

جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بابل – كلية الهندسة



دراسة تصنيع عوازل سيراميكية لاستخدامها

في خطوط نقل الطاقة الكهربائية

رسالة

مقدمة إلى مجلس كلية الهندسة في جامعة بابل وهي

جزء من متطلبات نيل شهادة الماجستير في هندسة

المواد

قدمها

فائز جواد كاظم

بإشراف

أستاذ مساعد فاضل محمد حسون . أستاذ مساعد . محمد حمزة المعموري

١٤٢٧ هـ

٢٠٠٦ م

Republic of Iraq

Ministry of Higher Education and

Scientific Research

Babylon University



College of Engineering

Manufacturing of ceramic insulators for electrical energy transport.

A thesis submitted to

***The College of Engineering in Babylon University as A partial
Fulfilment of Requirement for the Degree of Master in an
engineering Materials***

By

Faes Jwade Kadhome

Supervised by

Dr.Fadel Mohamad .H

Mr.Mohamad Hamza

Baghdad

٢٠٠٦ A.D

١٤٢٧ A.H

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الله نور السموات والأرض مثل نوره كمشكاة فيها
مصباح المصباح في زجاجة الزجاج كأنها كوكب دري
يوقد من شجرة مباركة زيتونة لا شرقية ولا غربية يكاد
زيتها يبضي ولو لم تمسه نار نور على نور يهدي الله
لنوره من يشاء ويضرب الله الأمثال للناس والله بكل شيء

عليم

شكر و عرفان

اللهم إني أسالك بأن لك الحمد لا إله إلا أنت المنان ، بديع السموات والارض ، ذو الجلال والاکرام ، أن تصلي على محمد وآل محمد ، وأن تجعل لي مما أنا فيه فرجاً ومخرجاً . بالله استفتح وبالله استنجح ، وبمحمد صلى الله عليه وآله أتوجه.

وبعد..... ففي اللحظة التي تم فيها وضع اللمسات الأخيرة على هذا البحث لابد من إلقاء نظرة تحمل في طياتها كل معاني التقدير والحب والامتنان والشكر الجزيل والاحترام إلى قدوتي في العلم والأخلاق والفضيلة الدكتور فاضل محمد حسون والأستاذ محمد حمزة المعموري اللذان تفضلا مشكورين بقبولهم الاشراف على هذه الرسالة ، واللذان كان لارائهم السديدة وتوجيهاتهم القيمة الأثر البالغ في أغنائها بالمادة العلمية الرصينة.

كما أتقدم بخالص الشكر والتقدير الى الدكتور عميد كلية الهندسة والدكتور رئيس قسم هندسة المواد لجهودهم في تذليل الصعاب وأجتياز العقبات .

ويطيب لي أن أتقدم بوافر شكري وأمتناني إلى كل الزملاء والزميلات الذين بذلوا جهداً حتى لو كان بسيطاً في أنجاز هذا البحث .

وفي الختام أقدم شكري و عرفاني بالجميل إلى أفراد أسرتي لما منحوني من رعاية وتشجيع طيلة فترة البحث والدراسة.

داعياً الله عز وجل أن يمدهم بالصحة والعافية ، وإلى كل من ساعدني بالعون حتى ولو بكلمة طيبة .

الباحث

الصفحة	الموضوع	ت
الفصل الأول : المقدمة والدراسات السابقة		
١	المقدمة	١-١
٤	الدراسات السابقة	٢-١
٩	هدف البحث	٣-١
الفصل الثاني : الجزء النظري		
١٠	تركيب وخواص المادة السيراميكية	١-٢
١١	طرق تصنيف السيراميك	١.١.٢
١٣	المواد الأولية	٢-٢
١٤	تركيب السليكا	١.٢.٢
١٦	الفلدسبار	٢.٢.٢
١٧	الكاؤولين	٣.٢.٢
٢٠	تصنيع المواد السيراميكية	٣-٢
٢٠	تشكيل المواد السيراميكية	١.٣.٢
٢٢	تلييد المواد السيراميكية	٢.٣.٢
٢٧	تأثير البنية الداخلية على الصفات العامة للمادة السيراميكية	٤-٢
٢٩	الخواص الفيزيائية	٥-٢
٣١	الكثافة	٦-٢
٣٣	الخواص الميكانيكية	٧-٢
٤٣	الخواص الكهربائية	٨-٢
الفصل الثالث : الجزء العملي		
٥٦	المقدمة	١-٣
٥٨	اختيار المواد الأولية	٢-٣
٥٨	الكاؤولين	١.٢.٣
٥٨	السليكا	٢.٢.٣
٥٨	خام الفلدسبار	٣.٢.٣
٥٩	تهيئة الكاؤولين المحروق مسبقاً	٤.٢.٣
٦٥	تهيئة المواد الأولية	٣-٣
٦٥	طحن المواد الأولية	١.٣.٣
٦٥	تهيئة مزيج المواد الأولية	٢.٣.٣
٦٥	الخزف الحجري	١.٢.٣.٣
٦٦	الخزف الصيني	٢.٢.٣.٣
٦٦	تهيئة نماذج الاختبار	٤-٣
٦٨	معدات التشكيل	١.٤.٣
٦٨	قوالب الكبس	٢.٤.٣
٧٠	تشكيل النماذج	٣.٤.٣
٧٠	تحديد الظروف المثلى لعملية التصنيع	١.٣.٤.٣
٧١	تجفيف وحفظ النماذج	٤.٤.٣
٧١	حرق النماذج	٥-٣
٧٣	فحوصات ما بعد الحرق	٦-٣
٧٣	الفحص البصري	١.٦.٣
٧٣	التقلص بعد الحرق	٢.٦.٣
٧٤	الكثافة الكتلية والمسامية وامتصاص الماء	٣.٦.٣
٧٥	مقاومة الانطغاط	٤.٦.٣
٧٦	معياري الكسر	٥.٦.٣
٧٦	مقاومة الصدمة الحرارية	٦.٦.٣
٧٧	الفحوصات الكهربائية	٧.٦.٣
٧٧	ثابت العزل	١.٧.٦.٣
٧٩	مقاومة العزل الكهربائي	٢.٧.٦.٣
الفصل الرابع : النتائج والمناقشة		
٨١	تقييم المواد الأولية	١-٤
٨١	التحليل الكميائي وتحديد الأطوار	١.١.٤

٨٣	تحديد درجة حرارة الحرق	٢.١.٤
٨٤	فحص الشكل الخارجي واللون	٢-٤
٨٤	الخواص الفيزيائية	٣-٤
٨٨	الخواص الميكانيكية	٤-٤
٨٨	مقاومة الانضغاط	١.٤.٤
٩١	مقاومة الانحناء	٢.٤.٤
٩٤	خواص العزل الكهربائي	٥-٤
٩٤	متانة العزل الكهربائي	١.٥.٤
٩٦	ثابت العزل	٢.٥.٤
٩٨	عامل الفقد	٣.٥.٤
الفصل الخامس: الاستنتاجات والتوصيات والمقترحات		
١٠٤	الاستنتاجات	١-٥
١٠٦	التوصيات والمقترحات	٢-٥
١٠٧	المصادر	
الملاحق		

بعض المصطلحات المستخدمة في البحث

Ceramic Insulator	عازل سيراميكي
Stoneware	الخرزف الحجري
Porcelain	الخرزف الصيني
Silica	أوكسيد السليكون (SiO_2)
Alumina	أوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3)
Apparent Porosity	المسامية الظاهرية
Drying Process	عملية التجفيف
Kaoline	كاؤولين (خام الكاؤولينيت)
Mullite	مولائيت ($Al_2Si_2O_7$)
Water Absorption	امتصاص الماء
Firing Temperature	حرارة الحرق
Radial Shrinkage	تقلص قطري
Compressive strength	مقاومة الانضغاط
Flexural Strength	مقاومة الثني
Thermal Shock	الصدمة الحرارية
Sintering	التأبيد
Dense Solids	أجسام صلبة كثيفة
Un Fired bodies	الأجسام الخضراء (غير محترقة)
Break down strength	متانة العزل الكهربائي
Polarization	استقطاب
Clay Minerals	معادن طينية
Dielectric Constant	ثابت العزل
Loss factor	عامل الفقد
Rigidity	الجساءة
Hardness	الصلادة

الخلاصة

لقد تم في هذه الدراسة تحضير مادتين سيراميكيتين هما الخزف الحجري " Stoneware " والخزف الصيني Porcelain لأجل استخدامها كعوازل كهربائية بحيث تم تشكيل ثلاث خلطات من كل منها بعد أن تم التغيير في بنسب مكوناتها فكانت بالنسبة للخزف الحجري هي:

a : (٧٥ % Grog + ٢٥ % Kaoline)

b: (٨٠ % Grog + ٢٠ % Kaoline)

c: (٨٥ % Grog + ١٥ % Kaoline)

اما بالنسبة للبورسلين :

A: (٥٠ % Kaoline + ٢٠ % feldspar + ٣٠ % sand)

B: (٥٠%Kaoline + ٣٠ % feldspar + ٢٠ % sand)

C: (٥٠ % Kaoline + ٤٠ % feldspar + ١٠ % sand)

وقد تم تشكيلها بطريقة الكبس شبه الجاف وهي إحدى الطرق التقليدية المستخدمة في صناعة المواد السيراميكية، بعدها أحرقت النماذج بثلاث درجات حرق مختلفة لكل منهما بعد أبقائها في هذه الدرجات لمدة ساعتين حيث أحرقت نماذج الخزف الحجري بالدرجات (١٠٥٠ °C, ١١٥٠ °C, ١٢٥٠ °C) أما نماذج الخزف الصيني فقد أحرقت بالدرجات (١١٠٠ °C, ١٢٠٠ °C, ١٢٥٠ °C)

ومن ثم تم دراسة خواصها الفيزيائية والميكانيكية والعزل الكهربائي ولجميع نماذج الخلطات.

وقد لوحظ بأن نسبة المسامية الظاهرية وامتصاصية الماء قد ازدادت بدرجات الحرق (١٠٥٠ °C, ١١٠٠ °C) لجميع النماذج ولكلا المادتين ، بعدها أخذت هذه القيمة بالانخفاض مع ارتفاع درجات الحرق حتى بلغت ادنى قيمة لها عند درجات الحرق ١٢٥٠ °C, ١٢٠٠ °C لكلا المادتين الخزف الحجري والخزف الصيني .

