Modification of Dielectric Strength of Iraqi Kaolin by the Addition of Micro and Nano Zirconia

Najah Kadum Alian **Mohammed Hedi Shinen**

Al-Furat Al-Awsat Technical University Technical Institute of Kerbala

University of Babylon– College of Basic Education – Department of Science

Anwar Hussain Ali

Al-Mustansiria University,College of Science, Department of Physics

najah.almasoudie@yahoo.com

Keywords: Kaolin, Composite, Sugarcane Straw, Micro Zirconia, Nano Zirconia, Poly Vinyl Alcohol, Dielectric Strength.

Abstract

Iraqi kaolin as a matrix material is used as a principle part of the study after additives sugarcane straw in ratio (10%) and (2%) Poly Vinyl Alcohol (PVA) as a binding material. (Micro or Nano) Zirconia has been added to the composite in different ratio (0% , 5 % , 10% , 15% , 20%) for the purpose of improving thermal properties. Samples are formed in a semi-dry pressing with pressure of about (25 Mpa).

The formulation is achieved by using a template of (12 mm) diameter and a time of about (2 min). Then, the prepared samples have been sintered.

Burning process was carried out by three temperature degrees (1000, 1100, 1200) C^o for mean raise about 3 temperature degree / 1 minute and remained at every temperature degree for two hours.

The results showed that the increase in the proportion of (Micro or Nano) Zirconia results in increasing the value of dielectric strength and the best results where achieved by adding Nano Zirconia. The increasing of the burning temperature also leads to increase the value of the dielectric strength.

تحسين متانة العزل الكهربائي لمتراكب الكاؤلين العراقي بإضافة الزركونيا المايكرويه والنانويه

نجاح كاظم عليان
جامعة الفرات الاوسط التقنية
المعهد التقني, كربلاء

محمد هادي شنين
جامعة بابل، كلية التربية الاساسية ,قسم العلوم
قسم العلوم

انوار حسين علي
الجامعة المستنصرية، كلية العلوم
قسم الفيزياء

najah.almasoudie@yahoo.com

الخلاصة

استعمل الكاؤلين العراقي كمادة اساس في هذه الدراسة بعد اضافة مخلفات قصب السكر بنسبة (10%) و (2%) من بولي فاينيل الكحول (PVA) كمادة رابطة . اضيفت نسب مختلفة من الزركونيا (المايكروية او النانوية) الى المتراكب (0%،5%،10%،15% ، 20%) لغرض تحسين خواصه الحرارية.

شكلت العينات بطريقة الكبس شبه الجاف بقوة كبس (25 Mpa) باستخدام قالب قطره (12 mm) وبمدة زمنية مقدارها (2 min). ثم اجراء عملية التلبيد للمكبوسات، حيث تمت عملية الحرق بثلاث درجات حرارة (C^o(1000، 1100 ، 1200) لمعدل ارتفاع مقداره (3) درجة حرارة / دقيقة و بقيت عند كل درجة حرارة لمدة ساعتين.

لقد ظهرت النتائج ان زيادة نسبة الزركونيا المضافة سواء اكانت مايكروية ام نانوية تؤدي الى زيادة قيم متانة العزل الكهربائي و حصلنا على افضل النتائج بإضافة الزركونيا النانوية، وكذلك تؤدي زيادة درجة حرارة الحرق الى زيادة قيم متانة العزل الكهربائي .

الكلمات المفتاحية: الكاؤلين، المتراكب، مخلفات قصب السكر، زركونيا مايكرويه، زركونيا نانوية، بولي فاينيل الكحول، متانة العازل الكهربائي.

1. المقدمة: Introduction

تعرف المواد السيراميكيه على انها مركبات لا عضوية وغير معدنية تعالج بالحرارة العالية ، لها بنية بلورية معقدة تربطها اواصر ايونية او تساهمية او مشتركة بينهما، تعد الاكاسيد، الكاربيدات، النتريدات، السيليكات والبوريدات من اشهر مركباتها [1] .

تقسم المواد السيراميكية في الوقت الحاضر الى اقسام عديدة بالاستناد الى متغيرات مختلفة ، لكن اكثر ما هو متفق عليه هو تقسيم السيراميك [2]:

اولاً : السيراميك التقليدي Traditional Ceramic

ثانياً : السيراميك المتقدم Advanced Ceramic

السيراميك التقليدي عادة يتضمن التقنيات القديمة في صناعة السيراميك وهو عبارة عن مركبات طينية طبيعية ومن انواعه الطابوق، الخزف، الكونكريت والمنتجات البيضاء. اما السيراميك المتقدم او ما يطلق عليه احياناً السيراميك الدقيق فيشمل كافة المنتجات السيراميكيه التي استخدمت في تصنيعها مواد اوكسيديه عالية النقاوة بتقنيات حديثة تؤدي الى تحسين خاصية او مجموعة من الخواص منها الحرارية او الكهربائية او المغناطيسية [3]

احدى المزايا الاساسية لصناعة السيراميك هي انها الاساس الناجح للكثير من الصناعات الاخرى فعلى سبيل المثال، الحراريات هي جزء أساس في صناعة التعدين، مواد التجليخ هي اساس صناعة ادوات المكائن، منتجات الزجاج هي اساس صناعة الالكترونيات والمواد الكهربائية، وقود اوكسيد اليورانيوم هو اساس صناعة الطاقة النووية والاسمنت هو اساس صناعة البناء.[4]

لقد ازداد الطلــب على المنتجات السيراميكية لتوفر موادها الاولية و سهولة تصنيعـــــها وخواصها العالية فضلاً عن قلة تكلفة بعضها، وقد اصبحت شائعة الاستخدام حتى ان الكثير من المواد الصناعية تصنف ضمن المنتجات السيراميكية وذلك لتشابه خصائصها مع خصائص السيراميك ومن هذه المواد بلورة الكوارتز المستخدمة في توليد اشعة الليزر. [5]

تتكون المواد السيراميكية بصورة عامة من تجمعات ذات اشكال غير منتظمة هي الحـــــبيبات والمسامات، اذ يسمى السطح البيني (صلب – صلب) بالحدود الحبيبية ويسمى السطح البيني (صلب – غاز) بالسطوح الحرة، وتكوّن الحدود الحبيبية والسطوح الحرة التركيب الدقيق للمادة السيراميكية(Microstructure) وتعتمد الخصائص الفيزيائية للسيراميك على هذا التركيب الدقيق فالحواص الميكانيكية تعتمد على حجم الحبيبية بينما تعتمد الخواص الحرارية على وجود السطح البيني اي الحدود الحبيبية والسطوح الحرة.

ان علم السيراميك يتخصص بمجال اختيار المواد السيراميكية الاولية من اكاسيد وغير اكاسيد ومواد طينية اولية ونسبها الوزنية وخصائصها الفيزيائية والكيميائية وكذلك طرائق تحضير مساحيقها من عمليات طحن ومزج واساليب معاملتها الحرارية لأغراض دراسة تأثير العوامل العديدة عليها من تفاعلات و تغيرات فيزيائية عند درجات الحرارة العالية وعمليات التلبيد والتزجيج واعادة تبلور ونمو حبيبي وما قد يصاب هذه العمليات من تشوهات ومشاكل قد تؤدي الى تغير صفات هذه المواد ومن ثم دراسة الخصائص الفيزيائية للمنتجات النهائية.[6]

في عام (1987) درس [7] خواص العزل الكهربائي للكاؤلين العراقي المضاف اليه نسب مختلفة من الفلدسبار وفي مدى الترددات الواطئة، حيث تمت الدراسة بإضافة كمية من فلدسبار البوتاسيوم وفلدسبار الصوديوم وفلدسبار الكالسيوم وقد وجدوا ان تأثير العوامل (الضغط، الكبس ،درجة الحرارة الحرق ودرجة حرارة القياس) قليل على ثابت العزل ضمن الترددات (300 Hz <f<100KHz) ، ولكنه يزداد بزيادة درجة حرارة الحرق ودرجة حرارة الوسط عند القياس. اما الفقدان العزلي فانه يزداد بزيادة التردد ضمن المدى اعلاه، لكن يزداد بارتفاع درجة حرارة القياس. ووجدوا ان ثابت العزل والفقدان العزلي يزدادان بزيادة ضغط

الكبس عند التشغيل، وان زيادة نسبة الفلدسبار (بوتاسيوم او صوديوم) تزيد من ثابت العزل وبالوقت نفسه تزيد من الفقدان العزلي .

