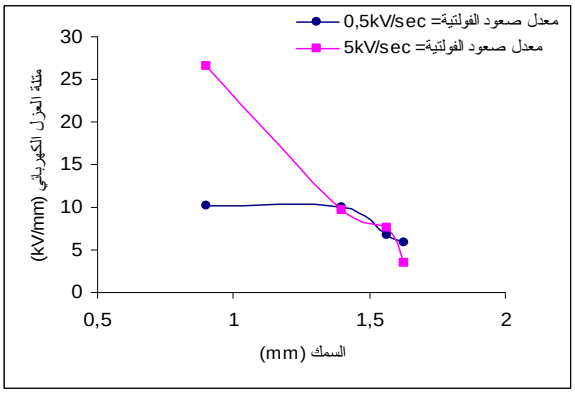
شكل (1): منظومة قياس متانة العزل مع ارتفاع درجة الحرارة.



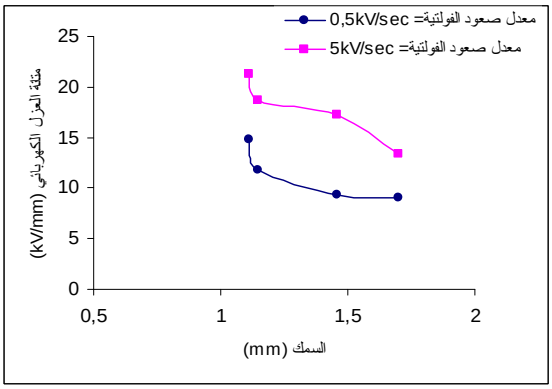
الشكل (1) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك لأنموذج (PVC Pure).



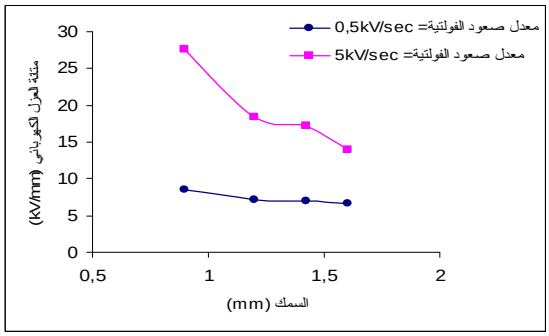
الشكل (2) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك لأنموذج (99% PVC +1% Kaolin).



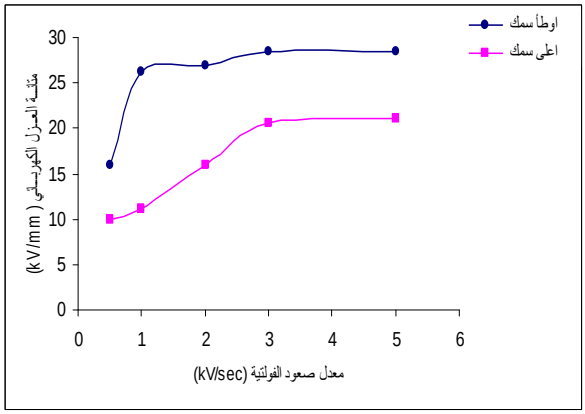
الشكل (3) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin).



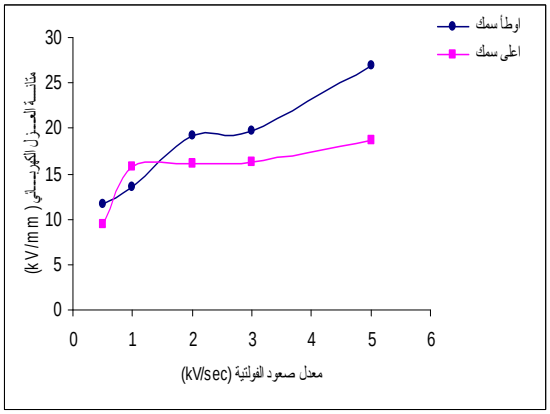
الشكل (4) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك لأنموذج (97% PVC + 3% Kaolin).



