Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

دراسة بعض العوامل المؤثرة في متانة العزل الكهربائي لمتراكبات البيزوكهربائية النانوية (Blend / PZT).

جعفر كريم جياد السويداوي[1]، أحمد حماد مناجد الفلاحي[2]
[1,2]قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الانبار، الرمادي، العراق.
[1]Jaf62923@gmail.com,[2] dr.a_alfalahi@yahoo.com

الملخص

يهدف البحث إلى دراسة العوامل المؤثرة في متانة العزل الكهربائي لخليط بوليمري من راتنج الايبوكسي والبولي استر غير المشبع ومتراكباته. تم تحضير متراكبات أساسها خليط بوليمري [80% Ep + 20% UPE] المدعم بمسحوق بيزوكهربائي نانوي (PZT) وبحجم بلوري (1-10 nm) وبنسب وزنية (2، 4، 6 Wt%). درست متانة العزل الكهربائي (E_{br}) لنماذج الخليط والمتراكبات قبل وبعد الغمر بالماء الاعتيادي لمدة (11 أسبوعا). بينت النتائج أن متانة العزل الكهربائي تتناقص مع تناقص معدل صعود الفولتية ومع زيادة سمك العينة (19.38 kV/s −35.13 kV/s) وبشكل لا خطي، ومع عدد الدورات. بينما زادت متانة العزل الكهربائي مع زيادة نسبة الإضافة (43 .82 kV/s − 36.77 kV/s). من جهة أخرى أدى غمر العينات في الماء إلى انخفاض واضح في متانة العزل الكهربائي لكل من الخليط والمتراكبات.

الكلمات الدالة : متانة العزل الكهربائي؛ مواد متراكبة؛ أيبوكسي؛ بولي استر، PZT؛ مواد بيزوكهربائية.

DOI: http://doi.org/10.32894/kujss.2018.13.4.15

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

Study of Some Influencing Factors on the Dielectric Strength of (Blend \ PZT) Nanocomposites Piezoelectric

Jaafar K. Ch. Al-Suwaydawei [1], Ahmad H. M. Al-Falahi [2]
[1,2] Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, University of Anbar, Iraq
[1]Jaf62923@gmail.com,[2] dr.a_alfalahi@yahoo.com

Abstract

The aim of this research is to study the affecting factors on the dielectric strength of polymeric blend [of Epoxy resin and unsaturated polyester] and its composites. A Nano composites were prepared based on polymeric blend (80% Ep + 20% UPE), supported by Nano Piezoelectric powder (PZT), of crystalline size (1-10 nm) with weight percentages (2, 4 and 6 Wt%). Dielectric strength (E_{br}) for the blend and composite samples was studied before and after immersion in water for 11 weeks. The results showed that (E_{br}) decreases with average the rise of voltage decreasing, increasing the thickness of samples and by form nonlinearly (35.13 kv/s – 19.38 kV/s), and with the number of cycles While (E_{br}) increases with increasing the addition of ratio (36.77 kV/s – 43.82 kV/s). On the other hand, immersing the samples in the water caused a clear reduction of the dielectric strength for each of the blend and composites.

Keywords: Dielectric strength, Materials Composite, Epoxy, Polyester; PZT, Materials Piezoelectric**.**

DOI: http://doi.org/10.32894/kujss.2018.13.4.15

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

1. المقدمة :