أما الخواص الميكانيكية المتمثلة بمقاومة الانضغاط ومقاومة الانحناء فقد لوحظ بأن هناك زيادة لهذه الخواص عند زيادة درجة الحرق لجميع النماذج ولكلاً المادتين .

أما خواص العزل الكهربائي فقد لوحظ زيادة في متانة العزل الكهربائي بارتفاع درجة حرارة الحرق ولجميع النماذج حتى بلغت كحد اقصى عند درجة حرارة حرق ١٢٥٠ °C لخزف الحجري ، ١٢٠٠ °C ، للخزف الصيني ، أما عامل الفقد فقد أنخفض لجميع النماذج بارتفاع درجة الحرارة الحرق بحيث كان أدنى حد له عند درجات حرق ١٢٥٠ °C , ١٢٠٠ °C ، بالنسبة الى كلا المادتين الخزف الحجري والخزف الصيني .

ويعد مقارنة النتائج للمادتين ، وجد بأن نماذج الخلطة " C " ، للخزف الصيني " Porcelain " ذات مسامية وامتصاصية للماء اقل مايمكن عند درجة حرارة حرق ١٢٠٠ °C كما أنها قد سجلت اعلى قيمة لمتانة العزل الكهربائي حيث بلغت " ١٣.٢ Kv/ mm " بالإضافة الى خواصها الميكانيكية العالية حيث بلغت مقاومة الانضغاط لها " ٨٧.٥MPa " لذا فإن هذه الخلطة تعد الاكثر ملائمة في صناعة عوازل الضغط العالي .

ABSTRACT

In this work two Materials, stoneware and porcelain , are manufactured to be used as electrical insulators. Three batches of each substance were prepared as following :-

- | | |
|--|--|
| } | a: (70% grog + 20% Kaoline) , |
| } | stoneware : (80 % grog + 20 % Kaoline) , |
| } | c:(80 % grog + 10 % Kaoline) |
| A:(00 % Kaoline + 20 % feld spare + 30 % sand) , | |
| B:(00 % Kaoline + 30 % feld spare + 40 % sand) | |
| C:(00 % Kaoline + 40 % feld spare + 10 % sand) | |

Samples of all batches were formed by semi dry pressing method , stoneware samples were fired at temperatures (1000 °C , 1100 °C , 1200 °C) whereas porcelain samples were fired at (1100 °C , 1150 °C , 1200 °C) with a soaking time two hours for each type . Physical, mechanical and dielectrical properties of all samples were studied. It is observed that the apparent porosity and water absorption were increased for the firing temperature (1000 °C , 1100 °C) than they were decreased when the temperature be high and they were reached to minimum value at the firing temperature (1200 °C, 1200 °C) for samples of stoneware and porcelain. The mechanical properties representing by the compressive strength and flexural strength for all samples were increased with increasing firing Temperature.

The dielectric properties were improved by increasing firing temperature, so where the break down reached it maximum value by the higher firing temperature (1200 °C) for the stoneware , and 1200 °C for porcelain .

The loss factor (tanδ) was decreased by increasing the firing temperature and it shows minimum value when the firing temperature in maximum for both stoneware and porcelain .

As general result we found that the samples of the batch" C " porcelain at 1200 °C firing temperature has a minimum apparent porosity and water absorption as a highest break down its reached to " 13.2 Kv/mm " and best mechanical properties , as compressive strength reached to

“٨٧.٥ MPa “ as this result the batch “ C “ is more proper to manufacturing the electrical Insulators for high voltage.

الفصل الاول

١-١ المقدمة Introduction

إن أهمية المواد السيراميكية تكمن في القوة التي تربط ذراتها ، فضلاً عن خواصها الميكانيكية والفيزيائية ، والتي جعلت منها مادة مترابطة ذو صلادة عالية [١] . وهذا السبب الذي يميزها عن المعادن . وبسبب مقاومتها العالية للبلية

(Wear Resistance) ، وتربط ذراتها وردانة توصيلها الحراري والكهربائي ، جعلها تدخل في كثير من الصناعات كصناعة العوازل الكهربائية ، والمواد الحاكة (Abrasive Materials) وأدوات القطع وغيرها [٢] .

يرجع مصطلح سيراميك إلى مصطلح إغريقي كيرموس (Keramos) ، وهي منتجات الطين ، أو المنتجات التي تصنع من الطين الناري [١] . وكانت الصناعات السيراميكية تعاني من مشاكل وصعوبات قبل الحرب العالمية الأولى ، وهي كيفية السيطرة على درجات الحرارة داخل الأفران ، والسيطرة على الأطوار السيراميكية الناتجة ، إذ كان التحكم عن طريق المعاينة النظرية من قبل العامل ، وهي طريقة غير دقيقة ، ولكن بعد الحرب العالمية الأولى ، وبعد اكتشاف المزيج الحراري (Thermo Couple) ، الذي يسيطر على درجة الحرارة داخل الفرن ، تم تحديد مخططات الأطوار للمواد السيراميكية ، وبالتالي تم تحديد البنية الملائمة للاستخدام ، وقد جرت العديد من البحوث والدراسات في هذا المجال .

وخلال الحرب العالمية الثانية ، لعبت المواد السيراميكية دوراً مهماً في الصناعة فكانت مادة البورسلين (Porcelain) الدهنية الملمس ذات أهمية في الصناعة للمنتجات العالية التردد ، وبدأت هذه الصناعة بالتطور يوماً بعد يوم ، ولاسيما في ألمانيا ، إذ شملت المواد ذات العزل الكهربائي والمواد المغناطيسية ، وقد أدى تطورها إلى إيجاد مادة (Von-Hipple) ، والتي كونت فيما بعد إحدى الفروع المهمة في السيراميك . وهكذا توالى التطور ، بحيث شمل شمعات القذح الثلاثية المحاور والمايكا المستخدمة في محركات الاحتراق الداخلي والصمامات ، وخصوصاً تلك التي تستخدم في محركات الديزل ، وبالذات نتريدات السيلكون ، لما تتمتع به هذه المادة بخواص عالية الجودة من مقاومة تآكل ميكانيكية عالية (Wear Resistance) ، واستقرارية كيميائية (Chemical Stability) [٣، ٤] .

وهكذا فقد تطورت صناعة السيراميك عبر العصور ، حتى أصبحت تستخدم مواد طبيعية من باطن الأرض مباشرة في الصناعة ، دون اللجوء إلى عمليات الاختزال وبذلك فقد تم تقليل الكلف إلى حد كبير علاوة على الحصول على الخواص الميكانيكية المطلوبة وهذه المواد تشمل الألومينا ، التيتانيا ، وهو ما يعرف بالسيراميك الحديث [٥] .

وقد واجه هذا العلم (السيراميك) تطوراً سريعاً في فترات زمنية تارة ، بطيئاً تارة أخرى ، وخاصة في النصف الثاني من القرن العشرين ، إذ أصبحت منتجاته تدخل في مجالات عديدة ومتنوعة ، منها المنتجات الكهربائية كالعوازل والمرشحات ، وبعض الأجزاء التي تعمل بالموجات فوق الصوتية ، والمنتجات النووية كالجدران الواقية في المفاعلات النووية ، والمنتجات البصرية وغيرها [٦، ٧، ٨] .

إن الطلب على المواد السيراميكية بدأ يرتفع بشكل غير اعتيادي كماً ونوعاً خلال هذا القرن ، فتطبيقاته أخذت تتزايد يوماً بعد آخر لحاجتنا إلى مواد تملك العديد من الخواص الكهربائية والميكانيكية والتي سنناقش بعضها لاحقاً ، ومنها العوازل السيراميكية

موضوع بحثنا ، والتي تستخدم في محطات التوليد وفي أبراج نقل القدرة والتي يصل بها مدى الفولتية إلى (٧٠٠٠٠٠٠) . إن ذلك يتطلب إعاقة لمرور التيار خلال العازل مقابل أقل خسارة بالقدرة والتي سيتم معرفتها لاحقاً ، بحيث يرافق كل ذلك ثبوت في التركيب البلوري والخواص الميكانيكية عند تغيير درجات الحرارة والظروف البيئية المحيطة [٩] . إن خواص العوازل الكهربائية تحدد ضمن الأطر الآتية :

أولاً: يوصف تأثير العازل أثناء تسليط مجال كهربائي خارجي مستمرا أو متناوباً عليه والذي يرتبط بنوعية مادة العازل والشحنات المقيدة فيه ، وهذا ما يعرف

بـ (السماحية) "Permittivity" .

ثانياً: يوصف مدى تحمل العازل للجهد الكهربائي المسلط عليه فكل عازل قابلية محدودة في تحمل الجهد الكهربائي ، وعند تجاوز هذا الحد فإن العازل سينهار ويصبح موصلاً ، ويشير إلى أن الجهد الذي يحدث عنده الانهيار يعرف

بـ (متانة العزل) أو (متانة الانهيار) Break down ، وهي تختلف من مادة إلى أخرى ، إذ تتأثر بعدة عوامل منها خارجية مثل شكل الأقطاب التي تستخدم في تسليط الجهد الكهربائي ، وطبيعة السطح الخرجي وظروف القياس من درجة الحرارة والرطوبة وتردد المصدر والفترة الزمنية عند تطبيق الفولتية على العازل . واخرى داخلية تتعلق بالتركيب البلوري للمادة وكذلك العيوب والشوائب الموجودة فيها .

ثالثاً: دراسة الخواص الأخرى المتعلقة بأداء العازل وهي الخواص الميكانيكية وتصرف العازل تحت تأثير الأحمال المختلفة وظروف التشغيل المتغيرة ومن هذه الخواص مقاومة الانحناء ومقاومة الانضغاط والصدمة الحرارية والصلادة وغيرها وكذلك الخواص الفيزيائية والتي تلعب دوراً مهماً في أداء العازل ومنها الكثافة والمسامية وامتصاص الماء .