درست [8] الخواص الفيزيائية للعازل الكهربائي السيراميكي ذي الجهد العالي المشكل من (كاؤلين دويخله، رمل زجاج ارضمه وفلدسبار البوتاسيوم) وتوصلت الى ان الكثافة الحقيقية، الكثافة الحجمية، المسامية الظاهرية، امتصاصية الماء، مقاومة الانضغاط ومقاومة الانهيار الكهربائي تصل الى افضل ما يمكن عند الحرق بدرجة حرارة $1300C^o$ وضغط كبس مقداره 75 Mpa ولخلطة تحتوي على 55% كاؤلين دويخله، 20% رمل زجاج ارضمة و 25% فلدسبار بوتاسيوم.

درس [9] الخواص الكهربائية للبورسلين المشكل من كاؤلين دونجلة، رمل زجاج ارضمة وفلدسبار البوتاسيوم وبنسب وزنية مختلفة وكان التشكيل بطريقة الكبـــس شبه الجاف وبزمن كبس (1 min) وملبدة بدرجات حـــرارة تلبيـــد C^o (1350,1300,1250) وبزمن انضاج 2hr، فوجد ان ثابت العزل الكهربائي يتناقص بازدياد تردد القياس وانخفاضه كلما صغر الحجم الدقائقي لمادة فلدسبار البوتاسيوم، ووجد ان عامل الفقد للجسم البورسليني يزداد بزيادة مسامية الجسم البورسيليني وان متانة العازل البورسيلني تقل بزيادة درجة الحرارة وتزداد بزيادة سمك العازل.

درست [10] امكانية تصنيع عوازل كهربائية من الكاؤلين كمادة اساسية وزجاج جير الصودا كمادة مدعمة ومعرفة تأثير اضافات مختلفة من الزجاج الى الكاؤلين على بعض خواص المتراكب الناتج، تم تشكيل العينات بطريقة الكبس شبه الجاف بقوة كبس (5) طن وبمدة زمنية مقدراها (1 min) وتم حرقها بدرجتي حرارة $750C^o$ و $850C^o$ ومن ثم تم دراسة الخواص الفيزيائية كالمسامية الظاهرية، الكثافة ونسبة امتصاص الماء والكهربائية كمتانة العزل الكهربائي ، لقد بينت نتائج الدراسة ان زيادة نسبة الزجاج تؤدي الى تقليل كل من المسامية ونسبة امتصاص الماء بينما تؤدي الى زيادة قيمة كل من الكثافة وفولتية الانهيار.

2. الجانب النظري: Theoretical Part

2-1 الكاؤلين: Kaolin

اسم الكاؤلين مشتق من اللغة الصينية (Kao-ling) ويعني المرتفع العالي وهو اسم تل يقع شمال الصين. [11] [12] [13]

يعد الكاؤلين احد اهم الخامات الطينية وان معدنه الطيني هو الكاؤلينايت ($Al_2O_3 . 2Sio_2 . 2H_2O$)، ان المعدن الطيني يمثل الصورة النقية للكاؤلين، اذ يتكون خام الكاؤلين من الكاؤلينايت والاكاسيد التي تساعد على الصهر والتي تخفض من درجة حرارة التلبيد وهي (K_2O , Fe_2O_3 , MgO , CaO , N_2O , TiO_2 .....).[12] [13] [11]

تنتج الاطيان بصورة عامة من تحلل الصخور البركانية النارية كصخور الكرانيت والتي تتكون من مجموعة خامات معدنية ويعد الفلدسبار اضعف هذه الخامات عند تعرضه لعوامل التجوية ويتعرض الفلدسبار البوتاسيومي ($K_2O . Al_2O_3 .6SiO_2$) الى الماء يـــــذوب (K_2O) وجزء من السليكا بمرور الزمن، ومع وجود تصريف جيد للماء يحصل تركيز للأكاسيد غير المذابة والتي سوف تتحد مع الماء لتكوين الكاؤلينايت، كما توضح ذلك المعادلة التالية)[14] :

$$\underset{\text{Feldspar}}{K_2O.Al_2O_3.6SiO_2} \xrightarrow{2H_2O} \underset{\text{Kaolinite}}{Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O} + K_2O + 4SiO_2 \qquad \ldots (1)$$

ان المكونات الاساسية للكاؤلين هي (Tamar –Agha, 1993) [15] :

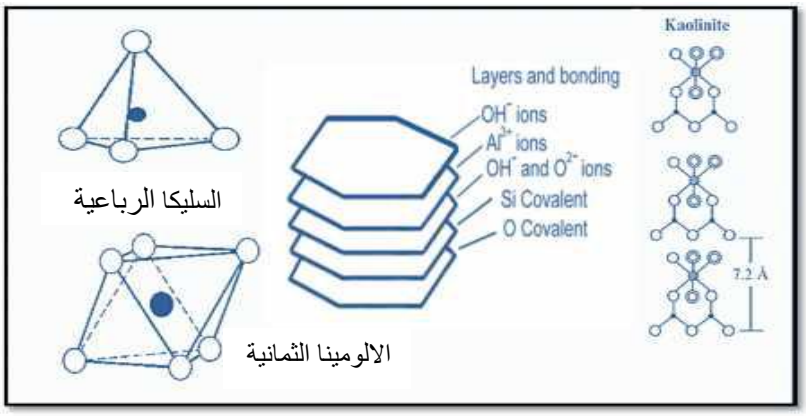
1. 14% ماء تبلور .
2. 39.5 % اوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3) الومينا.
3. 46.5 % اوكسيد السليكون (SiO_2) سليكا.

ان هذه المكونات تمثل الصورة النقية للكاؤلينايت ولكن قلما يوجد بهذه النسب في الطبيعة، اذ يحتوي على بعض الشوائب كمركبات الحديد ..... الخ.

يتكون الكاؤلينايت من طبقات ، تتألف كل طبقة من صفيحتين:

الاولى صفيحة السليكا الرباعية والتي تتكون من ذرتي سليكون (2Si) مرتبطة بثلاث ذرات اوكسجين مكونة (Si_2O_3)، والثانية صفيحة الالومينا الثمانية والتي تتكون من اربع ذرات هيدروكسيد (OH) مرتبطة بذرتي المنيوم (2Al) ، وترتبط الطبقات مع بعضها بعضا بقوى فيزيائية ضعيفة تتمثل بقوى فان درفالز والتي تظهر بين الدقائق القريبة والاواصر الهيدروجينية التي تربط مجموعات الاوكسيد المائي في صفيحة الالومينا مع ذرات الاوكسجين في صفيحة السليكا القريبة .

ان ضعف ترابط طبقات الكاؤلينايت يجعل المعادن الطينية ذات طبقات قليلة السمك وعند اضافة الماء اليها تنزلق الصفائح بسهولة الواحدة على الاخرى مانحة الطين خاصية المرونة ليصبح كتلة متماسكة سهلة التشكيل، لذا يستخدم الكاؤلين في الكثير من الصناعات السيراميكية [11] [16]الشكل (1) يوضح بنية وطبقات الكاؤلينايت .



الشكل (1) بنية وطبقات الكاؤلينايت [16].

يفقد الكاؤلين الماء الشبكي (Lattice Water) عند حـــــرقه بدرجات حرارة اعـــــلى مـــن C^o(150) وتحصل عدة تغييرات كيميائية وفيزيائية هي[11] :

1. يتحول الكاؤلين الى الميتاكاؤلين عند الحرق بدرجة حرارة C^o(450) ، محدثاً تهدم في الشبكة البلورية كما توضح المعادلة الآتية :

$$2(Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O) \xrightarrow{450C^o} 2(Al_2O_3.2SiO_2) + 4H_2O \quad \ldots. (2)$$

Kaolinite — Meta kaolinite

وبعد درجة الحرارية C^o(500) يحدث تقلص كبير في الكاؤلين بسبب تقارب التركيب البلوري نتيجة خروج ماء التبلور .

2. يتحول الميتاكاؤلين الى طور المولايت عند الحرق بدرجة حرارة C^o (925-1400) ، يصاحب التحول تكون الكرستوبلايت (طور من اطوار السليكا)، كما توضح المعادلة الآتية :

$$3(Al_2O_3.2SiO_2) \xrightarrow{(925\text{-}1400)C^o} 3Al_2O_3.2SiO_2 + Sio_2 \quad \ldots. (3)$$

Meta kaolinite — Mulite — Cristobalite

2-2 قصب السكر: Sugarcane

يعد قصب السكر كمصدر مهم لإنتاج السكر في المناطق الاستوائية و شبه الاستوائية حيث تتجمع مادة السكر في السيقان بنسبة (16– 18)% و في بعض مناطق آسيا يستخرج من السيقان شراب يستعمل في الاوقات الحارة و في الفصول الجافة ، وان سيقان القصب تستخدم في بناء الجدران و السقوف و تستخدم كوقود في بعض المعامل مخلوطة مع النفط (رادكا ديموفا ، ديكو ديكوف ، 1990).[17]

الساق تكون اسطوانية الشكل يصل ارتفاعها (4–6) م و سمكها (3–5) سم اما الاوراق فيبلغ طولها اكثر من (1) م و عرضها (5–7) سم ، في بعض الاصناف تسقط الاوراق عند النضج و في بعضها الآخر تبقى على الساق .