تمتاز المواد المتراكبة البوليمرية بخاصية عزل كهربائي جيدة، وخاصة المدعمة بالمساحيق السيراميكية لما تتميز به المواد السيراميكية من عزل كهربائي عالي لكونها ذات مقاومة نوعية عالية و ذلك يعود إلى الترابط القوي بين الذرات المكونة لتلك المواد [1]. تقع معظم المواد السيراميكية ضمن العوازل اللاخطية وهي المواد التي تعتمد فيها متانة العزل على المجال الكهربائي وتمتاز هذه العوازل بخاصية الحديد وكهربائية وعوازل الحديد وكهربائية مواد ذات عازليه عالية تصل أعظم قيمة لها عند درجات حرارية محددة أو شدة مجال معينة [2]. أما خاصية البيزوكهربائية Piezoelectric (أجهادية– كهربائية) هي ظاهرة تولد شحنات كهربائية عندما تخضع المادة لإجهاد معين، وعكس الحالة تصح أيضاً بحدوث تغيير في الأبعاد الخطية للمادة بتأثير المجال الكهربائي، وفي كلتا الحالتين تسمى هذه الخاصية بالبيزوكهربائية. إن المواد السيراميكية مثل تيتانيت زركونيت رصاص PZT تمتلك خاصية البيزوكهربائية. ويعد PZT من مواد البيزوسيراميك الأكثر استعمالا في محولات الطاقة (Transducers)حيث إن هذه المواد تملك قيما عالية من معامل البيزوكهربائية الشحني ومعامل الاقتران الكهروميكانيكي، وثابت العزل الكهربائي بالإضافة لذلك تملك عامل فقد كهربائي واطئ اي زيادة في متانة العزل الكهربائي وقيم واطئة لمعامل البيزوكهربائية الفولتي لذلك فأنها تستعمل في تطبيقات مختلفة [3]. من ابرز الخصائص التي تتميز بها البوليمرات المدعمة بالمساحيق السيراميكية هي ارتفاع متانة العزل الكهربائي والتي تحصل عند تسليط مجال كهربائي قوي على مادة عازلة أعلى من القيمة الحرجة المحددة [4]. وان من اهم الأمور التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند اختبار أي مادة عازلة هو مدى قدرتها على تحمل الجهد الكهربائي دون انهيار، والانهيار الكهربائي يعني فقدان العازل لخاصية العزل عندما يبلغ المجال الكهربائي المسلط على المادة العازلة القيمة الحرجة [5]. وان أقصى مجال يمكن تسليطه على العازل دون انهياره يعرف بمتانة العزل الكهربائي (Dielectric Strength(E_{br}، وتعرف بأنها مقدار مقاومة المادة العازلة لأقصى فولتية مسلطة عليها لفترات زمنية طويلة من دون أن تنهار أو تفشل، وسبب حدوث الانهيار هو الزيادة في التيار الكهربائي بصورة مفاجئة عند تجاوز الفولتية المسلطة قيمة معينة تسمى فولتية الانهيار(Breakdown Voltage(V_B) [6]. يمكن قياس متانة العزل الكهربائي بواسطة المجال الكهربائي (E_{br}) الذي تفشل أو تنهار عنده المادة العازلة [7] وان:

$$E_{br} = \frac{V_{br}}{t} \qquad (1)$$

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

اذ أن:

V_{br}: أقصى فولتية مطبقة على العازل.

t: سمك المادة العازلة.

تقاس متانة العزل أو الانهيار الكهربائي بوحدات kV/cm أو kV/mm، و يستدل على حدوث الانهيار في المادة العازلة من خلال حدوث أحد الحالات التالية :

1- ثقب في المادة العازلة.

2- صهر أو حرق في المادة العازلة.

تعتمد متانة العزل على العديد من العوامل مثل التركيب البلوري، العيوب والشوائب الموجودة في المادة العازلة، وعوامل خارجية مثل شكل الاقطاب المستخدمة في تسليط الجهد الكهربائي، وطبيعة السطح الخارجي وظروف الاختبار من درجة حرارة ورطوبة وتردد المصدر وزمن تسليط الفولتية على العازل [8]. وهناك عدة أنواع للانهيار الكهربائي منها:

1.1 الانهيار النقي:

يعرف الانهيار النقي أو الذاتي للمواد الصلبة بوساطة مواصفات مادة خالية من العيوب تحت ظروف الاختبار التي تؤدي الى الانهيار عند اعلى فولتية ممكنة.

أن الفترة الزمنية التي يحدث فيها الانهيار الذاتي يكون قصير جدا بحدود (10^{-8}- 10^{-7}s) لذلك من المفترض ان تكون ذات طبيعة الكترونية. علما ان الانهيار النقي لا يعتمد على شكل وابعاد النماذج، او على طبيعة وهندسة الاقطاب [9].

1.2 الانهيار الكهرو حراري:

يحدث الانهيار الكهروحراري عند تسليط فولتية على المادة العازلة وهذا يؤدي الى انطلاق حرارة من المادة العازلة نتيجة للفقدان العزلي بسبب تيارات التسرب و الذي يزداد بزيادة درجة الحرارة. ان مقدار الحرارة الناتجة موضعيا تكون اكبر من الحرارة المشتتة وذلك يعود الى التوصيلة الحرارية الرديئة للمواد العازلة وظاهرة الانهيار الكهروحراري تمتد إلى فترات طويلة نسبياً تبدأ من (10^{-3} s) وقد تصل الى ثواني ودقائق وفي بعض الحالات تصل الى أيام وحتى أسابيع وهناك أنواع أخرى من

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

الانهيار التي تحصل في المادة العازلة وهي الانهيار الكهروميكانيكي (Electromechanical Breakdown)، انهيار التآكل (التعرية) Erosion Breakdown و الانهيار السيال Streamer Breakdown [7].