٢-١ الدراسات السابقة

هناك العديد من الدراسات والبحوث التي تناولت صناعة وأداء العوازل الكهربائية ، نذكر منها ما يهمنا في بحثنا هذا ، وكما يلي :

لقد بحث هارتسلان (Hartsln) [١٠] الامتصاص العزلي ، وفقدان القدرة ، مفترضاً بأن العوازل لها سعة حقيقية معينة تعرف بثابت العزل ، ودرجة توصيل معينة ، وتوجد بعض الخصائص الأخرى التي تعود إلى تلامس السطوح للعازل والأقطاب المعدنية . وهذا التلامس السطحي يبدي مقاومة كبيرة لمرور الإلكترونات من خلاله ، لذلك فعند تسليط (ق. د. ك) عبر مكثف ، فهناك شحنات تكون مترامية على السطحين ، وهذه الشحنات تتكون من الشحنات الممتصة وغير الممتصة. إن خصائص هذا التركيب قد اعتبر رياضياً مصدرراً للقوانين التجريبية لامتصاص وفقدان القدرة في المجالات المتناوبة . وقد وضعت النظريات التي تؤكد هذه النتائج العملية .

أما بوننك (Boning) ، فقد بحث اعتماد ثابت العزل على التردد ، إذ وجد بأن ثابت العزل الظاهري يقل مع زيادة التردد إلى قيمة محددة ، والتي تعد قيمة حقيقية لثابت العزل للمادة [١١] . إن ثابت العزل لمعظم الأجسام السيراميكية المصنعة يزداد بزيادة الحرارة ، كما في حالة سيراميك الألومنيوم (Alumina Ceramics) ، وبعض أنواع الخزف الصيني (Porcelain) . وإن ذلك قد بحث من قبل بيرينج ورسل وبووي (Berbenich, Russell, Bowie)

[١٢].

فقد قام العالمان داي ، وهارتشارم [١٣] (Dye, Hartsharm) باستخدام طريقتين لحساب ثابت العزل لحوالي (١٧٠) صفيحة من المايكا (Mica) ، وكانت النتائج بأن جميع هذه العينات لها نفس القيمة لثابت العزل تقريباً . وقد وجد بأن قيمة ثابت العزل يتراوح بين (١٠ - ٥) ، عدا بعض الاستثناءات لأجسام التيتانيات المختارة ، والتي قد يصل فيها العزل إلى (٣٠٠٠) أو أكثر.

وقد وجد بأن ثابت العزل للجسم السيراميكي يتأثر بعدة متغيرات ، منها تغير التركيب للجسم السيراميكي ، تقنية التصنيع (Manufacturing Technique) ، وكثافته (مساميته) ، ومعاملات الاختبار (Testing Factors) ، والتي تتضمن الحرارة والفولتية.

لقد درس (عبد النور والعاني) خواص العزل الكهربائي [١٤] (ثابت العزل ، والفقد العزلي) للكأولين المضاف إليه نسب مختلفة من الفلدسبار ، وفي مديات الترددات الواطنة ، وقد تمت الدراسة بإضافة فلدسبار الكالسيوم



وفلدسبار البوتاسيوم ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) . وقد وجد بان تأثير العوامل (ضغط التشكيل ، درجة حرارة الحرق ، درجة حرارة القياس) قليل على ثابت العزل ضمن الترددات الواطنة ($100\text{KHz} < f < 300\text{Hz}$) ، ولكنه يزداد بزيادة درجة حرارة الحرق ، ودرجة حرارة الوسط عند القياس . وبأحسن الأحوال ، تم الحصول على أعلى قيمة لثابت العزل للكأولين فقط وهي (٥) ، عندما كانت درجة حرارة الحرق (1325°C) ، والقياس تم في درجة حرارة (90°C) ، وضغط تشكيل (500Kg/cm^2) عند تردد (4KHz) ، وبفقدان عزل عالي جداً .

أما هونك (Hong) [١٥] ، فقد درس تأثير الحرق تحت ضغط جوي اعتيادي ، وتأثير الأوكسجين على عدد كبير من خواص العازل الفيزيائية والكهربائية والميكانيكية ، إذ شكل ثلاث مجاميع تختلف في نسبة (الألومينا / سيلكا) ، وكل مجموعة قسمها إلى أربعة نماذج وحرق كل نموذج بدرجة حرارة وظروف متباينة (وجود الأوكسجين ، اختزال ضعيف ، اختزال الأوكسجين) . وقد درس تأثير هذه الظروف ودرجة حرارة الحرق على خواص العازل . إذ أجريت القياسات الكهربائية على النماذج التي تحوي على نسبة عالية من الألومينا (49.8%) ،

(40.11%) سيلكا ونسب واطئة من الأكاسيد المعدنية الشائبة ، وقد حصل على النتائج التالية :

زيادة في مقاومة الانحناء الميكانيكية عند زيادة درجة حرارة الحرق تحت نفس ظروف الحرق (83 MPa) عند ($1310^{\circ}C$) ، و (92 MPa) عند ($1320^{\circ}C$) بوجود الأوكسجين ، وتزداد عن سابقتها هذه المقاومة عند اختزال الأوكسجين من المحيط أثناء الحرق (89 MPa) عند ($1310^{\circ}C$) .

أما الخواص الكهربائية فكانت مشجعة جداً ، إذ حصل على متانة عزل تراوحت ما بين (25 - 30 KV/mm) ، وتزداد هذه القيمة عند اختزال الأوكسجين من جو الفرن . وقد تراوحت قيمة ثابت العزل ما بين (6 - 6.4) ، إذ لم يظهر عليها تغير بوجود أو عدم وجود الأوكسجين .

وهذه الاستنتاجات تؤكد على أن الخواص العزلية للمواد تتأثر بشدة من ناحية التركيب الكيميائي للمادة أكثر من تأثيرها بظروف الحرق . أما المسامية الظاهرية فقد كانت (0.34) بوجود الأوكسجين ، و (0.08) عند اختزاله من المحيط عند الحرق بدرجة حرارية ثابتة ($1340^{\circ}C$) ، وكذلك نسبة امتصاص الماء ، فقد تراوحت ما بين (0.14) إلى (0.03) .

لقد تم حساب السماحية (ثابت العزل) من قبل روبنسون (D.A. Robinson) [16] ، لعينات من تربة معدنية (Soil minerals) رطبة باستخدام علاقة سميت بعلاقة كلاسيوس- موسوتي . إذ افترض

(روبنسون) بأن الاستقطاب في الأجسام الصلبة ينقسم إلى ثلاثة أقسام رئيسة ، هي الاستقطاب الإلكتروني ، الاستقطاب الأيوني ، الاستقطاب الاتجاهي ، اعتماداً على التردد الذي يحصل فيه ($10^{11} - 10^6$ Hz) ، ولكن الذي يحصل في التربة المعدنية هو اختفاء تردد الأشعة الراديوية ، والذي يكون أقل من (10^{11} Hz) ، أي اختفاء الاستقطاب الاتجاهي ، في حين أن هذا الاستقطاب يكون واضحاً في الماء أو بقية السوائل . لذلك فعند مرور الأشعة الراديوية أو الكهرومغناطيسية خلال تربة معدنية ذات نسبة من الرطوبة ، فإنها سوف تعطي قيمة لثابت العزل تختلف عما لو مرت بنفس التربة إذا كانت جافة ، أو عند مرورها بالماء ، إذ أن السماحية للماء تساوي

(78.5) بالضغط الجوي الاعتيادي ودرجة حرارة ($25^{\circ}C$) ، أما سماحية التربة فتتراوح قيمتها للكوارتز (4.5-10) ونفس الظروف . وعلى هذا الأساس ، فإن هذا الفارق يؤدي إلى تغير بسماحية الوسط ، عندما يكون الوسط مزيجاً من الماء في التربة ، وإن ذلك يعتمد على مسامية التربة ، شكل وترتيب المسامات داخل الوسط ، ولا يمكن إيجاد معدل الرقمين لأسباب عديدة لا مجال لذكرها ، ولهذا فقد تم إيجاد معادلة تربط هذه المتغيرات ، وقد سميت بمعادلة كلاسيوس-موسوتي

(Clausius Mosotti)

$$\epsilon'_r = \frac{3Vm + 8\pi\alpha_D}{3Vm - 4\pi\alpha_D}$$

حيث إن :

ϵ_r : ثابت العزل المركب الحقيقي .

Vm : الوزن الجزيئي.

α_D : الاستقطاب في العوازل المعدنية .

إذ يتم احتساب (α_D) مختبرياً ، وتعطى قيمته من جدول خاص أعد لهذا الغرض .

إنّ التطبيقات لهذه المتغيرات عديدة ، فمنها ما يستخدم في المعدات الحربية غير المتفجرة (Unexploded Ordnance [OXU]) ، إذ تستغل الرادارات الأرضية التي ترسل موجاتها الاختلاف في امتصاص الموجات أو ما يسمى بخواص العزل يبين الهدف والمواقع والتي تكون إما جافة أو رطبة أو مائية بحيث يكون الفرق بالخواص العزلية واضحاً عن الهدف .

لقد تمّ قياس متانة العزل الكهربائي وبعض الخواص الكهربائية من قبل سيرياساراثي وماهونوير (Syryasarathi and Mahanwar) [١٧] ، أثناء عرضهما بحثاً لمادة مركبة ذات أساس بوليمري ، من خلال إضافة جسيمات لها من مادة الرماد المتطاير (Fly ash) أو الكاؤولين (Kaoline) أو المايكا (Mica) وغيرها . إذ أن هذه الجسيمات تكسب المادة البوليمرية خواصاً فيزيائية وميكانيكية أفضل مثل المقاومة الميكانيكية ومعامل يونك والتشوه الحراري عندما ترتفع درجة الحرارة وبصورة عامة فإن الخواص الميكانيكية الناتجة للمادة المركبة تعتمد على شكل وحجم وترتيب الجسيمات للمادة المضافة كما وتعتمد على قوة التلاصق بين أسطح الجسيمات والأرضية . وقد استخدم هذان الباحثان (نايلون - ٦) ، لما لهذه المادة من استخدامات واسعة ، إذ إنها تستخدم في صناعة أجسام أجهزة الهاتف النقال ، وبعض الدوائر الالكترونية ، وأجهزة التحزيم وغيرها ، إذ تم إضافة هذه الجسيمات (الرماد المتطاير ، الكاؤولين ، المايكا ، السيلكا) ، وذلك للحصول على بنية أكثر استقراراً وأعلى تحملاً للاجهادات الخارجية ، فضلاً عن أنها تعطي خواص عزل أكبر .