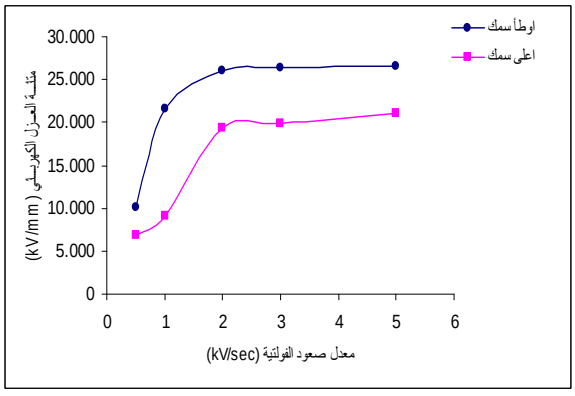
الشكل (5) تغير متانة العزل الكهربائي مع السمك لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin).



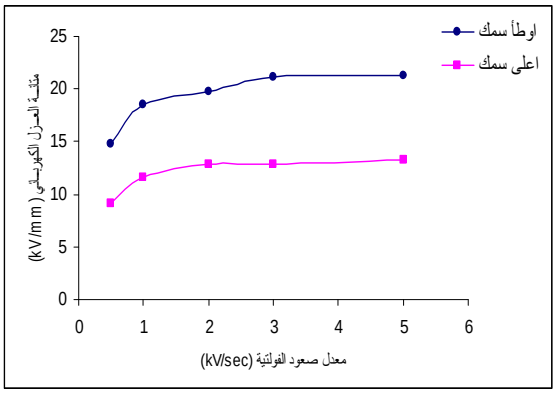
الشكل (6) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود الفولتية لأنموذج (PVC Pure).



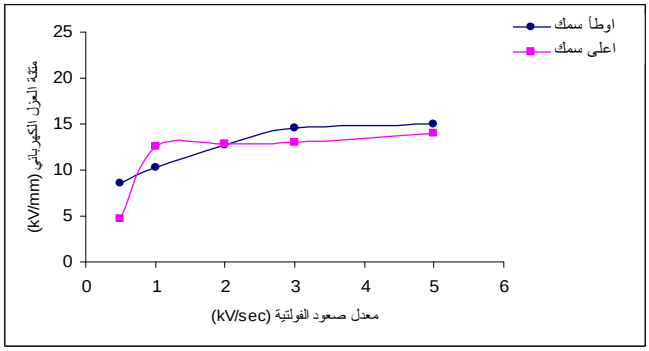
الشكل (7) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود الفولتية لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin not burnt).



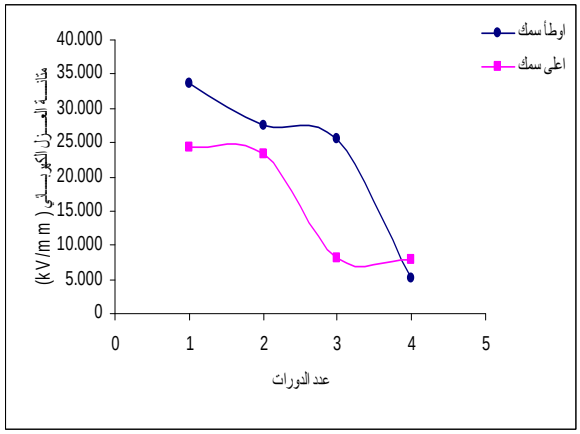
الشكل (8) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود الفولتية لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin).



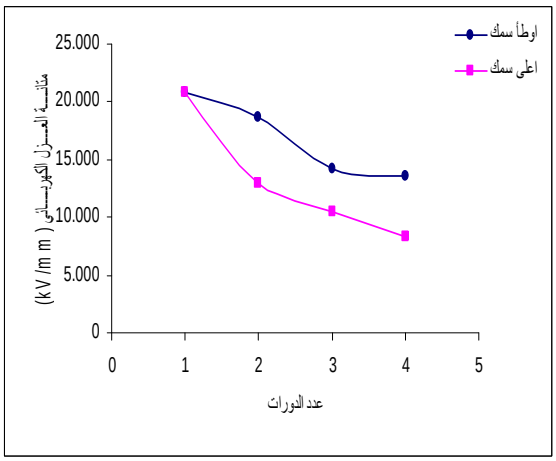
الشكل (9) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود الفولتية لأنموذج (97% PVC + 3% Kaolin).