2. الجزء العملي:

2.1 المواد المستعملة:

2.1.1 المادة الأساس:

تم تحضير الخليط البوليمري باستخدام راتنج الايبوكسي والبولي استر غير المشبع وبنسبة خلط [Ep80%+UPE20%] كمادة أساس، باستخدام الطريقة الوزنية، والايبوكسي المستخدم {سويسري الصنع من شركة (SWISS CHEM) نوع (EUXIT50)} وهو بوليمر متصلد حراريا عبارة عن سائل شفاف له القابلية على الالتصاق وقليل الانكماش كثافته ($1.05g/cm^3$) يتحول إلى الحالة الصلبة بإضافة المصلد الخاص به بنسبة خلط (3:1) بدرجة حرارة المختبر، والبولي استر المستخدم {مصنع من قبل الشركة السعودية للراتنجات الصناعية المحدودة} وهو بوليمر متصلد حراريا كذلك وعبارة عن سائل شفاف اصفر اللون ذو كثافة ($1to\ 1.3g/cm^3$) ويكون قابل للمعالجة الى الحالة الصلبة بدرجة حرارة المختبر بإضافة المصلد الخاص به وبنسبة (0.02g لكل 1g).

2.1.2 مادة التدعيم :

استخدم مسحوق تيتانات زركونيوم رصاص النانوي Lead Zirconium Titanate (PZT) حجمه البلوري (10nm) ونقاوته (99.99%) ذو كثافة عالية ($7.5\text{-}8g/cm^3$) وهو مسحوق ابيض اللون ويعتبر من المواد البيزوكهربائية، مصنع من قبل شركة (Deyang nano mater, Co.,ltd) الصينية.

2.2 تحضير المتراكبات :

حضرت عينات المتراكبات باستخدام طريقة القولبة اليدوية (Hand Lay-Up Molding) وصب الخليط ومادة التدعيم في قوالب من ورق الفابلون الشفاف المعدة مسبقا و كالاتي:-

1- الخليط البوليمري (Ep+UPE) الغير مدعم.

2- الخليط المدعم بمسحوق(PZT) وبنسب إضافة (2,4,6 Wt%).

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

وتركت القوالب لمدة (72 ساعة) لضمان تصلد الخليط وضمان تجانسه ، ووضعت في فرن التجفيف للمعالجة الحرارية وبدرجة حرارة (50-60°C) ولمدة ثلاث ساعات لإتمام عملية البلمرة. قطعت عينات البحث بالأشكال والأبعاد الخاصة بكل فحص.

3. الاختبارات:

مَتانة العَزل الكَهربائي:

استخدم لقياس متانة العزل الكهربائي نوع (BAUR – PGO - S3) ألماني المنشأ يتألف من منظومة مكونة من الأجزاء التالية:

1. مجهز الفُولتية (High Voltage) ويَعمل ضمن المدى (0-60 kV)، وبالتردد (50 Hz).
2. سائل ذو عازلية عالية ولهذا الغرض أستعمل زَيت المحولات عازليته (40.8 kV/mm) وذلك لغرض منع حصول انتقال الشرارة العرضي (Flashover) ، وهذا الزيت يجب تبديله لِضَمان عَدم تأينه للحصول على قياسات دَقيقة.
4. أقطاب جَيدة التَوصيل الكهربائي كروية الشَكل مَصنوعة من البراص يبلغ قطرها (2mm)، يوضع نموذج الأختبار بين الأقطاب (مع مراعاة ان تكون الأقطاب وعينة الأختبار مغمورة كلياً بالزيت). وبعد قياس اقصى فولتية انهيار وباستعمال المعادلة (1) تم تعين متانة العزل الكهربائي E_{br}.