يعد قصب السكر من النباتات المعمرة و له (15) نوعاً خمسة منها سكرية حيث تحوي على نسبة عالية من السكــروز و كمية قليلة من السليلوز و الساق عصيري و قشرة الساق ناعمة (نادر ، 2004).[18]

قصب السكر من النباتات المحبة للحرارة، حيث ينمو بصورة جيدة في المناطق التي متوسط درجة الحرارة الشهرية فيها اكثر من (C^o 21) و لا يتحمل درجات الحرارة المنخفضة حيث يتوقف نموه و تتضرر الاوراق عندما تكون درجة الحرارة بين C^o(10-12)، و يكون حساساً للرطوبة لذلك فان حاجته للماء كبيرة (رادكا ديموفا ، ديكو ديكوف ، 1990).[17]

في العراق يعد قصب السكر من المحاصيل الصناعية المهمة حيث من خلاله يتم انتاج السكر و تكثر مزارعه في محافظة ميسان جنوب العراق حيث يوجد معمل السكر هناك .

يمتاز قصب السكر بالمواصفات الآتية [19] :

1. من المواد الصديقة للبيئة .
2. زراعته قليلة الكلفة .
3. ذو صلابة عالية.
4. يستخرج منه الكثير من المنتجات منها (السكر، الكحول، الورق) .
5. له استخدامات بيولوجية كثيرة و معالجة الكثير من الامراض.

6. يحتوي القصب على نسبة عالية من البوتاسيوم و نسبة جيدة من المغنسيوم و الكالسيوم و الفسفور و الزنك و النحاس و الحديد و غيرها من المعادن.

اما مخلفات قصب السكر المحروقة Sugarcane Straw فإنها تعتبر من المواد الصناعية المهمة لما تحتويها من :

1. الكوارتز.
2. المولايت .
3. سليكات الالومنيا .

3-2 الزركونيا: Zirconia

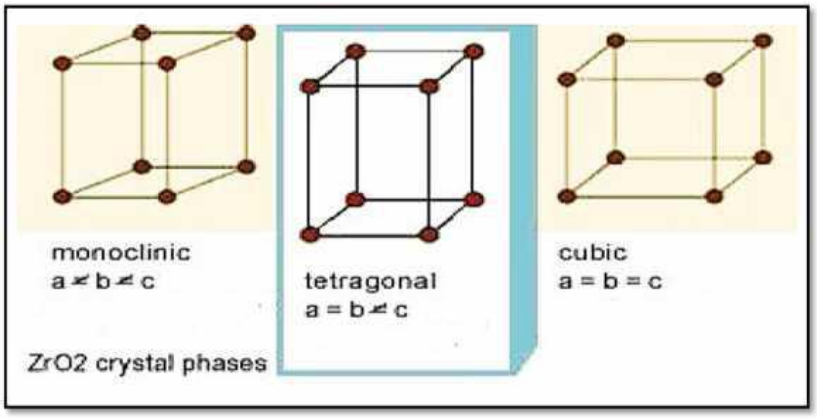
اكتشفت الزركونيا (Zro_2) و هي ثاني اوكسيد الزركونيوم لأول مرة عام (1789م) من قبل العالم الكيميائي الالماني (M.H.Klaprth) ، تتواجد الزركونيا في الطبيعية بنسب مختلفة وهي غير نقية اذ تصل نسبتها الى (96.5 – 98.5)% (Boch & Niepce , 2007).[12]

تمتاز الزركونيا بمجموعة خصائص جيدة كالمتانة العالية ، درجة الانصهار العالية ، قابلية البلل المنخفضة وهي خاملة كيميائياً وذات مقاومة كيميائية عالية لذا دخلت في العديد من الصناعات المتقدمة كصناعة الاسنان، العظام الصناعية، التطبيقات البيولوجية وفي صناعة الحراريات ، اذ تضاف الزركونيا الى بعض المواد لتحسين الخصائص الاتية [20] [13]:

1. تقليل البلل .
2. تحسين المتانة .
3. تحسين مقاومة الصدمة.
4. تحسين المقاومة الكيميائية للمنصهرات .
5. تحسين الخصائص الميكانيكية بشكل عام .
6. زيادة مقاومة البلى.

و تمتلك الزركونيا ثلاثة بنى بلورية هي [11] :

1. نظام احادي الميل (Monoclinic) مستقر عند درجة حرارة الغرفة .
2. نظام رباعي قائم (Tetragonal) مستقر عند درجات الحرارة المتوسطة .
3. المكعب (Cubic) مستقر عند درجات الحرارة العالية.والشكل (2) يوضح البنى البلورية للزركونيا.



الشكل (2) البنى البلورية للزركونيا[21] .

تتغير البنى البلورية من بنية لأخرى عند ارتفاع درجات الحرارة والضغط وتعود بتحول عكسي عند رفع الضغط وانخفاض درجات الحرارة ، فعند درجة حرارة الغرفة يكون النظام الاحادي الميل هو المستقر ويتحول الى نظام رباعي قائم عند درجة حرارة C^o(1170) ثم يتحول الاخير الى المكعب عند درجة حرارة C^o(2370) وتبقى بنية المكعب البلورية حتى يتم انصهار الزركونيا عند درجة حرارة C^o(2680) وكما يأتي :[22]

تحول انتشاري Monoclinic $\xrightarrow{1170\ C^o}$ Tetragonal

تحول انتشاري Tetragonal $\xrightarrow{2370\ C^o}$ Cubic

تحول مارتنسايتي Tetragonal $\xrightarrow{970\ C^o}$ Monoclinic

التحول المارتنسايتي (Martensitic Transformation) هو تحول غير متوازن يحصل بآلية القص السريع دون حصول اي انتشار للذرات ولا يعتمد على الزمن ولا يرافقه تغير في الكتلة ويحصل بتغيير شكل الجزئيات نتيجة لتغير مواقع الذرات ، ويحصل التحول العكسي عند درجة حرارة اقل نتيجة لطاقة الانفعال (Strain Energy) وتعمل هذه الظاهرة على زيادة متانة الزركونيا يرافقها زيادة في الحجم بنسبة 4% [12] .[11]

4-2 البولي فاينيل الكحول Poly Vinyl Al Cohol (PVA)

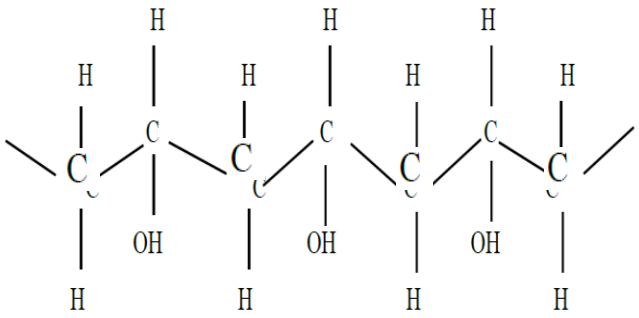
هو من البوليمرات الخطية غير المشحونة التي تستطيع الذوبان في الماء وتكوّن معقدات مع المعادن الطينية لامتلاكها عدداً هائلاً من المجاميع القطبية (المجاميع الفعالة) على امتداد سلسلتها التي تدخل في التفاعل مع السطح المعدن الطيني لتكوين طين معدل (Modified Clay) بعملية امتزاز المواد الطينية[23].

عند تماس البوليمر مع المادة الممتزه تميل الجزئيات الى الانهيار والانتشار على امتداد السطح ، لهذا فان البوليمرات غير المشحونة تعد ملائمة جداً لاستقرار بنية موجودة.[24]

يرتبط البوليمر بالسطوح الاساسية للمعادن الطينية من خلال سلسلة من الاواصر الهيدروجينية بين مجاميع الهيدروكسيد لبولي فاينيل الكحول وذرات الاوكسجين الاساسية لسطوح المعادن الطينية .

يمتاز الولي فاينيل الكحول بان له القابلية على الذوبان في الماء ، حيث انه يذوب ببطيء في الماء البارد ولكنه يذوب بسهولة وسرعة في درجات الحرارة العالية ، ويمتلك وزناً جزيئياً يتراوح بين (18000-12000) ودرجة انصهار C^o(230) وكثافته تتراوح بين (1.19-1.31) غم /سم^3 وله قابلية استثنائية على الالتصاق بالمواد السيلوزية وله استخدامات واسعة فهو يدخل في صناعة الورق وفي الصناعات النسيجية وفي صناعة اغشية مقاومة للاوكسجين وفي طلاء الافلام الفوتوغرافية وله خواص كهربائية وبصرية معتمده على نوع الشوائب المضافة [25] .