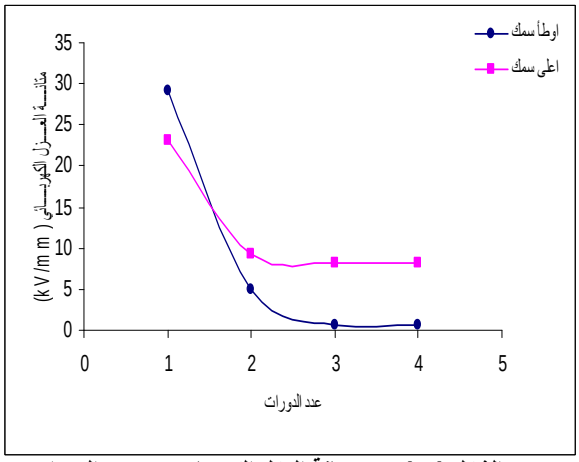
الشكل (10) تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود الفولتية لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin).



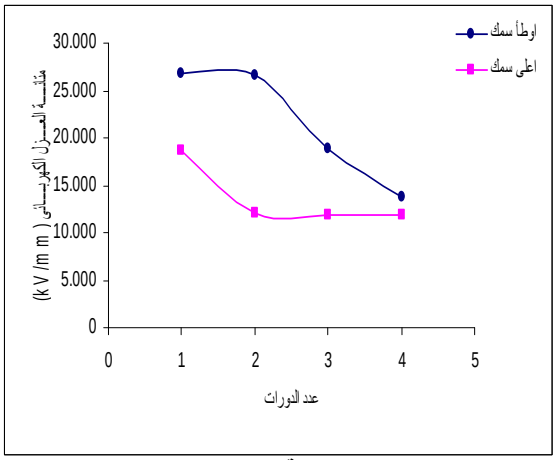
الشكل (11) تغير متانة العزل مع عدد الدورات لأنموذج (**PVC Pure**) لاقل معدل صعود الفولتية (**0.5 kV/sec**).



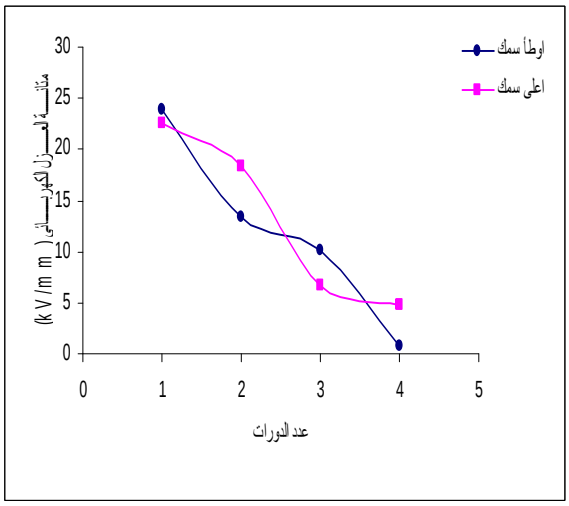
الشكل (12) تغير متانة العزل مع عدد الدروات لأنموذج (PVC Pure) لاعلى معدل صعود للفولتية (5 kV/sec).



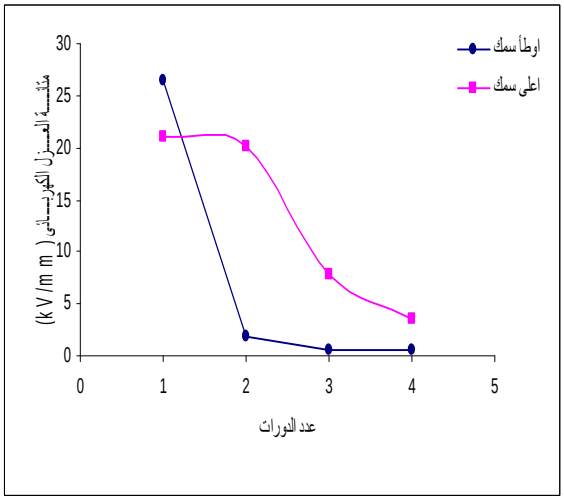
الشكل (13) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin) لاقل معدل صعود للفولتية (0.5 kV/sec).