وتعد هذه الدراسة من أحدث الدراسات في هذا المجال . لقد تم إضافة نسب مختلفة من الرماد المتطاير إلى (النايلون - ٦) ، وقياس مدى تأثيرها على الخواص الميكانيكية والحرارية والكهربائية للبنية الناتجة . لقد تمّ ذلك بإضافة نسب وزنية مختلفة (٥ ، ١٠ ، ٢٠ ، ٢٥ ، ٣٠ ، ٣٥ ، وحتى ٤٠ %) ، واستخدم لذلك مدى حراري للتشكيل ($240^{\circ}C$ ، $230^{\circ}C$ ، $220^{\circ}C$ ، $200^{\circ}C$) ، إذ استخدم التشكيل بالحقن الساخن ، ليتم الحصول على عينات صفائحية بسك (٢mm) حسب النظام (ASTM) ، وقد استنتج :-

- إن الحجم الكبير من الجسيمات المضافة إلى النايلون تظهر تحسناً في الخواص الميكانيكية إذا ما زيد في نسبتها مقارنة بالحجم الصغيرة، ولكن الحجم الصغيرة أعطت تحسناً في الخواص العزلية للمادة المركبة إذا زيدت نسبتها مقارنة بالإحجام الكبيرة للجسيمات المضافة .
- تضاف جسيمات الرماد إلى النايلون - ٦ ، وذلك لتحسين الجساءة (Rigidity) ، مقاومة الحرارة ، استقرارية الأبعاد .
- إن الخواص الميكانيكية والكهربائية تعتمد على شكل وحجم الدقائق بالمادة المركبة ، لذلك فإن الخواص تكون دالة لحجم الحبيبات .

Objection

دراسة تصنيع مادة سيراميكية ، ذات عزل كهربائي عالي ، ذو خواص ميكانيكية عالية من مواد متوفرة محلياً ، بكلفة اقل ، وبأقل ضياع بالطاقة مقارنة مع المادة المستوردة ، وقد تم تصنيعها اعتماداً على برنامج عمل تصنيع المواد السيراميكية مع اجراء فحوصات فيزياوية وميكانيكية واخرى كهربائية للتوصل الى افضل النتائج التي اجري مطابقتها مع القياسي .

الفصل الثاني

١-٢ تركيب وخواص المادة السيراميكية

يعرف المجال السيراميكي على انه المجال الذي يتعامل مع مواد لامعدنية لانتاج عدد وادوات ذات خصائص نافعة وذو جمالية عالية وذلك بتطبيق عدد من العمليات التشكيلية والحرارة [١٨] . وتتصف المادة السيراميكية بأنها مركبات ذات اواصر تساهمية او ايونية . وهذه الاواصر تتصف بالقوة اذا ماقورنت مع الاصرة المعدنية التي تربط ذرات المعادن لهذا فإن المادة السيراميكية تتصف بالصلادة العالية "High hardness" والجماءة العالية "High stiffness" ، ولكنها ذات مطيلية منخفضة "Low ductility" ان المعادن تحوي على الكترونات حرة في مداراتها الخارجية لهذا فعند تعرضها الى مجال كهربائي فإنها تقوم بنقل التيار عبر ذراتها وذلك عكس ما موجود في المادة السيراميكية حيث تكون الذرات مرتبطة مع بعضها بالالكترونات وبالتالي فإنها لاتحوي على الكترونات حرة لذا فانها تكون عديمة التوصيل الكهربائي والحراري ، الامر الذي يتطلب جهداً عالياً لفصل الذرات ولهذا فإنها تبدوا ذات درجات انصهار عالية [١]

والسيراميك يتواجد عادة بتركيب بلوري (Crystalline structure) ، ولكنه أكثر تعقيداً عما هو موجود في المعادن لعدة أسباب :

١. لأن جزيئات السيراميك تحتوي على ذرات متباينة الحجم .
٢. إن شحنة الأيونات تكون مختلفة في العديد من المواد السيراميكية كما في (SiO_2) و (Al_2O_3) ، لهذا فإن هناك قوة تحاول أن تشبك الذرات بترتيبات فيزيائية داخل جزيئات النتيجة هو التركيب البلوري . بالإضافة إلى أن العديد من المواد السيراميكية تحتوي على أكثر من عنصرين ، كما في ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_4$) ، إذ يؤدي إلى تركيب بلوري معقد . السيراميك البلوري معقد وممكن أن يتواجد بشكل أحادي البلورة أو متعدد البلورات (Single Crystal or Poly Crystalline) ، وان الخواص الميكانيكية والفيزيائية تتأثر بحجم الحبيبات ، إذ إن المقاومة (Strength) ، والمتانة (Toughness) تزداد بتصغير الحبيبات . بعض المواد السيراميكية تكون ذات تركيب غير متبلور (Amorphous structure) ، أو ذات طور زجاجي (Glassy phase) [١] .

١.١.٢ طرق تصنيف السيراميك

هناك العديد من المواد السيراميكية التي تصنف الى مجاميع من حيث تركيبها الكيميائي أو نسبة المواد التي تدخل في تركيبها أو طرق تصنيعها أو خواصها الميكانيكية أو استخدامها ، وكل ذلك يدعو إلى تصنيفها بأسس عديدة منها :

١. التصنيف على أساس البنية الداخلية

إنّ هذا التصنيف يتحدد بالبنية الداخلية للمادة السيراميكية المتحققة مثلاً كوروندم (Corundum) المولايت (Mullite) ، كريستوبلايت (Cristobalite) ، تريديمايت (Tridymite) ، كوارتز (Quartz) ، سبنل (Spinel) ، زركون (Zircon) وغيرها [٥] .

٢. التصنيف على أساس التركيب الداخلي

لقد صنف الباحث (Choudhury) المواد السيراميكية حسب التركيب المعدني

[١٩] إلى :

- السيراميك البلوري (Crystalline Ceramic) (أحادي أو متعدد البلورات).
- السيراميك غير البلوري (Non-Crystalline) .
- سيراميك الطور الزجاجي (Glassy Phase Ceramic) .

III. تصنيف بولتن (Bolton) للمواد السيراميكية

لقد صنف بولتن (Bolton) المواد السيراميكية إلى [٢٠] .

١. الزجاج ويشمل زجاج الصودا – الزجاج المقاوم حرارياً .
٢. السيراميك التقليدي ويشمل السمنت والطابوق والبلاط .
٣. السيراميك الهندسي ويشمل الاكاسيد – الكاربيدات – النتريدات .
٤. السيراميك الطبيعي ويشمل الصخور الطبيعية .
٥. السيراميك الالكتروني ويشمل مركبات الفرايت – أشباه الموصلات .

IV. التصنيف على أساس المسامية

لقد تم تصنيف المواد السيراميكية اعتماداً على مساميتها من قبل الباحث (Rado) ، وكما مبين بالجدول (١-٢) الذي يوضح هذا التصنيف [٢١] .

الشكل (١-٢) يوضح التصنيف على أساس المسامية

اللون	النوع	التصنيف
ابيض مصفر	Common pottery الخزفيات التقليدية	porous
ابيض & ابيض	Vitreous China الخزف الزجاجي	Non-porous
ابيض	Soft porcelain البورسلين اللين	Non-porous
ابيض مزرق	Hard porcelain البورسلين الصلب	Non-porous

بصورة عامة يمكننا تصنيف السيراميك إلى ثلاثة أصناف رئيسة [١] :

أ. السيراميك التقليدي Traditional Ceramics

وهي الانواع التي تستخدم في صناعة المنتجات الطينية كالاواني والطابوق والاسمنت .

ب. السيراميك الجديد (New Ceramics)

وهو حالة جديدة أكثر تطوراً من سابقتها (السيراميك التقليدي) و يحوي بصورة عامة على الاكاسيد والكاربيدات وهو يمتلك خواص ميكانيكية وفيزيائية عالية مما يجعله مميزاً وخصوصاً عن السيراميك التقليدي .

ج. السيراميك الزجاجي (Glass Ceramics)

يعتمد بشكل كبير على السليكا ، ويتميز عن الأنواع الأخرى بأنه تركيب غير بلوري (Non-crystalline structure) . ويمكن تحويل السيراميك الزجاجي إلى تركيب بلوري (Crystalline structure) ، وذلك عن طريق المعاملة الحرارية (Heat treatment) بتركيب محددة .

٢-٢ المواد الأولية

إذا تفحصنا صخرة مثل الغرانيت بالعين المجردة او بالاستعانة بعدسة مكبرة فسوف نلاحظ بأنها متكونة من مواد مختلفة . فهناك اولا مادة ذات لون رمادي زجاجية المنظر وصلبة جداً ثانيا مادة بيضاء رمادية او وردية اشبه (بالفرغوري) صلبة بعض الشيء وعلى شكل الواح مستطيلة وثالثاً مادة قشرية ذات لون فضي او بني غامق او اسود لينة او هشة بعض الشيء .

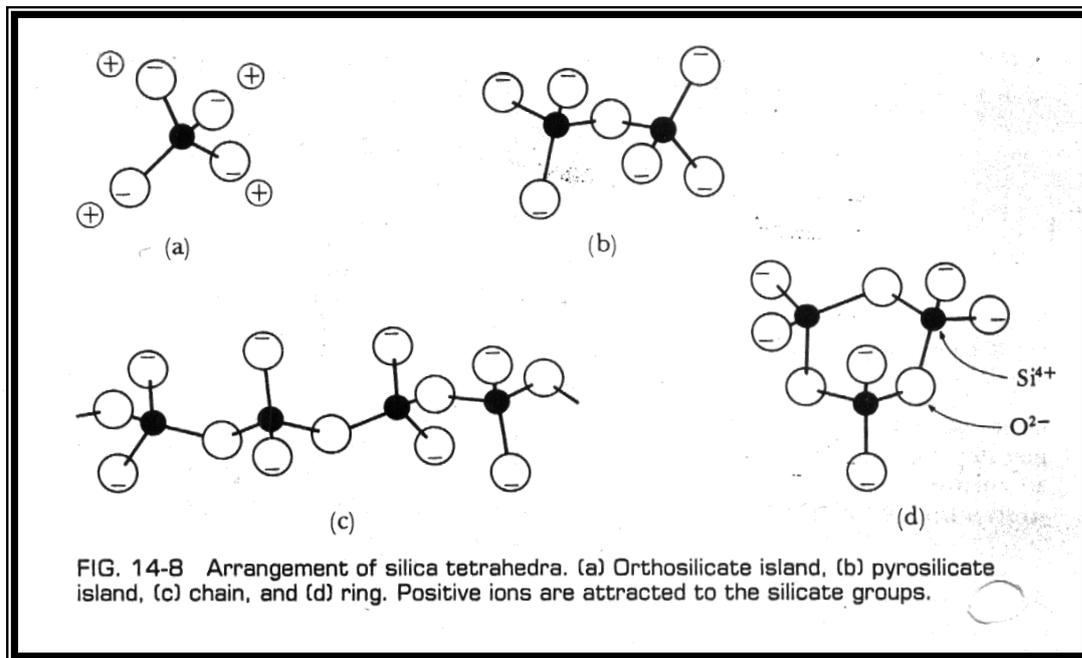
وقد اظهرت التحليلات الكيمياءوية بأن هذه المواد الثلاث هي مركبات كيمياءويه ذات تركيب ثابت ، فالاولى متكونة من عنصري السليكون والاكسجين وتدعى كوارتز والثانية هي سليكات الالمنيوم والصوديوم والبوتاسيوم وتدعى فلدسبار ، اما الثالثة فهي سليكات البوتاسيوم مع الالمنيوم وتدعى المايكا البيضاء او مع المغنيسيوم وتدعى المايكا السوداء.