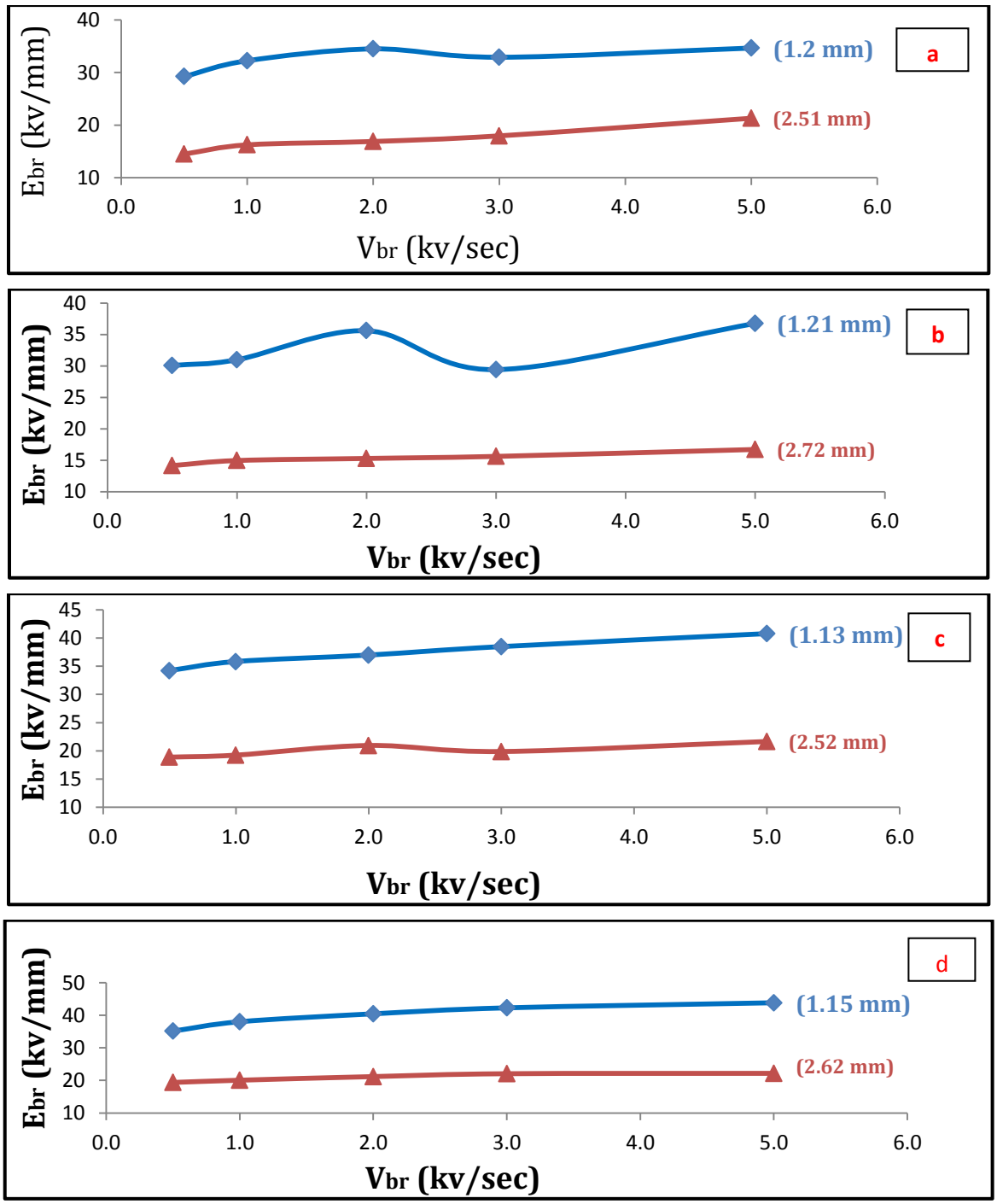
4. النتائج والمناقشة:

4.1 تأثير مُعدل صعود الفولتية:

الشكل 1 يوضح تغير متانة العزل الكهربائي(E_{br}) مع مُعدل صعود الفولتية لنماذج الخليط البوليمري المتراكبات ويلاحظ ان متانة العزل الكهربائي تزداد مع زيادة معدل صعود الفولتية، والسبب في ذَلك يعود الى ان مُعدل صعود الواطئ الفولتية الواطئ يعمل على زيادة تيارات التَسرب مما يؤدي الى زيادة الحرارة الناشئة منها، وان هذه الزيادة في الحرارة الموضعية تؤدي الي انخفاض في مقاومة المادة العازلة، وعليه فان متانة العزل الكهربائي ستنخفض مع انخفاض مُعدل صعود الفولتية وهذا ما يتفق مع نتائج الباحثين (شهاب و أماني) [10]. أن من أسباب انخفاض(E_{br}) مع انخفاض معدل صعود الفولتية أيضا هو حصول تأثيرات تَراكُمية للاصطدام التي تؤدي الى تحطم المواد وتسريع الانهيار بواسطة الانهيار الكهروحراري.

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

في بعض الحالات ممكن حصول شذوذ في هذا السلوك وسبب ذلك وجود عيوب داخل المادة المتراكبة والتي تعتبر نقاط ضُعف في المادة إذ أن الشرارة الكهربائية من الممُكن أن تمر في نقاط العيوب و تخترق العازل الكهربائي لحظة الانهيار.