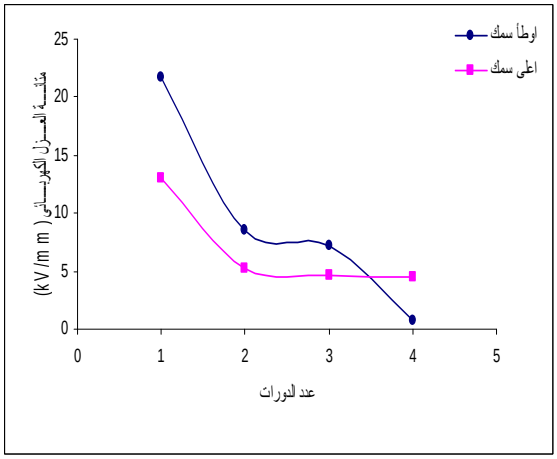
الشكل (14) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin) لاعلى معدل صعود للفولتية (5kV/sec).



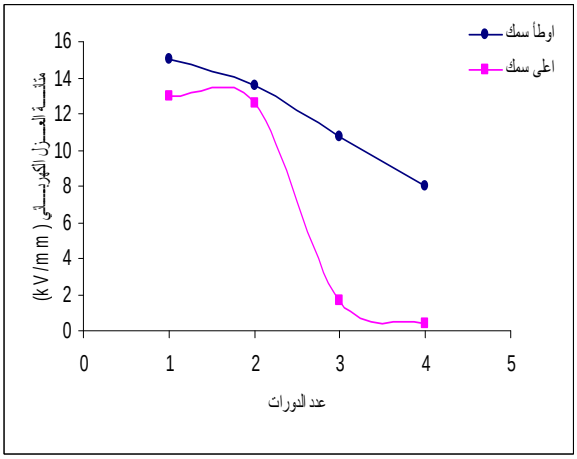
الشكل (15) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin) لاقل معدل صعود للفولتية (0.5 kV/sec).



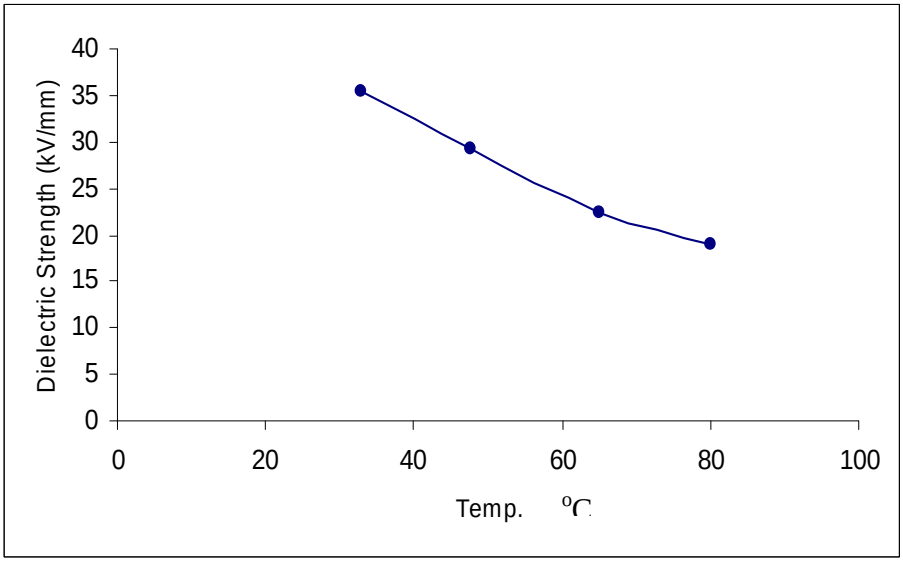
الشكل (16) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin) لاعلى معدل صعود للفولتية (5 kV/sec).