يحضر بولي فينيل الكحول من خلات الفينيل لتكوين بولي خلات الفاينيل ثم يجري للبوليمر تحلل مائي لتكوين بولي فاينيل الكحول، اما صيغته الجزيئية فهي $CH_2CH(OH)_n$ والشكل (3) يوضح الصيغة التركيبية لبولي فاينيل الكحول.



الشكل (3) الصيغة التركيبية لبولي فاينيل الكحول(PVA)[26] .

2- 5 متانة العازل : Dielectric Strength (Breakdown)

جميع العوازل عند وضعها في مجال كهربائي ستفقد خصائصها العزلية اذا تجاوز المجال قيمة حرجة معينة، تدعى هذه الظاهرة بانهيار العازل (Dielectric Breakdown) والمجال الكهربائي الذي يحصل عنده الانهيار يدعى متانة انهيار العازل (Dielectric Strength) [27].

ان متانة العازل تقاس بدلالة المجال الكهربائي المسلط اي الجهد الذي عنده ينهار العازل اي ان[28] :

$$E_{br} = \frac{V_{br}}{d} \quad \ldots. (4)$$

حيث ان :

E_{br} المجال الكهربائي المسلط

V_{br} الجهد الذي عنده انهيار العازل

d سمك العازل

تعتمد متانة العازل على كثير من العوامل منها ما يتعلق بتركيب العازل مثل التركيب البلوري والعيوب والشوائب الموجودة فيها، وعوامل خارجية من (درجة حرارة، رطوبة، تردد المصدر والمدة الزمنية عند تطبيق الفولتية على العازل).

ان حدوث الانهيار يعني ظهور شحنات متحركة داخل المادة باستطاعتها الانتقال في المادة من طرف الى آخر ويكون مصدر هذه الشحنات اما من داخل المادة وذلك نتيجة تحررها من مواضعها بفعل الطاقة المكتسبة نتيجة المجال الكهربائي المسلط ، او قد تكون ناتجة عن انتقال الشحنات من القطب المعدني الى داخل العازل وتمكنها من اجتيازه [29] .

في بداية تسليط الجهد الكهربائي يكون عدد الشحنات قليلاً والذي قد يتضاعف نتيجة انتقال الطاقة الى شحنات اخرى بفعل التصادم الحاصل بينها ومن العوامل التي تساعد على انهيار العازل هو ارتفاع درجة الحرارة داخل العازل نتيجة مرور التيار الناتج عن حركة هذه الشحنات [30] .

هناك ظواهر عدة تحدث في العازل عند تأثير المجال الكهربائي مثل التوصيل الكهربائي، الاستقطاب، الفقدان العزلي .....الخ، فزيادة الفولتية على العازل تؤدي الى زيادة تيار التسرب والتيار السعوي للفولتية

المتناوبة وعند الاستمرار بزيادة الفولتية المطبقة الى ان تصل الى اعظم لها في حالة انهيار العازل عند هذه اللحظة يمر تيار التوصيل في العازل بصورة متزايدة بعدها تبدأ الفولتية بالتناقص بسبب تناقص مقاومة العازل ان هذه التوصيلية غالباً ما تمثل دائرة قصر بين اقطاب المصدر [31] .

هناك نوعان من الانهيار في العوازل هما :

أ- الانهيار الكهربائي Electrical Breakdown

يدعى في بعض الاحيان (جهد الانهيار الكهربائي النقي) لتميزه من بين انواع الانهيارات في العازل ويتسبب هذا الانهيار من تأثير المجال الكهربائي فقط وتدمير العازل بواسطة القوى التي يؤثرها هذا المجال اما اذا كانت هناك تأثيرات اخرى على العازل مثل (الحرارة) فانها تسهل من عملية الانهيار وفي هذه الحالة لا يسمى الانهيار بالانهيار الكهربائي النقي .

الانهيار الكهربائي يتميز بالميزات الآتية [30] :

1. الزمن قصير جداً لتزايد الفولتية (يصل في بعض الاحيان الى المايكرو ثانيه) ويحدث الانهيار حالاً بعد تطبيق الفولتية عندها يسمى الانهيار الكهربائي النقي .
2. الاعتماد الواطئ والقليل لجهد الانهيار (V_{br}) ومتانة العازل مع تردد الفولتية .
3. الاعتماد القليل لمتانة العازل على درجة الحرارة ، في بعض الاحيان اعتماد (E_{br}) على درجة الحرارة يأخذ اعتدالاً لمدى من درجة الحرارة .
4. عند تأثير مجال كهربائي منتظم على العازل فان اعتماد متانة العازل على ابعاد العازل واقطابه يكون قليلاً .

ب- الانهيار الكهروحراري : Electro thermal Breakdown

ترتبط ظاهرة الانهيار الكهرو حراري مباشرة بعملية الفقدان في العازل على شكل حرارة نتيجة وضع العازل تحت تأثير مجال كهربائي وهو يحدث نتيجة فولتيه مطبقة على العازل تؤدي الى انطلاق حرارة منه بسبب الفقد ويزداد الفقد بزيادة درجة الحرارة ثم يظهر تأثير الانصهار والاحتراق والاختراق و التشقق في العازل[31].

ان الانهيار الكهرو حراري للمادة يعتمد على :

1. تردد الفولتية ، حيث تتناقص المتانة مع تزايد التردد .
2. المدة الزمنية خلال تأثير الفولتية ، فاذا كانت المدة الزمنية قصيرة فان العازل لا يحصل على الحرارة الناشئة من الفقد العزلي واللازمة للانهيار لذلك لا يحصل انثقاب كهرو حراري في المادة .

3. الجانب العملي: Experimental Part

1.3 المواد المستخدمة: Materials

أ. خام الكاؤلين: Kaolin Raw

ان الكاؤلين المستخدم في هذه الدراسة هو كاؤلين دويخلة المستخرج من مقلع دويخلة في الصحراء الغربية في محافظة الانبار وهو من اتقى الاطيان وقد تم استخدامه كمادة اساس (Matrix) في تحضير النماذج السيراميكية، اما التحليل الكيميائي للكاؤلين فقد تم في مختبرات هيئة المسح الجيولوجي العراقية من

اجل معرفة نسب المكونات الرئيسة له، والجدول (1) يوضح ذلك ، كما تم تحليل الاطوار لهذا الخام وذلك باستخدام تقنية حيود الاشعة السينية .

الجدول (1) نتائج التحليل الكيميائي للكاؤلين العراقي

الاكاسيد	SiO_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	L.O.I
النسبة %	52.24	32.19	1.13	1.43	0.37	0.07	0.31	0.41	0.02	11.84

ب – مخلفات قصب السكر: Sugarcane Straw

استخدمت مخلفات قصب السكر كمادة مضافة محلية الى الكاؤلين وتم الحصول عليها من معمل السكر في محافظة ميسان الواقعة جنوب العراق، اما التحليل الكيميائي فقد اجري لها في مختبرات هيئة المسح الجيولوجي العراقية للتعرف على نسب المكونات الرئيسة لها والجدول (2) يوضح ذلك.

الجدول (2) نتائج التحليل الكيميائي لمسحوق مخلفات قصب السكر

الاكاسيد	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	P_2O_3
النسبة %	14.48	2.30	0.93	5.46	0.71	1.85	0.02	0.27

جـ – الزركونيا: Zirconia

استخدمت الزركونيا بنوعيها المايكروي او النانوي كمادة مضافة لتحسين الخصائص الحرارية للمنتج السيراميكي و هي :

1. الزركونيا المايكروية: Micro Zirconia

استخدمت الزركونيا المايكروية المصنعة من قبل شركة (Hannovar) الالمانية بحجم دقائقي (45 µm) وبنقاوة (99.9 %) لون المسحوق ابيض ناصع.

2. الزركونيا النانوية: Nano Zirconia

استخدمت الزركونيا النانوية المصنعة من قبل شركة (SIGMA) الصينية بحجم دقائقي بين nm(50-40) وبنقاوة (99.9 %) لون المسحوق ابيض ناصع.

د – المادة الرابطة: البولي فاينيل الكحول

لقد تم تحضير البولي فاينيل الكحول المصنع من قبل شركة (DIDACTIC) الاسبانية على شكل محلول مائي بإذابة حبيبات (PVA) بالماء المقطر على جهاز الخلط المغناطيسي (Magnetic Stirrer) وبدرجة حرارة بين C^o (85-95) اذ تعمل الكبسولات المغناطيسية على تحريك المحلول بشكل مستمر لإذابة (PVA) بشكل كامل وللحصول على محلول متجانس كثافته ($1.20\ g/cm^3$) .

هـ – المادة المزيتة: استخدم زيت البرافين المختبري لتزييت القوالب الفولاذية و تسهيل خروج العينات من القالب.