الشكل 1: تغير متانة العزل الكهربائي مع معدل صعود الفولتية لنماذج الخليط ومتراكباته لأقل وأعلى سمك

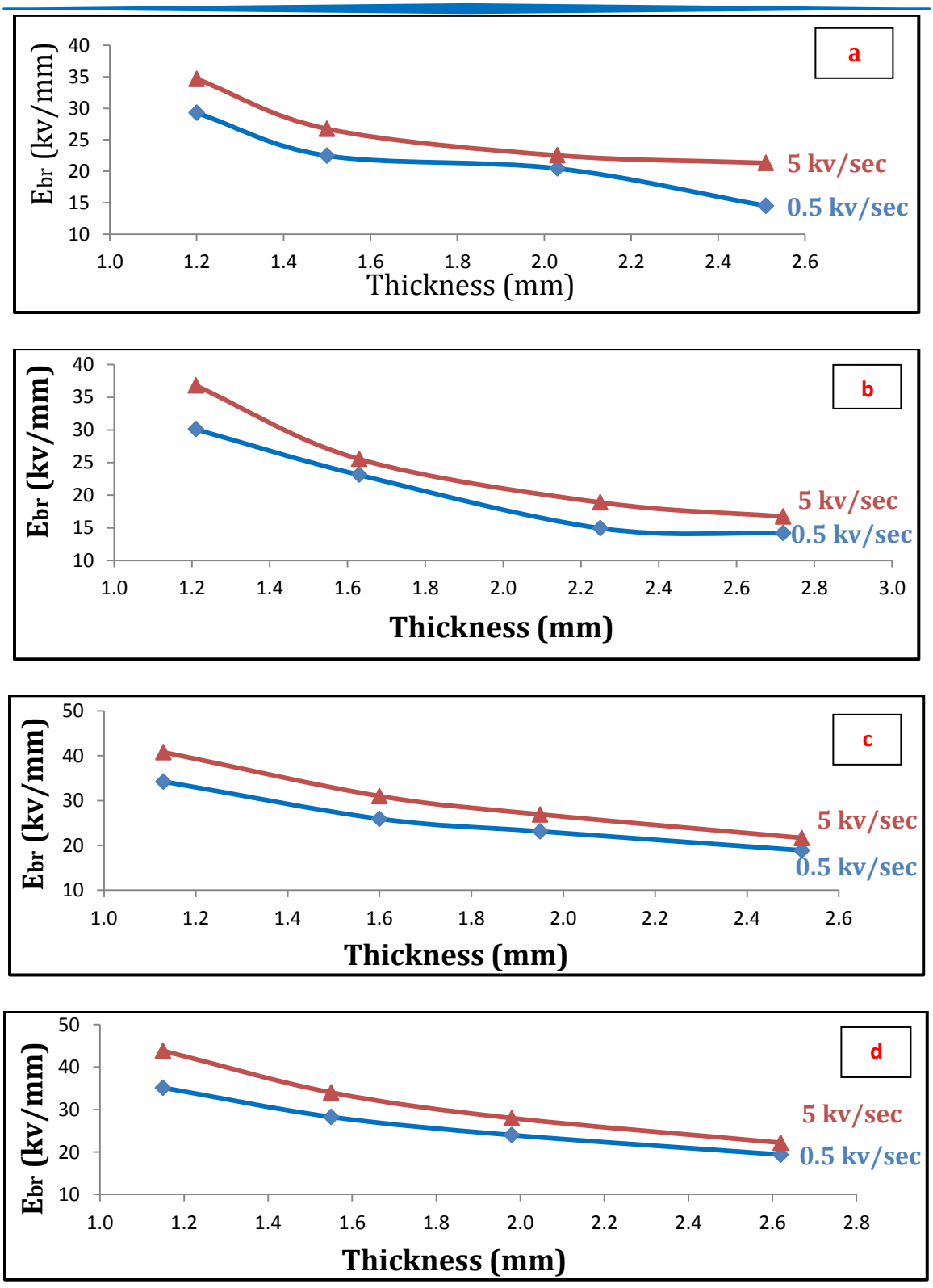
a: نموذج (Blend) **b,** نموذج (Blend + 2 Wt% PZT) : **c,** نموذج (Blend + 4 Wt% PZT) : **d,** نموذج (Blend + 6 Wt% PZT)

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

4.2 تأثير السُمك:

الشكل 2 يبين تأثير سمك المادة على متانة العَزل الكَهربائي للنماذج المحضرة من الخليط ومتراكباته، ويلاحظ من الأشكال أن متانة العزل الكهربائي تنخفض كلما ازداد سمك المادة وبشكل غير خطي. والسبب في ذلك يعود إلى الاستقطاب الذي يسبب تناقص في المجال الكهربائي للمادة العازلة و هذا التناقص يزداد مع زيادة سُمك المادة، وان تيارات التسرب تزداد بوجود الشوائب التي يحتويها تيتانات زركونيوم رصاص، وصعوبة استرجاع الحَرارة وطرحها من العازل إلى المحيط، كل هذه العوامل مجتمعة تؤدي إلى انخفاض (E_{br}). في بعض الحالات يمكن حصول شذوذ لهذا السلوك أي أن (E_{br}) يزداد بزيادة سُمك المادة لبعض القيم وذلك بسبب المسار الطويل الذي تتخذه الشرارة الكهربائية لوجود أطوار مختلفة داخل المادة العازلة و هذه الأطوار تعمل عائق لمرور الشرارة لتأخذ مساراً مُتعرجا بدلا من المسار المباشر بين القطبين.