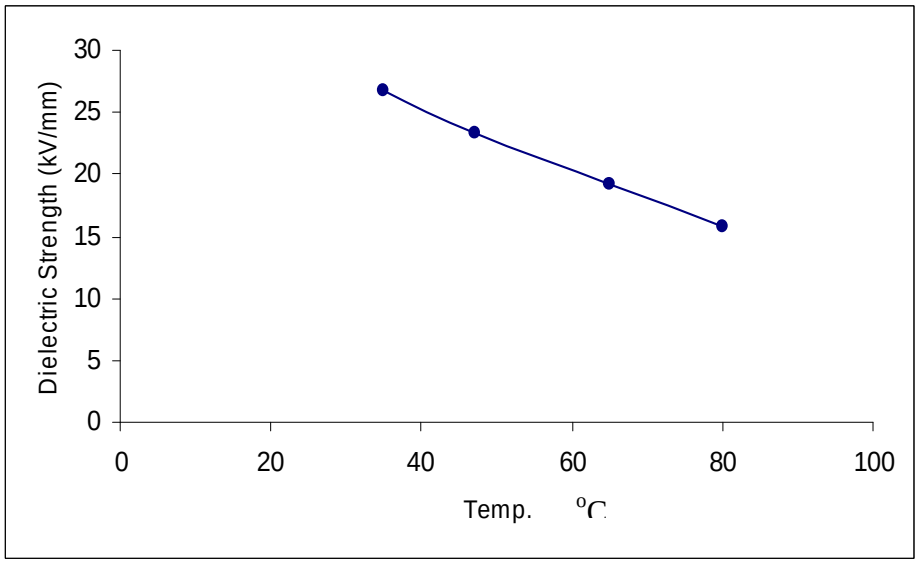
الشكل (17) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin) لاقل معدل صعود للفولتية (0.5 kV/sec).



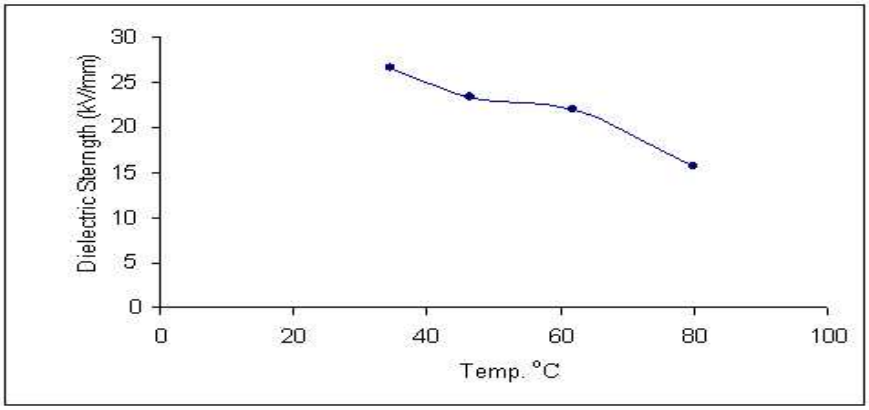
الشكل (18) تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لأنموذج (96% PVC + 4% Kaolin) لاعلى معدل صعود للفولتية (5 kV/sec).



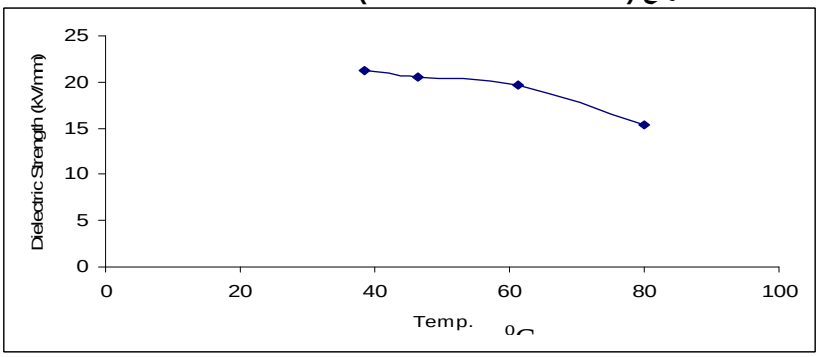
الشكل (19) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة لأنموذج (PVC Pure).