ان هذه المركبات تدعى المعادن "Minerals" . وان معظم الصخور متكونة من ترافق معدنين او اكثر ، لذلك فيمكن تعريف المعدن على انه مادة متصلبة متجانسة ذات تركيب كيميائي ثابت وتكون بالطرق الطبيعية غير العضوية [٢٢]

Silicate Structure

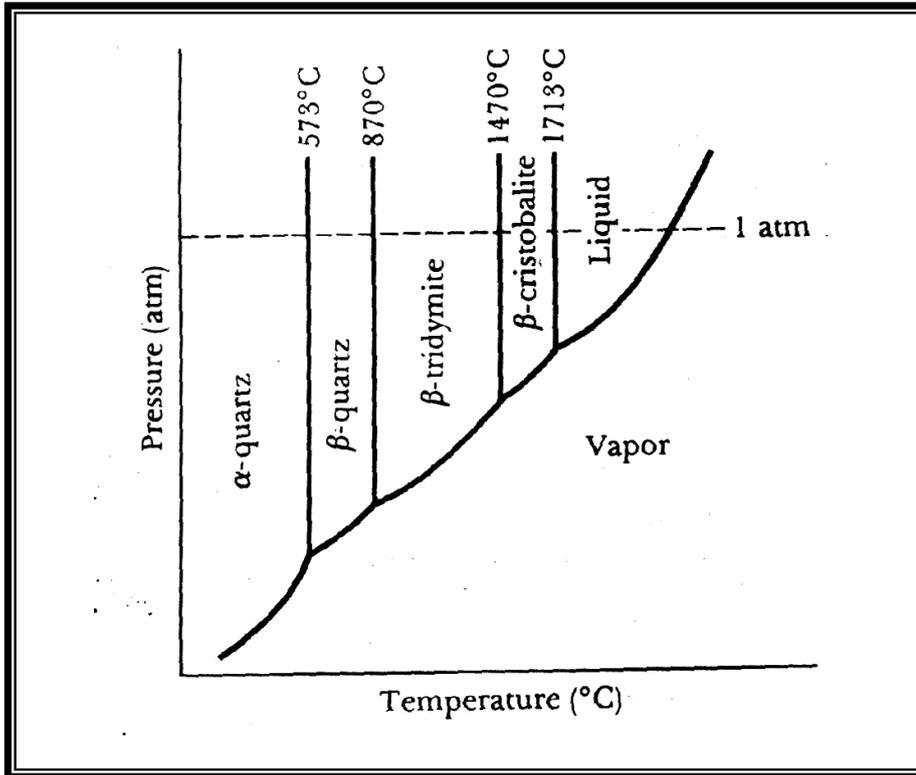
١.٢.٢ تراكيب السليكا

وهي تظهر بشكل حبيبات تتصل مع بعضها البعض او مع مركبات اخرى مثل الفلدسبار واوكسيد الحديد وغيرها . ويكون التركيب الداخلي لها بشكل رباعي الواجه المثلثية (Tetrahedron) مستقلة او مزدوجة او تظهر بشكل سلاسل مستمرة (Chain-Structure) او تراكيب حلقيه (Rings) او تراكيب صفائحية (Sheet-Structure) [٢٨] وكما مبين ذلك بشكل (١-٢)



الشكل (١-٢) يبين تراكيب السليكا [٢٨]

إن دراسة أطوار السليكا عملية معقدة جداً ، وذلك لأن هذه الأطوار متعددة الأشكال (Polymorphic) ، أي أن المادة نفسها يمكن لها أن تكون بأشكال بلورية مختلفة بالرغم من أن نسبة العناصر الداخلة فيها ثابتة . لذا فيمكن لأبسط تركيب للسليكا أن يوجد كبلورات كوارتز ألفا (α -Quartz) وكوارتز بيتا (β -Quartz) وتريدميت (Tridymite) أو كريستوباليت (Cristobalite) ، وكل طور من هذه الأطوار ذو تركيب بلوري مختلف وبنفس التركيب الكيميائي ، كما مبين ذلك بالشكل (٢-٢) . المهم في هذا السياق أن لا يمتلك المنتج السيراميكي بلورات كوارتز حرة ، لأن انقلاب الكوارتز بين حالتين (β ، α) سوف يعمل تشققات داخل الجسم السيراميكي عند التسخين والتبريد مما يضعف الصفات الميكانيكية ويقلل من الصدمة الحرارية .



الشكل (٢-٢) يبين الأطوار التي يتواجد فيها السليكا (SiO_٢) [٢٨]

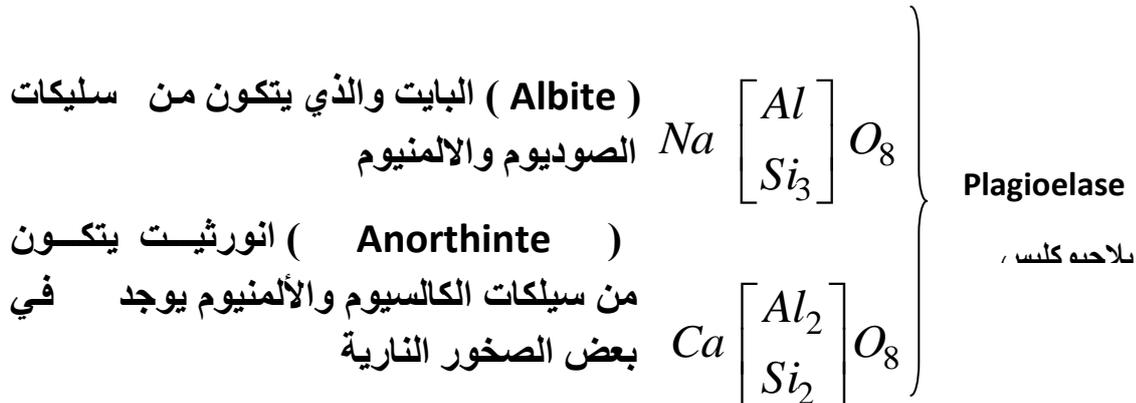
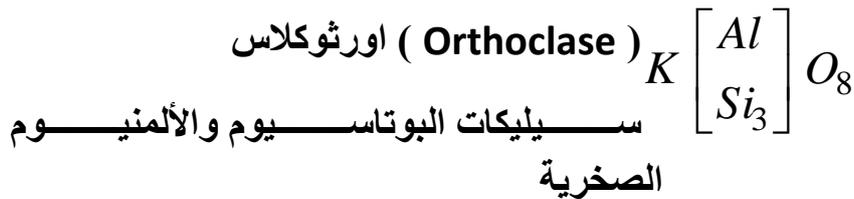
تستخدم السليكا في تصنيع المواد السيراميكية لأسباب عديدة منها تقليل نسبة التقلص (Shrinkage) ، إذ تعمل على تقليل اللدونة ، ومن ثم تمنع حدوث التشققات كما تسهم في خروج الغازات المتحررة من المنتج خلال عمليات الحرق وقد يتفاعل البعض منها مع المواد القلوية ليكون الطور الزجاجي الذي يكسب المنتج الخواص الميكانيكية الجيدة [٢٣].

Feldspars

٢.٢.٢ الفلدسبار

وهي مواد صهورة تضاف إلى المادة السيراميكية أثناء عملية الحرق لتوصلها إلى الطور الزجاجي (Glassy phase) ، وهي تتميز بوفرتها نوعا ما ، وعدم ذوبانها بالماء ، وكذلك بالمحاليل القلوية ، والفلدسبار مادة متغيرة التركيب أهمها الفلدسبار البوتاسيوم والذي يدعى الارثوكليس .

يوجد الفلدسبار في صخور الباجماتيت (Pegmatites) مع الكوارتز والمايكا وهذه الصخور تتواجد داخل الشقوق التي تتولد نتيجة المنصهرات والتي تسمى (Magma) . إن المكونات الأساسية الثلاثة للفلدسبار هي [١٨،٢٤] .



وتعتمد صناعة السيراميك على الأنواع النقية من معادن الفلدسبار ويعد من المواد الحاوية على الاكاسيد الصهورة (Flux) التي تعمل على تكوين مركبات ذات درجات انصهار واطنة إثناء مراحل التلييد للأجسام السيراميكية [٢٥].

(Kaoline Minerale)

٣.٢.٢ الكاؤولين

يعد من أكثر المواد الأولية المستخدمة في الصناعات السيراميكية ، وهو عبارة عن مادة لها قابلية على تكوين كتلة لزجة متماسكة عند الخلط مع الماء، ومن ثم أماكن التشكيل بإعادة تجفيفها من الماء وتكتسب خاصية الصلابة عند التجفيف محافظة على شكلها، وتصبح أكثر صلابة عند تسخينها إلى درجة الاحمرار . فضلاً عن تميز الطين بمكونات ترابية لزجة شديدة التماسك من الممكن أن يوجد بشكل صخور صلبة تكونت نتيجة عمليات الانضغاط واكتسبت صفة التلييد وعدم المطاطية وعدم السماح للماء بالنفوذ خلالها، ومن الممكن بواسطة بعض المعالجات تحويلها إلى صخور صلبة ذات صفة مرنة [٢٦] .