2.3 : الاجهزة المستخدمة: Devices Used

أ. جهاز الضغط : استخدم مكبس هيدروليكي نوع Carbolite بريطاني المنشأ و استخدم ضغط كبس مقداره 25 Mpa و لمدة مقدارها (2 min) .

ب . قالب فولاذي : استخدم قالب فولاذي معامل حرارياً لكي يتحمل الاحمال العالية التي تسلط لأغراض الكبس.

جـ . فرن الحرق : استخدم فرن كهربائي نوع (Humon Lab) الماني المنشأ مبرمج بالتيار تصل درجة الحرارة فيه الى C^o (1700) .

د . ميزان حساس : استخدم ميزان حساس الماني نوع (Sartorius) المنشأ و دقته (0.0001) غم في عملية الوزن .

هـ . فرن التجفيف : استخدم فرن التجفيف الكهربائي نوع (Taisite) صيني المنشأ تصل درجة الحرارة فيه الى C^o (300).

و . الخلاط الكهربائي : استخدم خلاط كهربائي ياباني الصنع لغرض تجانس المواد و مزجها .

ز. المناخل : استخدم نوعين من المناخل (Sieves) الاول بحجم (200 mesh) لتنتج حبيبات بحجم (75 µm) و الثاني بحجم (300 mesh) لتنتج حبيبات بحجم (53 µm) .

ي . جهاز قياس متانة العازل : استخدم جهاز (BAUR-PGO-S-3) الماني الصنع بمدى فولتية يصل الى (300 KV) لقياس متانة العازل.

3.3 تحضير العينات : Samples Preparation

و قد تمت هذه المرحلة بثلاث خطوات هي :

أ. تهيئة الخامات : Raw materials Preparation

استخدمت المادة الاساس و هي الكاؤلين و اضافة مخلفات قصب السكر كمادة مدعمة و الزركونيا المايكروية او النانوية كمادة مضافة لتحسين الخصائص للمتراكب و PVA كمادة رابطة و كما موضح في الجدول (3) .

الجدول (3) يوضح رموز الخلطات المستخدمة في العمل

مكونات الخلطة الرئيسة	النسبة المئوية للخلطة الرئيسة %	رمز الخلطة	المادة المضافة	النسبة الوزنية للمادة المضافة %	نوع الدقائق	نوع المادة الرابطة
كاؤلين 90 % قصب السكر 10 %	%100	A	ـــــــ	ـــــــ	ـــــــ	PVA
كاؤلين 90 % قصب السكر 10 %	% 95	AZ1	زركونيا	% 5	مايكرويه	PVA
	% 90	AZ2	زركونيا	% 10	مايكرويه	PVA
	% 85	AZ3	زركونيا	% 15	مايكرويه	PVA
	% 80	AZ4	زركونيا	% 20	مايكرويه	PVA
كاؤلين 90 % قصب السكر 10 %	% 95	AN1	زركونيا	% 5	نانوية	PVA
	% 90	AN2	زركونيا	% 10	نانوية	PVA
	% 85	AN3	زركونيا	% 15	نانوية	PVA
	% 80	AN4	زركونيا	% 20	نانوية	PVA

ملاحظة: (ـــــــ) يعني عدم اضافة مادة للخلطة الرئيسية.

بعد ذلك تمت تهيئة الخلطات و وزنها بواسطة ميزان كهربائي حساس و هو من نوع (Sartorius) الماني المنشأ ذي حساسية (0.0001) غم حيث كان وزن كل خلطة (10)غم ، تم خلط كل خلطة على حده و باستعمال الخلاط الكهربائي و لمدة ساعتين لكل خلطة و ذلك لضمان تغلغل المادة المدعمة و المضافة مع حبيبات المادة الاساس للحصول على افضل تجانس، و من ثم تضاف المادة الرابطة و هي بولي فاينيل الكحول (PVA) وبنسبة 2% لكل خلطة و يتم الخلط يدوياً بالمورتر و بعد ذلك يتم عمل ثلاثة نماذج لكل خلطة لغرض الحصول على ادق النتائج .

ب . تشكيل العينات: Sample Forming

شكلت العينات بطريقة الكبس شبه الجاف (Semi – dry Pressing) واستخدم المكبس الهيدروليكي نوع (Carbolite) بريطاني المنشأ و قالب بقطر mm (12) تحت ضغط كبس Mpa(25) و لمدة كبس مقدارها (2 min).

جـ . عملية التلبيد: Sintering Process

تمت عملية التلبيد باستخدام فرن كهربائي نوع (Humon Lab) و عند الضغط الجوي الاعتيادي و لمعدل ارتفاع مقداره (3 درجة حرارية / دقيقة) و قد تمت عملية الحرق بثلاثة درجات حرارة هي (C^o 1200 , 1100 , 1000) و بقيت عند كل درجة حرارة لمدة ساعتين.

و قد اعتمدت هذه الطريقة من اجل ضمان التخلص من المواد العضوية و المادة الرابطة و السماح للأبخرة و الغازات المتحررة من جراء عملية الحرق بالخروج بصورة بطيئة مما ساعد على تقليل التشوهات التي قد تحصل للعينات خلال عملية الحرق و بعد الانتهاء من عملية الحرق تم اطفاء الفرن و تركه الى اليوم التالي للوصول الى درجة حرارة الغرفة ، ثم اخرجت العينات.

4. اختبار متانة العازل : Dielectric Strength Test

تم قياس جهد الانهيار للنماذج باستخدام جهاز (BAUR-PGO-S-3) الماني الصنع بمدى فولتيه يصل الى (300 KV) والمبين بالشكل (4) ويحتوي الجهاز على اقطاب نحاسية كروية قطرها (2mm) ويوضح النموذج بين قطبين (احدهما يتصل بالأرض والأخر يتصل بالفولتية المسلطة (H.V) ويوضعان داخل حوض يملأ بزيت ذي جهد انهيار عالٍ (زيت المحـــولات النقي) الذي يتميز بارتفاع درجة حرارة استعماله (توهجه) والذي يجعله بمثابة الوسط الخامد للحرق الذي قد يحصل من جراء الشرار المتولد ، ويتم تسليط فولتيه متزايدة عبر نموذج الاختبار وبمعدل زيادة (1 KV/sec) حتى حصول الثقب (الذي يمثل اعلى قيمه من الفولتية لحصول الانهيار الكهربائي) . ويفضل قياس جهد الانهيار لمناطق عدة من النموذج الواحد واخذ معدل القياسات بسبب اختلاف تجانس النموذج السيراميكي والذي قد يحدث اثناء الحرق والناشئ من الاطوار المتعددة ومن معرفة سمك النموذج يتم حساب متانة العازل بتطبيق المعادلة (4) .

الشكل (4) يوضح جهاز قياس متانة العازل

والجداول في ادناه تبين نتائج هذا الاختبار للعينات المضاف اليها الزركونيا المايكروية مرة و العينات المضاف اليها الزركونيا النانوية مرة اخرى .

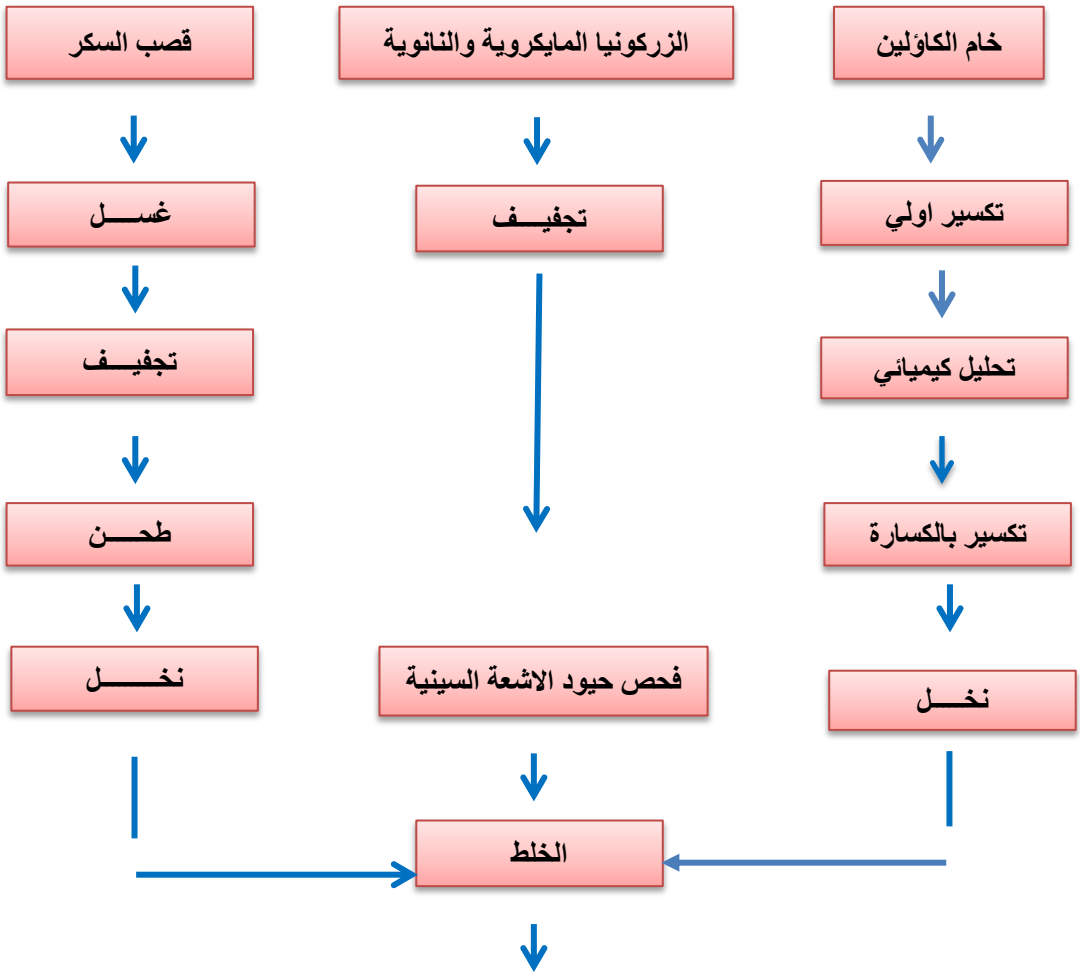
جدول (4) يبين نتائج اختبار متانة العازل قبل و بعد اضافة الزركونيا المايكرويه.