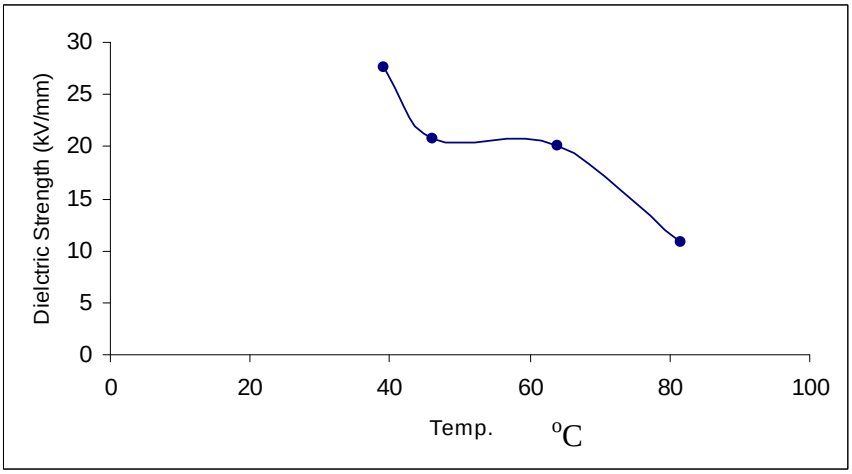
الشكل (20) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة
لأنموذج (99% PVC + 1% Kaolin).



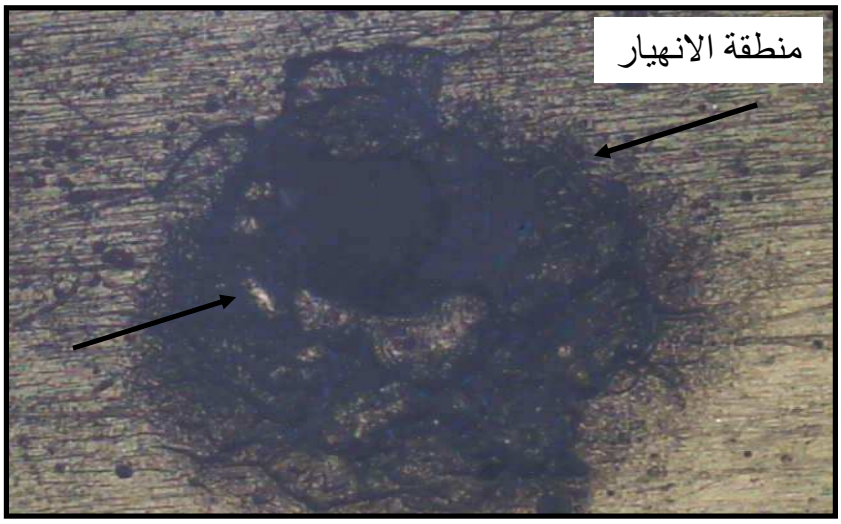
الشكل (21) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة لأنموذج (98% PVC + 2% Kaolin).



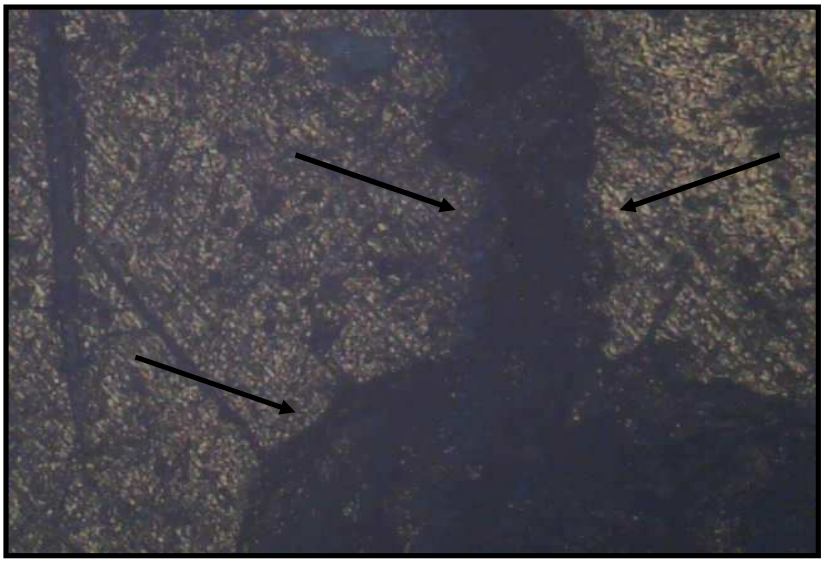
الشكل (22) تغير متانة العزل الكهربائي مع درجات الحرارة



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



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



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