لقد استخدمنا أطيان الكاؤولين في تحضير العوازل السيراميكية ، وذلك لوفرتها وخواصها العزلية الجيدة . يمثل الكاؤولينيت (Kaolinite) الصورة النقية من خام الكاؤولين ، والذي يمثل النوع الأول من الأطيان في حين يمثل خام المونتموريلوناييت (Montmorillonite) النوع الثاني من هذه الأطيان [٢٨].

١.٣.٢.٢ تركيب خامات الكاؤولين

أطيان الكاؤولين هي سليكات الألمنيوم المائية ورمزها الكيميائي :
($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) أو ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) .

والتركيب البلوري لها يتكون من طبقتين هما :

طبقة (Silica tetrahedral) المتصلة بطبقة (Octahedral) ، ومكونات الكاؤولين الأساسية هي :

١. ١٤% ماء تبلور .

٢. ٣٩.٥% أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) الومينا .

٣. ٤٦.٥% أوكسيد السيلكون (SiO₂) سيلكا .

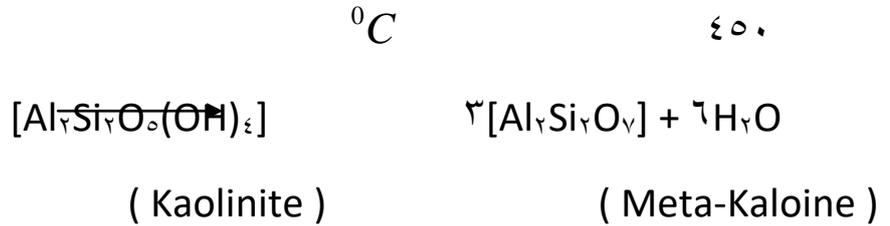
إن هذه المكونات تمثل الصورة النقية للكاؤولينيت ، ولكن قلما يوجد بهذه النسب في الطبيعة . إذ يحتوي على بعض الشوائب كمركبات الحديد .

الشكل (٢-٣) يمثل بلورة الكاؤولينيت المتكونة من طبقتين هما :

١. (AL-O-H) والتي تعرف بـ (Gibbsite) وتتكون من : أربع ذرات هيدروكسيد (OH) مرتبطة بذرتي الألمنيوم (٢Al) وتربط ذرتا الألمنيوم بدورها بذرتي أوكسجين ويرمز لهذه الطبقة بالرمز (Al₂(OH)₄O₂) .
٢. طبقة هيدرات السليكا الرباعية وتتكون من ذرتي سليكون (٢Si) مرتبطة بثلاث ذرات أوكسجين مكونة (Si₂O₃) . ترتبط هذه الطبقة بالطبقة الأولى عن طريق أصرتين تربط بين ذرتي السليكون وذرتي أوكسجين في الطبقة الأولى. وتتميز هاتان الطبقتان بكونهما تملكان خاصية كهر بائية تجعلهما سهلتا الانزلاق والتحرك فوق بعضهما، معطية الطين خواصا فيزياوية عالية كالليونة والصوبنة وإمكانية التشكيل [٢٧،٢٨] .

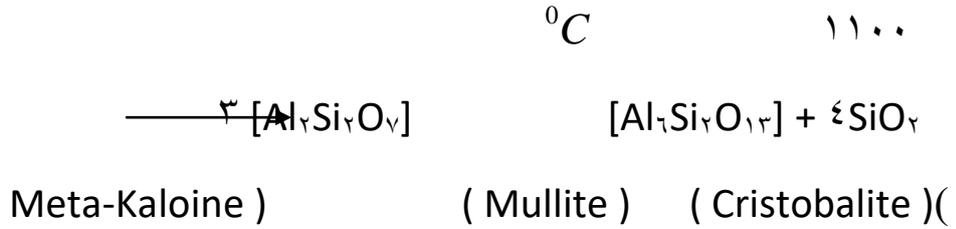
٢.٣.٢.٢ تحولات الكاؤولين أثناء الحرق

يفقد الكاؤولين الماء الشبكي (Lattice Water) عند حرقه بدرجات حرارية أعلى من (١٥٠⁰C) . فعند التسخين تحدث تغيرات فيزياوية وكيميائية، إذ يتحول الكاؤولين إلى الميتاكاؤولين عند الحرق بدرجة حرارة (٤٥٠⁰C) محدثاً تهدم في الشبكة البلورية ومعادلة التحول هي :

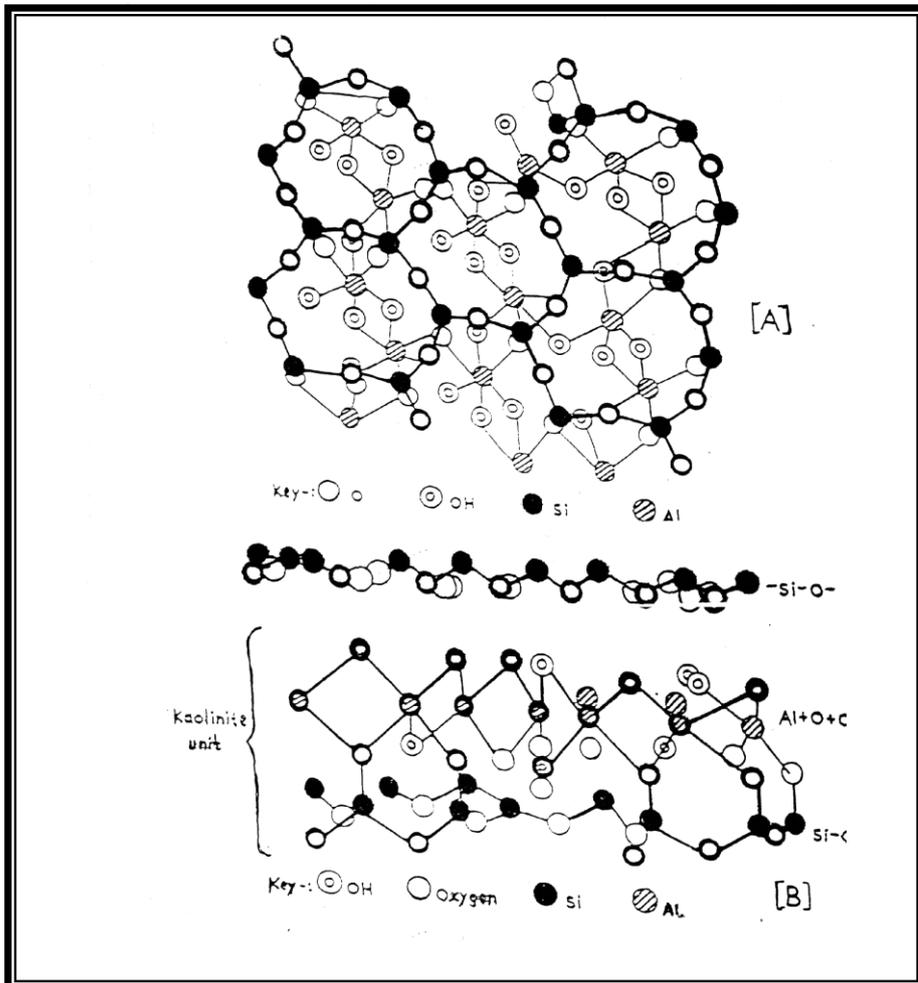


وبعد الدرجة الحرارية (٥٠٠⁰C) يحدث تقلص كبير في الكاؤولين بسبب تقارب أجزاء التركيب البلوري نتيجة خروج ماء التبلور .

وعند الاستمرار بالحرق لغاية ($1100^{\circ}C$) تقريباً يتكون المولايت (السليكا) ، إذ يحوي المولايت على (٧٢%) تقريباً من الألومينا ، وعلاقة التحول من الميتاكاؤولين إلى المولايت [٢٧،٢٩] .



إذ أن المولايت والكريستوبلايت هما المركبان الوحيدان اللذان يبقيان حتى درجة ($1400^{\circ}C$) تقريباً .



الشكل (٢-٣) يمثل التركيب البلوري للكاؤولينيت [٢٨]

٢-٣ تصنيع المواد السيراميكية

هناك العديد من العمليات التي تمر بها المواد السيراميكية للوصول إلى المنتج النهائي ، وأولى هذه العمليات هي عملية تحضير المواد الأولية التي تشمل طرق الاستخراج من المناجم ومن ثم عملية التكسير والطحن والغربلة للحصول على الأحجام المناسبة بعدها تبدأ عمليات تصنيع المنتج والتي تشمل الخلط والتشكيل والتجفيف والتلييد وتجري عملية التشكيل والكبس والذي يكون إما بوجود الماء أو بعده ومن ثم إجراء عملية التجفيف والتلييد والتي تتم وفقا لبرنامج معين للحصول على الخواص المطلوبة [٣٠] .

١.٣.٢ تشكيل المواد السيراميكية

هي عملية إنتاج الأجزاء النصف مصنعة والتي تمتلك متانة كافية لنقل النموذج لغرض إجراء العمليات التصنيعية اللاحقة بدون حدوث كسر أو تقطعت يتم تشكيل المواد السيراميكية بطرائق عديدة يعتمد الكثير منها على حالة المادة فقد تكون بشكل مواد جافة أو بهيئة أجسام لدنة أو بشكل عجينة أو بشكل عالق للمادة (Slurry) . إن تشكيل المواد الجافة وشبه الجافة يتم باستخدام قوالب خاصة ثابتة أو مرنة ويتم كبس و رص دقائق المادة للحصول على الشكل النهائي للنموذج . ويقسم الكبس إلى كبس جاف وكبس اهتزازي وكبس متوازن .

أما التشكيل بالحالة اللدنة فيتم بالبيثق (Extrusion) أو المقابلة بالحقن (Injection Molding) ، كما يمكن أن تجري عملية التشكيل بالصب الانزلاقي (Slip Casting) [٣١،٣٢] .

١.١.٣.٢ الكبس بالقوالب

يعد الكبس من أكثر التقنيات استخداماً لتشكيل المساحيق السيراميكية ، ويمكن وصف هذه العملية على أنها عملية رص وتشكيل محوري لدقائق المسحوق مع إضافة كمية من المادة الرابطة ووضعها في القالب ويمكن لهذه التقنية الحصول على أشكال مختلفة وبسرعة عالية ، وخواص سطحية جيدة بأبعاد دقيقة وكلف تصنيع مناسبة [٣٣].