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)



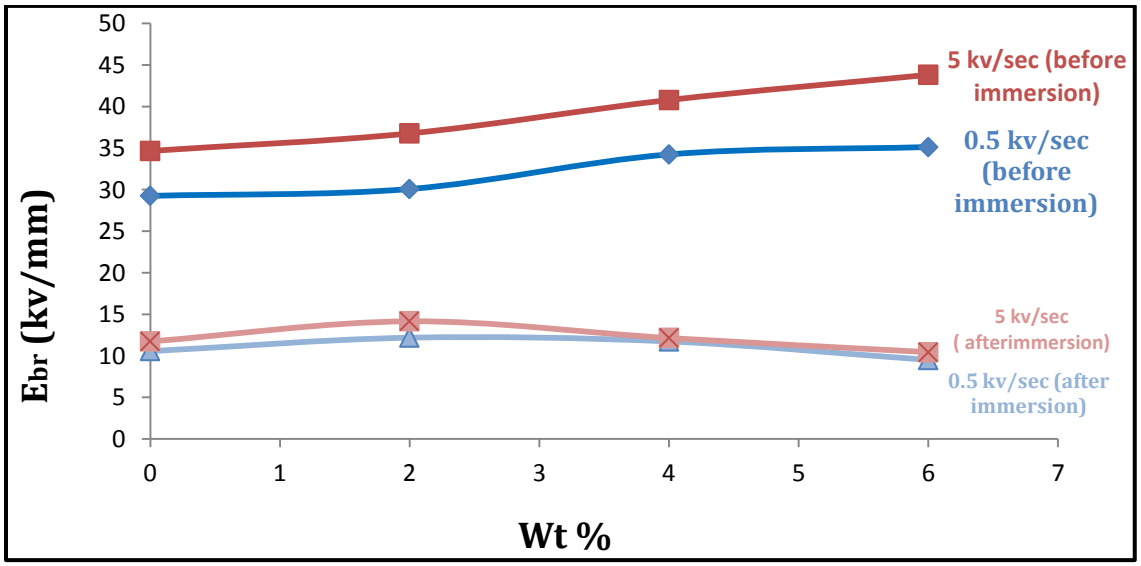
الشكل2: تغير متانة العزل الكهربائي مع سمك المادة العازلة لأقل وأعلى معدل صعود فولتية

a: نموذج (Blend) نموذج : **b**, (Blend + 2 Wt% PZT) نموذج : **c**, (Blend + 4 Wt% PZT) نموذج : **d**, (Blend + 6 Wt% PZT)

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

4.3 تأثير نسبة إضافة PZT والغمر بالماء:

الشكل 3 يوضح تغير متانة العزل الكهربائي مع تغير نسب إضافة مادة (PZT)، قبل وبعد الغمر بالماء الاعتيادي. ويلاحظ ان متانة العزل الكهربائي للمتراكبات أعلى منها للخليط البوليمري وأن متانة العزل للمتراكب تزداد مع زيادة نسبة الإضافة وان هذه النتيجة تتفق مع E. Tuncer, [11] والباحثة هدى [12]. وذلك لكون المواد السيراميكية ذات عزل كهربائي عالي مقارنة مع المواد البوليمرية و إن استخدام الدقائق ذات حجم (1-10 nm) يؤدي إلى انتشارها داخل الخليط البوليمري وبالتالي حصول كثافة عالية للدقائق المنتشرة مما يؤدي إلى إعاقة مرور التيار ،كما إن ارتفاع متانة العزل الكهربائي يعزى إلى عامل الفقد الواطئ الذي تتميز به مادة PZT البيزوكهربائية. وبعد الغمر بالماء يلاحظ أن متانة العزل الكهربائي قد انخفضت لكل من الخليط ومتراكباته وهذا يتفق مع Saikat [13]. إذ أن امتصاص العينات للماء وانتشاره داخل المادة أدى إلى تكوين فجوات تسهل من عملية مرور التيار فتزداد ناقليه الكهرباء مما يؤدي إلى خفض متانة العزل.