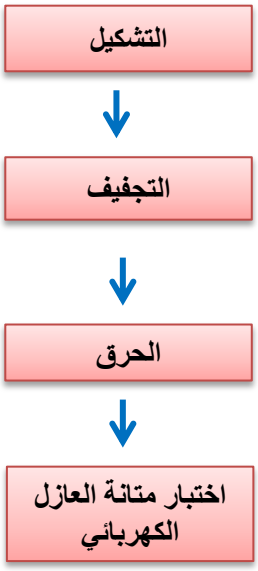
رمز الخلطة	درجة حرارة الحرق $1000C^o$	درجة حرارة الحرق $1100C^o$	درجة حرارة الحرق $1200C^o$
A	4.127	5.223	7.012
AZ1	4.465	5.567	7.486
AZ2	4.826	5.923	7.977
AZ3	5.167	6.412	8.499
AZ4	5.528	6.976	9.137

جدول (5) يبين نتائج اختبار متانة العازل قبل و بعد اضافة الزركونيا النانوية.

رمز الخلطة	درجة حرارة الحرق $1000\ C^o$	درجة حرارة الحرق $1100\ C^o$	درجة حرارة الحرق 1200 C^o
A	4.127	5.223	7.012
AN1	4.762	5.889	7.834
AN2	5.468	6.576	8.576
AN3	6.182	7.176	9.264
AN4	6.876	7.962	10.176

والشكل (5) يوضح مخطط الخطوات العملية الخاصة بالبحث :





الشكل (5) مخطط الخطوات العملية

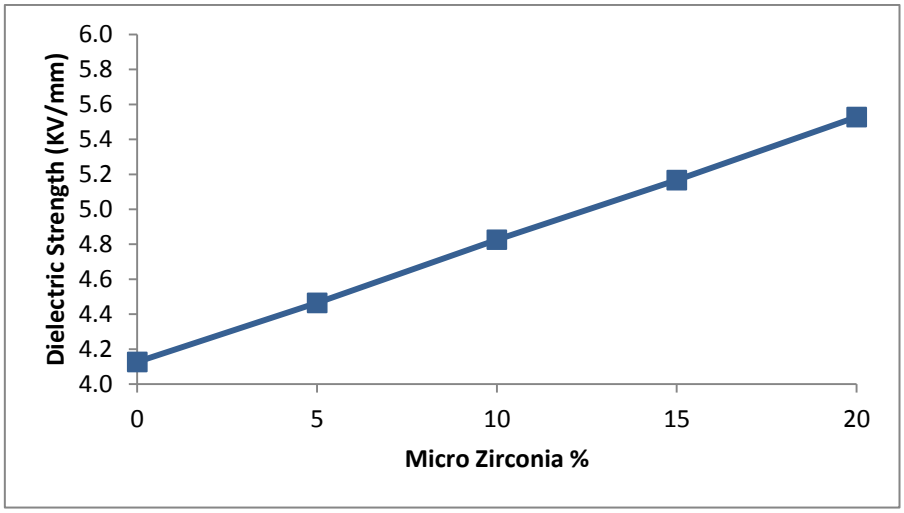
5. مناقشة النتائج: Discussion of Results

تم قياس متانة العازل للنماذج المحضرة من الخلطة (A) بإضافة الزركونيا المايكروية والنانوية باعتماد العلاقة (4) وكما موضح في الاشكال (6 ، 7، 8، 9، 10، 11) التي توضح تأثير نسبة الزركونيا المايكروية والنانوية المضافة في متانة العازل الكهربائي للنماذج السيراميكية.

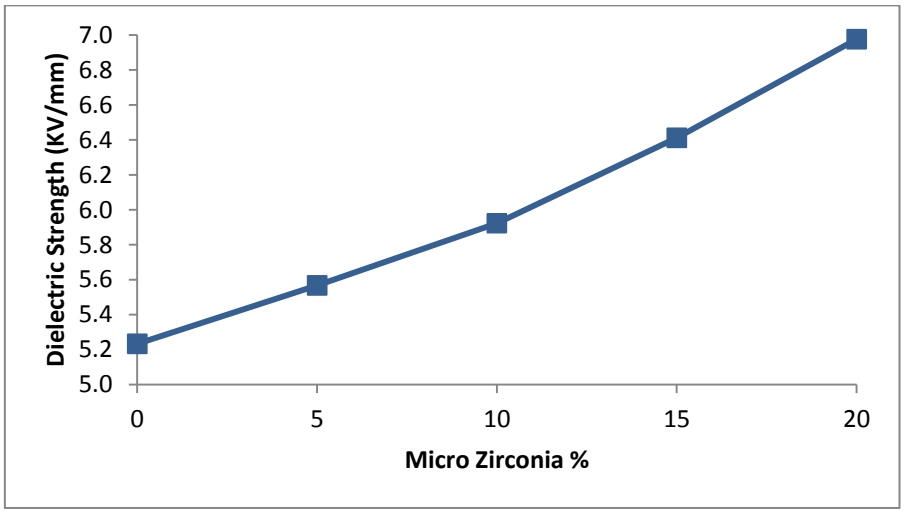
ان اضافة الزركونيا سواء اكانت مايكروية ام نانوية تؤدي الى زيادة متانة العزل الكهربائي وتعزى هذه الزيادة الى ان المسامية الظاهرية ونسبة امتصاص الماء تتناقص بشكل كبير بينما نلاحظ زيادة الكثافة لذا نحصل على عزل كهربائي جيد .

امتلكت النماذج المحضرة من الخلطة (AN) قيم متانة عزل كهربائي عالية مقارنة بالنماذج المحضرة من الخلطة (AZ) وذلك لصغر حجم الدقائق النانوية والتي جعلها تملأ الفراغات المايكروية بين دقائق المواد الخام وكذلك يسهّل انسياب وحركة الطور السائل لملء المسالك الهوائية والفجوات مما يجعل النماذج المحضرة من الخلطة (AN) ذات مسامية واطئة وكثافة عالية وهذا يؤدي الى زيادة متانة العزل الكهربائي لها لان متانة العزل الكهربائي تتناسب عكسياً مع نسبة المسامية الظاهرية للمادة [29].