تتضمن هذه الطريقة تهيئة المساحيق المستخدمة ثم إجراء عملية الخلط والكبس للشكل المطلوب بواسطة ملئ تجويف قالب معدني بمسحوق المادة ومن ثم تسليط ضغط بمكابس خاصة للحصول على متانة كافية للمنتج لإكمال المراحل التصنيعية اللاحقة. وتقسم طريقة الكبس بالقوالب اعتماداً على حركة المكابس إلى نوعين

- ❖ الكبس ذي الفعل المنفرد (باتجاه واحد) (Single Die Compaction).
- ❖ الكبس ذي الفعل المزدوج (ثنائي الاتجاه) (Double Die Compaction).
- ❖ الكبس ذو الفعل المنفرد (الكبس باتجاه واحد) :-

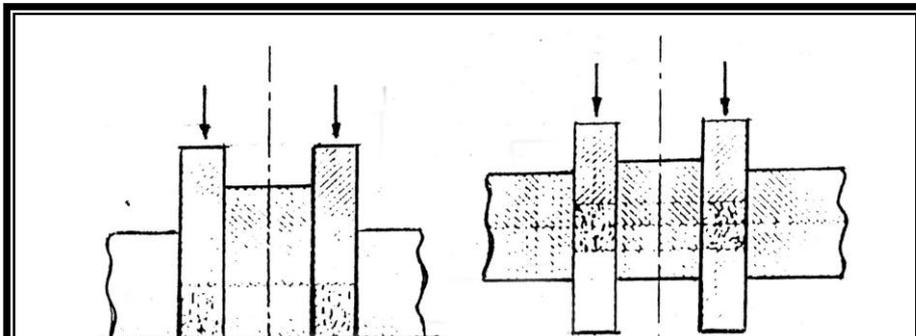
Single Die Compaction

في هذه العملية تؤدي قوة الاحتكاك بين دقائق المسحوق وكذلك بين الدقائق وجدار القالب إلى توليد قوى كبس غير متجانسة داخل القالب وبالتالي الحصول على جسم ذي كثافة غير متجانسة ، تكون عالية في الجزء العلوي بفعل وجود الكبس وتنخفض بالتدرج باتجاه قاعدة القالب ، والشكل (٢-٤) يوضح مبدأ عمل هذه الطريقة .

- ❖ الكبس ذو الفعل المزدوج (الكبس باتجاهين) :-

Double Die Compaction

يتم تسليط الضغط على المسحوق وكبسه باستخدام مكبسين أحدهما علوي والآخر سفلي يتحركان في نفس الوقت مما يؤدي إلى تقليل الاختلافات في تسليط القوى في المناطق المختلفة من القالب وبالتالي الحصول على منتج أكثر تجانساً في الكثافة ، والشكل (٢-٤) يوضح مبدأ عمل هذه الطريقة [٣٤].



الشكل (٢-٤) يوضح مبدأ عمل الطريقتين ، إذ يمثل : [٣٤]

(a) الكبس ذا الفعل المنفرد .

(b) الكبس ذا الفعل المزدوج .

٢.٣.٢ تلييد المواد السيراميكية

إن البنية المجهرية للمادة تلعب دوراً أساسياً في تحديدها للخواص . فعلى سبيل المثال ، المقاومة العالية تتطلب بنية بلورية ودقيقة ومقاومة الزحف بنية بلورية خشنة كما أن الفقد الكهربائي القليل يتطلب بنية بلورية ناعمة ومنتظمة. وهكذا فإن الخواص الميكانيكية تتغير مع اختلاف البنية المجهرية .

وعندما يراد تشكيل مادة بوليمرية أو معدنية في قوالب للسباكة أو الحدادة فإن هنالك عمليات لاحقة للحصول على الشكل النهائي كالخرطة والتنعيم ولكن هذا الأمر مختلف بالنسبة للسيراميك ، إذ إن السيراميك مادة هشة وقصفة .

فقليل منه يتم تشكيله بالصب وذلك لارتفاع درجة حرارة انصهاره مما يؤدي إلى بذل طاقة عالية لذلك تم اللجوء إلى طحنه وتحويله إلى مسحوق ناعم وخلطه ثم كبسه داخل قوالب للحصول على الشكل النهائي المطلوب الذي يحرق أو يعامل حرارياً فيما بعد (Heat-treated or Firing Green (Unfired)) ، لكي يتحول إلى أجسام صلبة كثيفة (Dense solids) ، وهذه العملية التي تتحول فيها الأجسام الخضراء (غير المحترقة) (Green (Unfired)) ، والتي تبدي تأثيراً واضحاً على البنية المجهرية النهائية (Final Micro-Structure) هي التي تسمى بالتلييد (Sintering) [٣٥] .

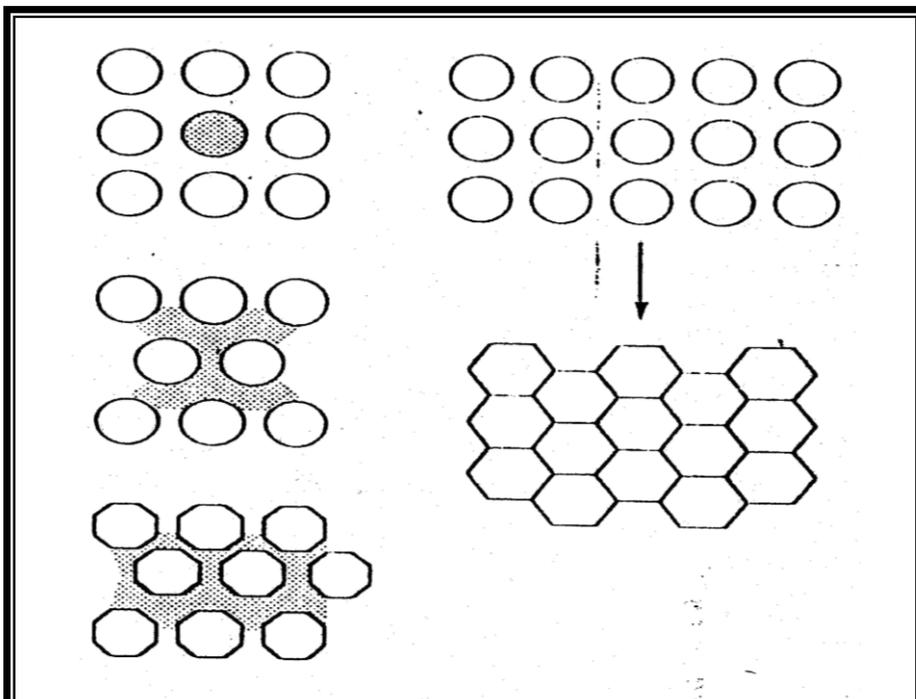
باختصار تعرّف عملية التلييد بأنها العملية التي بواسطتها يتم تحويل المسحوق المضغوط إلى جسم صلب كثيف من المادة السيراميكية . ومن ناحية أخرى فقد عرف هيرنك (Herring) [٣٦] ، عملية التلييد بأنها العملية التي بموجبها يجري التغيير في شكل الجسيمات الصغيرة أو مجاميع الجسيمات إلى تركيب منتظم عند تسليط حرارة عالية مع الزمن وقد تم مؤخرا الحصول على بنية دقيقة جدا ذات مقاومة بليان عالية وتحمل اجهادات وصلادة عالية وذلك عند تسليط تيار كهربائي على البنية السيراميكية للمسحوق تؤدي إلى تكوين حرارة عالية وبوقت قصير جداً لا يسمح بنمو البلورات وتسمى هذه الطريقة (FAST) وهي تجرى على المواد السيراميكية لأدوات القطع والعدد [٣٧].

يمكن أن تجري عملية التلييد في الطور السائل وفي هذه الحالة تسمى التلييد في الطور السائل (Liquid-phase sintering) ، إذ يتم اختيار درجة حرارة الخليط السائل خلال عمليات التشكيل ، والمبينة بالشكل التخطيطي (٢ - ٥a) ، عدا ذلك فإن التلييد يجري بالحالة الصلبة (٢ - ٥b) (Solid-state sintering) . يمكن تلخيص عملية التلييد بالمراحل الآتية [٣٥] :

المرحلة الأولى : وفيها تزداد حالات التلامس بين الدقائق الصغيرة المتداخلة ويحدث نمو للعنق و عندها تزداد الكثافة بنسبة (٦٠-٦٥) % .

المرحلة الثانية : ويتم فيها غلق المسامات تدريجاً ويحدث انتشاراً لدقائق المادة باتجاه الفراغات والقنوات الاسطوانية وتزداد الكثافة بنسبة (٦٥-٩٠) % .

المرحلة الثالثة (النهائية) : وفيها تزداد حركة الفراغات والحدود البلورية ، كما يحدث تضلع في سطح الدقائق المتلامسة والوصول إلى القيمة النظرية من الكثافة .



الشكل (٢-٥) : a- التلييد بالحالة السائلة b- التلييد بالحالة الصلبة. [٣٥]

هناك نوعان من عمليات التلييد هما :

١.٢.٣.٢ التلييد بالحالة الصلبة (Solid-state Sintering)

عند تلييد مزيج المساحيق في درجات حرارية اقل من درجة انصهار لأي من المكونات (Constituent) أو عند درجة حرارة اقل من درجة انصهار أي مادة من المواد التي يمكن أن تتكون أثناء عملية التلييد تتم في الحالة الصلبة وعند غياب الطور السائل [٣٣]. إن القوة الفعالة التي تدار بها عملية التلييد هي اختزال الطاقة الزائدة المقترنة بالأسطح وهذا يتحقق من خلال عاملين [٣٥] :

١. الاختزال في المساحة السطحية الكلية وذلك عندما يزداد معدل حجم الحبيبات الذي يؤدي إلى خشونة الحبيبات (Coarsening) وهي عملية ترابط فيزيائية بسبب قوى التجاذب فان در فالز (Van der Walls) بين سطوح الدقائق .

٢. إزالة الحد الفاصل بين الصلب والبخار وخلق مساحة حد فاصل للحبيبات يسمح بالنمو الحبيبي الذي يؤدي إلى التكتيف (Densification) الشكل (b-٢-٥) يبين ذلك . ويتضمن ذلك استعادة وإعادة تبلور وانتشار حجمي و سطحي للحبيبات.