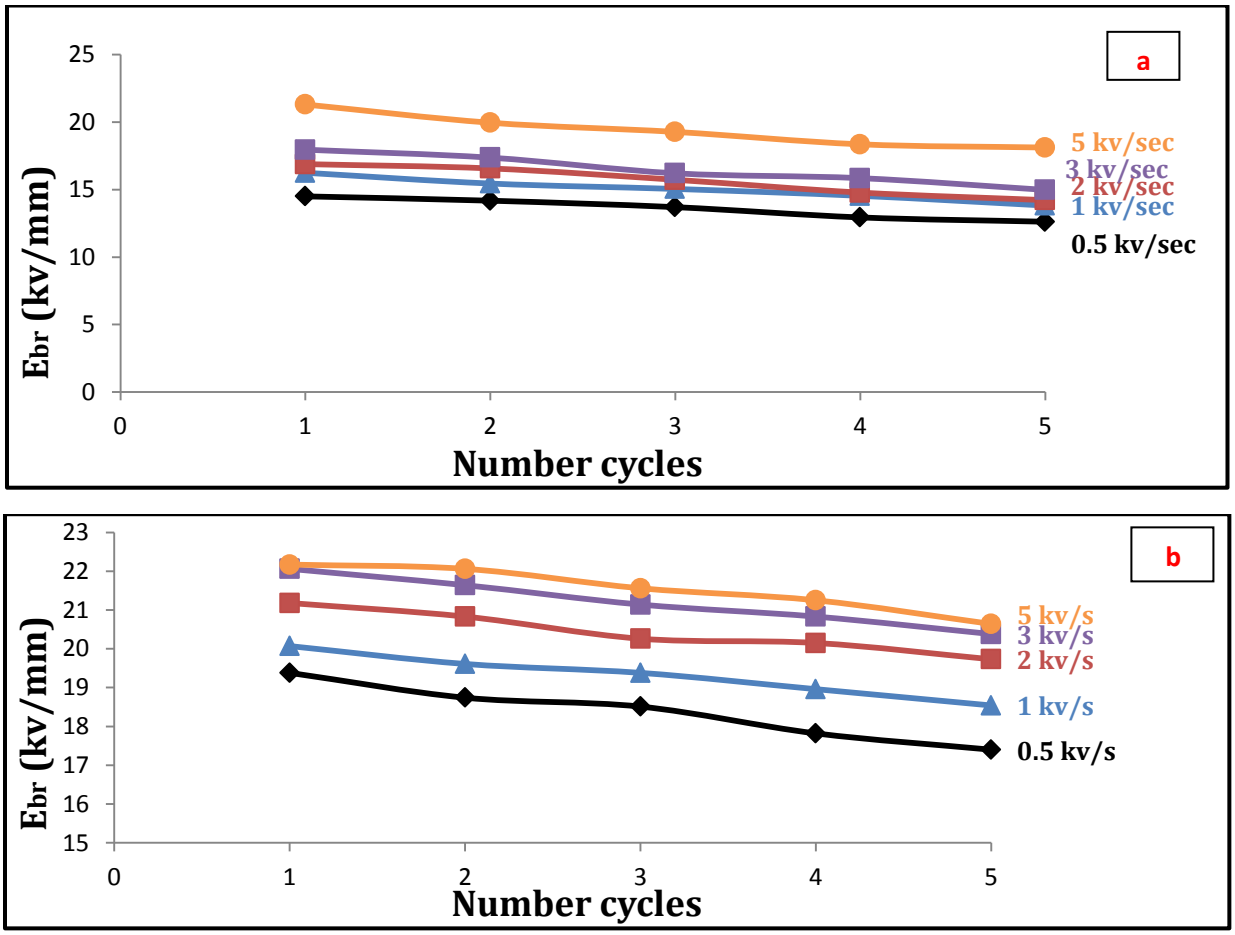
الشكل 3: تغير متانة العزل الكهربائي مع نسب إضافة PZT لأقل سمك (1.15mm) قبل وبعد الغمر بالماء

4.4 عَدد الدَورات:

الشكل 4 يوضح تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات للخليط ومتراكباته ويُعتبر من الاختبارات المهمة و التي من خلالها يُمكننا مَعرفة إمكانية استخدام العازل الكهربائي الذي يحصل فيه أنهيار كهربائي وإعادته إلى الخدمة مرة أُخرى في تطبيقات تحتاج إلى فولتيات أقل. من ملاحظة هذه الاشكال يتبين الانخفاض الذي يَحصل في متانة العزل الكهربائي بَعد الدورة الأولى، و سبب هذا الانخفاض يُعزى إلى حدوث تغيرات كيميائية تظهر في موقع انتشار الشَرارة الكهربائية. ويلاحظ