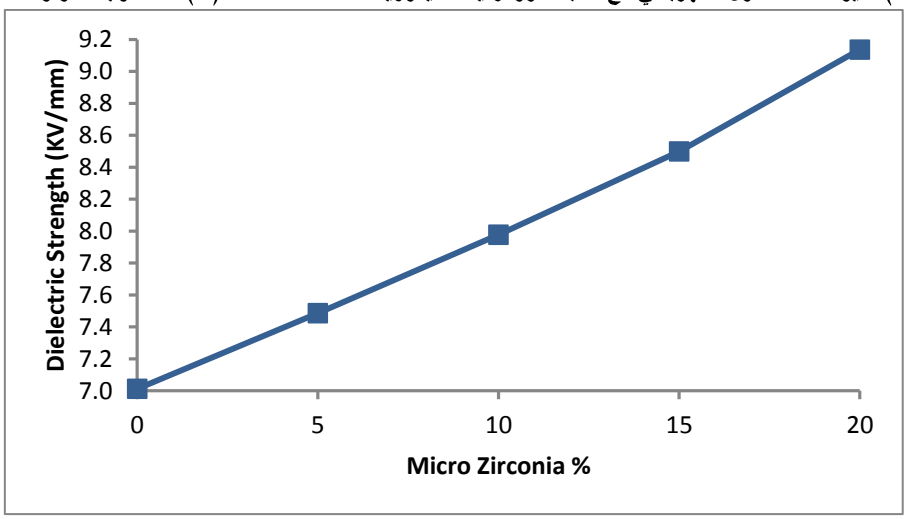
يتضح من الشكلين (12،13) ان متانة العازل الكهربائي تزداد بازدياد درجات حرارة الحرق لان المسامية سوف تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة مما يزيد من متانة العازل ، حيث ان الاجسام السيراميكية ذات المسامية الواطئة جداً تحقق متانة عزل عالية بسبب عدم تكون مجالات كهربائية داخلها وكذلك زيادة تآصر حبيبات النموذج وتكوّن اطوار ذات خصائص عزليه جيدة [32].



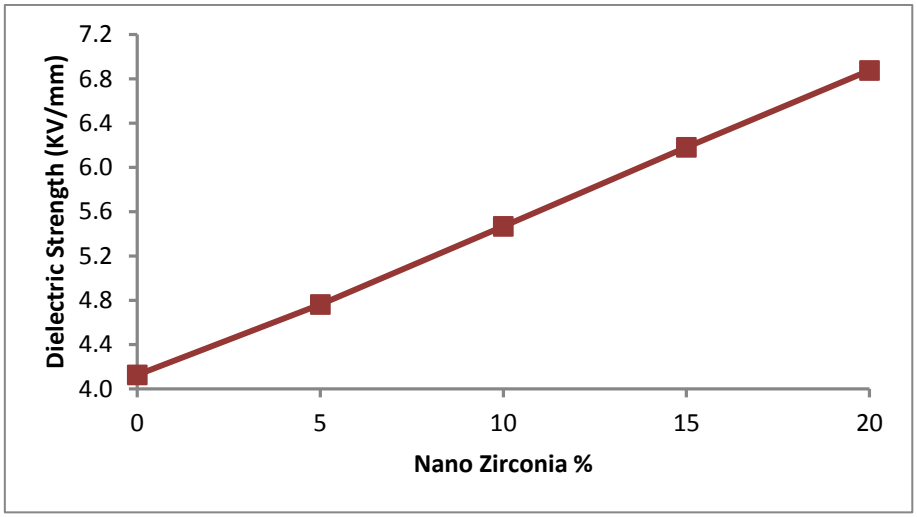
شكل (6) تغير متانة العازل الكهربائي مع نسبة الزركونيا المايكروية المضافة للخلطة (A) عند درجة حرارة $1000C^{o}$



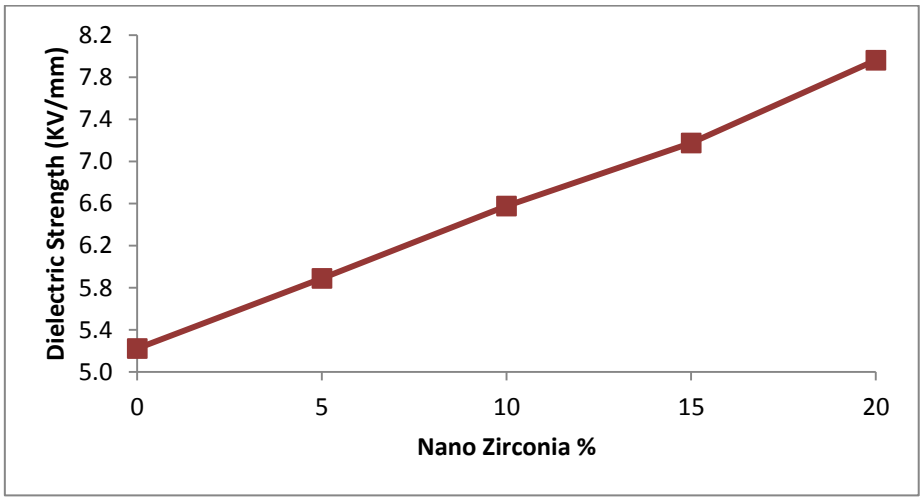
شكل (7) تغير متانة العازل الكهربائي مع نسبة الزركونيا المايكروية المضافة للخلطة (A) عند درجة حرارة $1100C^{o}$



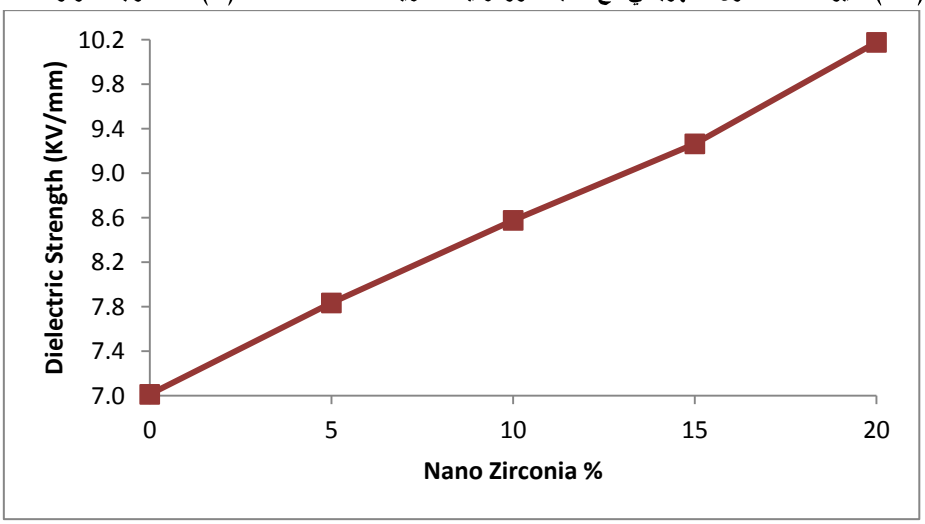
شكل (8) تغير متانة العازل الكهربائي مع نسبة الزركونيا المايكروية المضافة للخلطة (A) عند درجة حرارة $1200C^{o}$



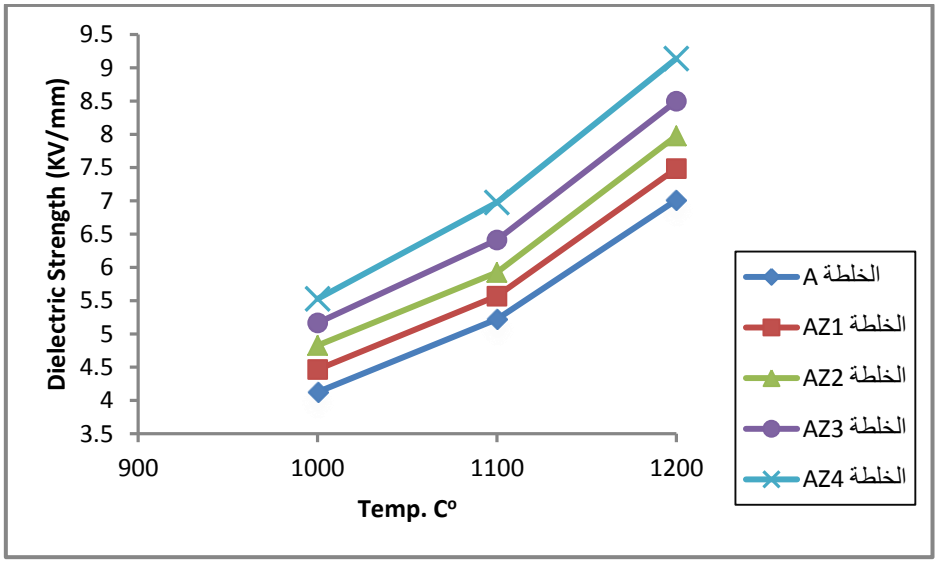
شكل (9) تغير متانة العازل الكهربائي مع نسبة الزركونيا النانوية المضافة للخلطة (A) عند درجة حرارة $1000C^{o}$



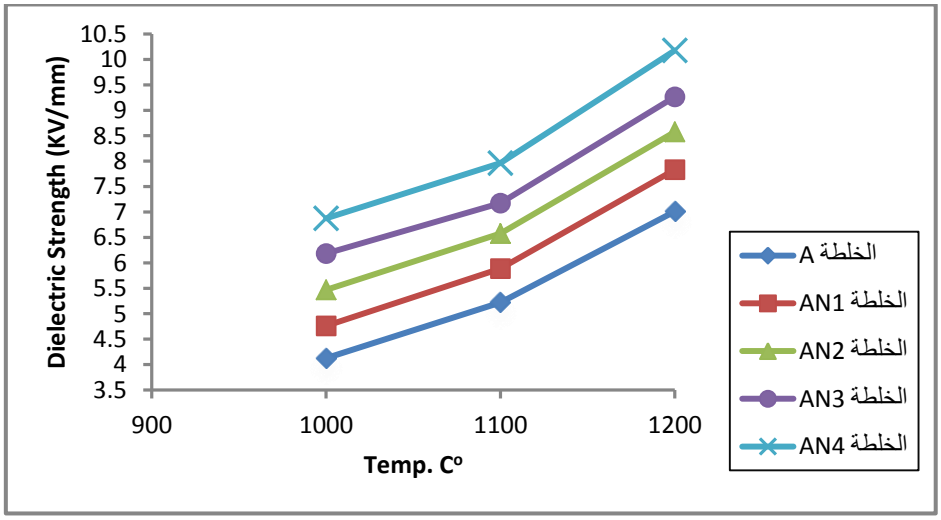
شكل (10) تغير متانة العازل الكهربائي مع نسبة الزركونيا النانوية المضافة للخلطة (A) عند درجة حرارة $1100C^{o}$



شكل (11) تغير متانة العازل الكهربائي مع نسبة الزركونيا النانوية المضافة للخلطة (A) عند درجة حرارة $1200C^{o}$



الشكل (12) تغير متانة العازل الكهربائي مع نسبة الزركونيا المايكروية المضافة للخلطة (A) وزيادة درجات الحرارة .



الشكل (13) تغير متانة العازل الكهربائي مع نسبة الزركونيا النانوية المضافة للخلطة (A) وزيادة درجات الحرارة .

5- الاستنتاجات: Conclusions

من نتائج اجراء هذا البحث ، تم التوصل الى الاستنتاجات الاتية :

أ. زيادة قيم متانة العازل للنماذج السيراميكية عند اضافة الزركونيا المايكروية بسبب المسامية الواطئة جدا التي

تحقق متانة عزل كهربائي عالٍ و ذلك لعدم تكون مجالات كهربائية داخلها .

ب. تزداد قيم متانة العازل ا للنماذج السيراميكية مع زيادة نسبة الاضافة للزركونيا المايكروية.

جـــ .زيادة قيم متانة العازل للنماذج السيراميكية بشكل اكبر عند اضافة الزركونيا النانوية بسبب صغر حجـــم الدقائق النانوية و التي تجعلها تملأ الفراغات المايكروية بين دقائق المواد الخام مما يسبب مسامية واطئة جدا و كثافة عالية و التي تزيد تؤدي الى زيادة متانة العزل الكهربائي .

د. تزداد قيم متانة العازل للنماذج السيراميكية بشكل اكبر مع زيادة نسبة الاضافة للزركونيا النانوية .

هـــ . زيادة درجة حرارة الحرق ادت الى زيادة قيم متانة العازل الكهربائي لجميع النماذج السيراميكية لأنه بزيادة

درجة الحرارة اصبحت النماذج ذات مسامية واطئة و كثافة عالية مما يؤدي الى زيادة تآصـــــر حبيبات النموذج و تكون اطواراً ذات خصائص عزلية عالية.

6- المصادر References

[1] Nicholas M. G. , 1990, " Joining of Ceramics " , 1st Ed. , Hong Kong.
[2] Meyers A. M. & Chawla K. K. , 1998 , " Mechanical Behavior of Materials ", Prentice Hall, New Jersey.
[3] Harper A. Ch., 2002, " Hand Book of Ceramics, Glasses and Diamonds " ,Mc Graw- Hill Publiedium.
[4] Kingery W. D. , Bowen H. K. & Uhlman D. R. ,1975, " Introduction to Ceramic ", 2nd Ed. , New York, p.(3, 210, 440, 593, 643, 770).
[5] Worrall W. F. ,1975, " Clay and Ceramic Raw Materials ", Applied Science Publisher, 1st Ed. , London.
[6] Michel & W. Barsoum, 1997, " Fundamentals of Ceramic ", Mc Grow- Hill Corp.
[7] Abd-El-Nour K. N. & Al Ani A. S. J. , 1987, " Dielectric Properties of Some Clay-Feldspar Ceramic Bodies at the Low Frequency ", Central Glass and Ceramic
Research Institute Bulletin, Vol.34, No.3.
[8] شروق صباح عبد العباس ،2002 ، "دراسة الخواص الفيزيائية للعازل السيراميكي ذي الجهد العالي" ،ماجستير، جامعة بابل.
[9] محمد قاسم سلمان، 2010 ،" دراسة الخواص الكهربائية للبورسلين عالي الصهر المحضر من الخامات العراقية " ، مجلة جامعة ديالى، العلوم الهندسية ، المجلد (1) ، العدد(1) ، ص (66-778).
[10] ايناس محيي هادي و خمائل محسن كسير ، 2013 ، " تصنيع عوازل كهربائية من متراكب الكاؤلين العراقي"، مجلة جامعة بابل ، العلوم الهندسية ، المجلد(21) ، العدد(2) ، ص(707-715).
[11] Shackelford J. F. & Doremus R. H., 2008, " Ceramic and Glass Materials ", Springer New York, p.(27, 33, 111, 114).
[12] Boch P. & Niepce J. C. , 2007, " Ceramic Materials ", ISTEL td, UK, p.(227, 361).
[13] Laming J. , 1971, " The Refractories Journal ", Vol. 1, p.(6).
[14] Bergaya F. , Theng B. K. & Lagaly G. , 2006, " Hand Book of Clay Science ", Vol.1, Elsevier Ltd, p.(6, 20).
[15] Tamar –Agha M. Y. , 1993 ," Internal report Geosurvy ", Rep. No. (1899), Iraq.
[16] Meunier A. , 2005 , " Clay ", Springer, New York, p.(50, 56).
[17] رادكا ديموفا، ديكو ديكوف، 1990 ، "المحاصيل الحقلية في المناطق الاستوائية و شبه الاستوائية" ، ترجمة د. خليل ابراهيم محمد علي ، جامعة بغداد ، ص(187-196).
[18]نادر فليح علي المبارك ، 2004 ، " استجابة قصب السكر و الادغال المرافقة لمنظمات النمو النباتية و مبيدات الادغال" ، اطروحة دكتوراه ، جامعة بغداد .
[19] Al-Dabbagh Zainab, 2015, "Stabilization of Clayey Soil by Using Local Materials",Thesis, Baghdad.
[20] Cater C. B. & Norton M. G. , 2007, " Ceramic Materials Science and Engineering ", Springer, New York, p.(176, 333).
[21] Alkhashab S. M. , 2014 ," Preparation of (Zirconia-Spinel) (Zro2-MgAl2O4) system and study its Physical and Biological Properties ", PhD, Baghdad.
[22] Prusty S. , Mishra D. K., Mohaparta B. K. & Singh S. K. , 2012, "Ceramic International ", Vol. 38, p.(2363).
[23] Kotek J. & Klenar I., 2005 ," Preparation and Application in Polymer –Clay Nano Composite" , p.(46, 4876, 4881).
[24] Theng B. K. G. , 1979 ," Formation and Properties of Clay-Polymer Complex" , Elsevier Scientific Publishing Company , Amsterdam, Oxford, New York. Advances in Polymer Technology India, p.(356-368).
[25] Bilmeyer F. W. , 1971 , " Text Book of Polymer Science ", 2nd Ed., Joihn Wiley and Sons, Inc., New York.
[26] Reddyl V. N. , Rao K. S., Subha M. C. & Rae K. C., 2010 , " Miscibility Behavior of Dextrin PVA Blends in Water at 35Co ", International Conference on
[27] فدوى حمادي عباس، 2005، "دراسة تأثير الدالة الحامضية و ظروف التشكيل في بعض الخواص الكهربائية للجسم البورسليني المشكل من مواد محلية عراقية" ، رسالة ماجستير، جامعة بابل.

[28] Noron F. H. , 1974 , "Element of Ceramic", 2nd Ed., Addison-Weslgy, Pub.

[29] فائز جواد كاظم، 2006، "دراسة تصنيع عوازل سيراميكية لاستخدامها في خطوط نقل الطاقة الكهربائية " ، رسالة ماجستير، جامعة بابل .

[30] Pampuch R. , 1976 , "Ceramic Materials: an Introduction to their Properties", Elsevier Scientific Pub., Comp. Amsterdam.

[31] Tarry B. , 1979 , "Physics of Dielectric Materials", Mir Publishes Moscow, Translated from the Russian.

[32] Hill G. H. & Morse C. T., 1970 , "The Effect of Porosity on Electric Strength of Alumina", Dielectric Mat, Measure and App. IEE., No. 67.