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

بشكل عام ان العَينات التي فُحِصَت ضمن معدلات صعود فولتية مُختلفة يَحصل فيها تَدهوراً وذلك بسبب التأثيرات الكهروحرارية لعملية الانهيار الكهربائي، أو بسبب عملية الأنثقاب الحاصلة نتيجة شدة المَجال الكهربائي العالي ضمن الانهيار الكهربائي النَقي. في حالة معدلات الصعود البطيئة فأن التدهور الكبير في الانهيار الكهربائي كان واضحاً نتيجة تغيرات كبيرة في بنية المادة العازلة. في بعض الحالات تظهر بعض النقاط الشاذة في تحديد متانة العزل الكهربائي وهذا يقع ضمن نسب الخطأ لكون هذا الاختبار يعد من الفحوصات الاتلافية والذي يعتمد بشكل كبير على بنية وتركيب المادة ولذلك يكون تكرار النتائج ضعيفاً في هذا النوع من الفحوصات.



الشكل 4: تغير متانة العزل الكهربائي مع عدد الدورات لنماذج الخليط والمتراكب المدعم بنسبة 6Wt% ولأعلى سمك فقط

a – نموذج (Blend) وللسمك,(2.51mm) , **b-** نموذج (Blend +6 Wt% PZT) للسمك(2.62mm)

5. الاستنتاجات:

التدعيم بمسحوق PZT يؤدي إلى تشتيت المجال الكهربائي داخل المادة المتراكبة وتحسين متانة العزل الكهربائي وبصورة تتناسب مع زيادة نسبة الإضافة. تعتمد متانة العزل الكهربائي على سمك المادة العازلة ومعدل صعود الفولتية إذ وجد أن

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

العلاقة بين سمك المادة ومتانة العزل هي علاقة غير خطية. انتشار الماء في الخليط البوليمري والمادة المتراكبة يؤثر سلبا في متانة العزل الكهربائي مع طول فترة الغمر.

المصـــادر

[1] Suchet , "***Electrical Conduction in Solid Materials*",** Pergamen Press , Oxford , 9, (1979).

[2] G. Arit , D. Hennings and G. deWith , "***Dielectric Properties of Fine- grained Barium Titanate Ceramics (BaTio3)***", Journal of applied physics, 58(4), 1619 (1985).

[3] R. Popielarz ,C. K. Chiang and R. Nozaki , Obrzut, "***ferroelectric ceramic composites from 100 Hz to 10 GHz. Macromolecules***", Journal Dielectric properties of polymer, 34, 5910 (2001).

[4] K. J. Pascoe, "***Properties of Materials for Electrical Engineers***" , John Wiley and Sons , London , (1974).

[5] J. Rag ,E. Woohan and K. Lee ,"***Dielectric Properties of Polymer-Ceramiccomposite for Embedded Capaccitors*** ", Transaction On Electrical and Electronic Materials 10, 116(2009).

[6] L. Solymar and D. Walsh, "***Electrical properties of Material***" , Published in the United State by Oxford University Press , INC , New York , (1998).

[7] E. Kuffel and M. Abdullah **,"*High voltage Engineering*** ", 2nd, New Delhi, 396 (2000).

[8] محمد قاسم سلمان، " ***دراسة الخواص الكهربائية للبورسلين عالي الصهر المحضر من الخامات العراقية*** "، مجلة ديالى للعلوم الهندسية، (2010).

Kirkuk University Journal /Scientific Studies (KUJSS)
Volume 13, Issue 4, December 2018 , pp. (202-214)
ISSN: 1992-0849 (Print), 2616-6801 (Online)

[9] Kai Wu and L. A. Dissado , " ***Percolation Model for Electrical Breakdown in Insulating Polymers*** **",** Applied Physics Letters, 85(19), 8 (2004).

[10] شهاب أحمد زيدان و أماني زهير محمد، "***دراسة خصائص المتانة الكهروميكانيكية لمتراكبات الايبوكسي المشتتة بمسحوق السليك***"، مجلة ابن الهيثم للعلوم الصرفة والتطبيقية، 30(1)، (2017).

[11] E. Tuncer, I. Sauers, and K. L. More, "***Enhancement of Dielectric Strength in Nanocomposites***" , Nanotechnology, (18), 32, 845 (2007).

[12] هدى جبار عبد الحسين، " ***تصنيع عوازل حرارية و كهربائية من متراكبات الايبوكسي الدقائقية*** "، *مجلة كلية التربية الأساسية* ، 12، 89، (2015).

[13] Saikat Swapan Dutta, ''***Water absorption and dielectric properties of Epoxy insulation*** ", Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, (2008).