إن هذين العاملين يتنافسان عادة وإذا أدت العمليات الذرية إلى أن تجعل التكتيف هو السائد فالمسامات سوف تصغر وتختزل ولم تظهر مع الزمن ، ولا تظهر تقلصات في البنية . لكن إذا أدت العمليات الذرية إلى الخشونة بشكل أسرع فالمسامات والحبيبات الخشنة سوف تكبر وتنمو مع الزمن [٣٨].

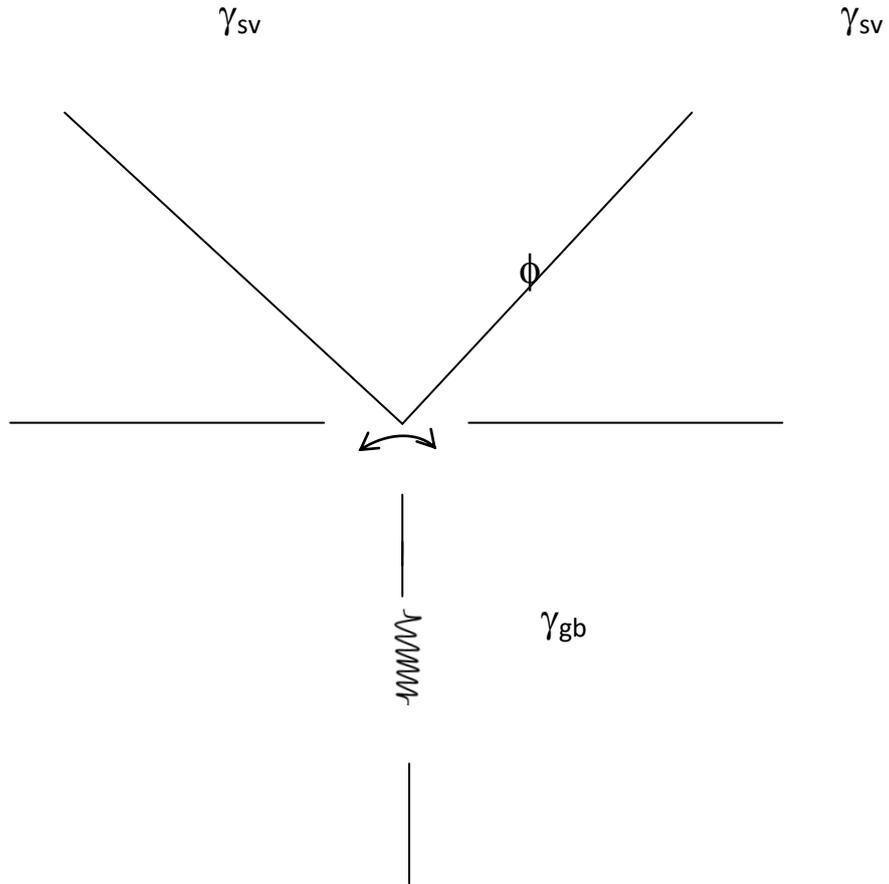
أثناء عملية التلييد يجب أن يتحقق الشرط القائل بأن طاقة الحد الفاصل (γ_{gb}) للحبيبات أقل من الطاقة السطحية (γ_{sv}) للصلب / بخار ، والتي تساوي زاوية زوجيه (ϕ) ، وكما مبين بالرسم أدناه : [٣٥]

$$\gamma_{gb} = 2\gamma_{sv} \cos \frac{\phi}{2}$$

حيث أن :

(γ_{gb}) = طاقة الحد الفاصل للحبيبات .

(γ_{sv}) = الطاقة السطحية للصلب - بخار .



٢.٢.٣.٢ التلييد بالحالة السائلة (Liquid- phase sintering)

عند إجراء عملية التلييد في درجات حرارية أعلى من درجة انصهار إحدى مكونات مزيج المساحيق أو أعلى من ذلك لبعض المركبات السهلة الانصهار الناتجة من عملية التلييد فإن التلييد يتم بوجود طور سائل وللحصول على زيادة في الكثافة فإنه من الضروري أن يمتلك النظام كمية مناسبة من الطور السائل وحدث إذابة مناسبة للدقائق الصلبة في الطور السائل ومن ثم حدوث ترطيب جيد للصلب بالطور السائل ، ويمكن تلخيص آلية التلييد بوجود الطور السائل كما يأتي [٢] :

عند ارتفاع درجة حرارة المساحيق سوف تنصهر إحدى المكونات لها وتعمل هذه المكونات يوتكتيكاً مع بعضها البعض ، وتكون سائلاً . إن هذا السائل سوف يرطب الدقائق وينفذ بينهما ثم يولد قوة تجاذب تسحب الدقائق وبالإشتراك مع الخاصية الشعرية والطاقة السطحية فإن السائل سوف ينفذ بين الدقائق ويؤدي إلى إعادة ترتيب الدقائق وملئ الفراغات ، إذ يولد تكثيفاً (% Densification) ، وبعدها يتم إعادة لترسيب المحلول بسبب التنشيط الكيميائي للذرات عند نقطة تماس الدقائق مع بعضها مما يؤدي إلى إذابة الذرات عند نقطة التماس ، وبالتالي إعادة ترسيب بعض الدقائق ، وهذا يؤدي إلى حدوث التقلص والتكثيف وتكون آلية التلييد هذه أسرع من الحالة الصلبة نتيجة لسرعة العمليات الانتشارية ، وفي النهاية سوف يتوقف تلييد الحالة السائلة ، ويبدأ تلييد الحالة الصلبة ليحدث تلييد لهيكل الجسم بالكامل بالتلييد بالحالة الصلبة (Skeleton-state Sintering) ، وهذا يستغرق فترة زمنية أطول .

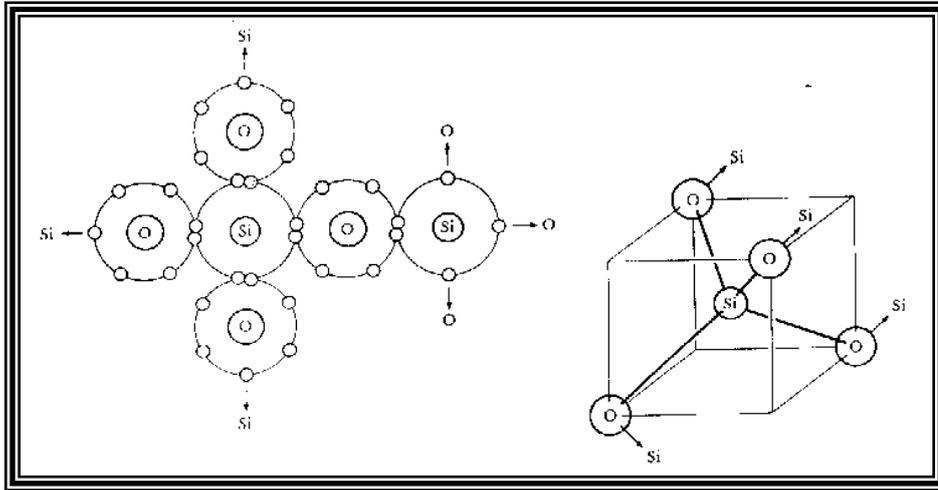
وعند التلييد في الحالة السائلة للأنظمة المحتوية على مركبات السليكا سوف تحدث عملية تكون الطور الزجاجي (Vitrification) وهي عملية لحامزجاجي (Glass weld) بين دقائق المادة أثناء عمليات التلييد . عند ارتفاع درجات الحرارة للمركبات المحتوية على السليكا المرتبطة ببعض الأكاسيد المعدنية سوف يتكون سائل زجاجي يربط الدقائق الصلبة وعند التبريد يتجمد هذا السائل ويبقى في الحالة الزجاجية ويعطي مقاومة للمركب النهائي المتكون من السليكا المتبلورة والمرتبطة بواسطة الطور الزجاجي [٣٩،٤٠] .

٢- ٤ تأثير البنية الداخلية على الصفات العامة للمادة السيراميكية

The effect of Inner structure on the Mechanical Properties

لقد ذكرنا سابقاً بأن المواد السيراميكية مواد قوية صلدة هشة ، وإنها ذات تحمل عالٍ لدرجات الحرارة . إن السبب في ذلك يرجع إلى أن القوى التي تربط ذراتها هي إما أن تكون أواصر بين أيونات مختلفة الشحنة ، أو نتيجة لتكوينها مركبات بحيث تسهم عناصرها الداخلية في إشباع أغلفتها الخارجية بالالكترونات الواحد مع الآخر بحيث تعطي بنية متماسكة يصعب انزلاق مستوياتها البلورية. وبالتالي ستكون أكثر استقراراً وثباتاً عما هو موجود في المعادن. مما مر نلاحظ بأن تماسك المواد السيراميكية ناتج عن خليط من الأواصر الأيونية والتساهمية وقوى فاندر فالز ، وأن هذه القوى تختلف فيما بينها من حيث الطاقة التي تحافظ على التركيب الداخلي فبعضها يكون قويا والآخر يكون ضعيفا ولهذا

عندما تسخن المواد السيراميكية في درجات حرارية عالية فإنها لا تنصهر في آن واحد ولكنها تنصهر في منطقة بينما تبقى المناطق الأخرى صلبة [٢٨] . إن بعض ذرات العناصر تساهم بالاشتراك بالكثرون واحد أو أكثر مع الذرات المجاورة للوصول إلى حالة الاستقرار ولكي تكون بأدنى مستوى من الطاقة الحرة. وهذا يتطلب وجود ذرات أغلفتها الخارجية غير مشبعة بإمكانها أن تفقد الكثرونات، والأخرى غير المشبعة مستعدة لاستقبال الكثرونات والوصول إلى حالة الاستقرار كما في السليكا (SiO_2) فذرة السليكون تحوي على أربعة الكثرونات في غلافها الخارجي . وهي مستعدة للاشتراك مع أربع ذرات أخرى والمساهمة معها لكي تملأ غلافها الخارجي والوصول إلى حالة الاستقرار وهكذا فإن ذرة السليكون تساهم مع أربع ذرات أوكسجين بحيث تترتب بشكل رباعي السطوح المثالية (SiO_4) (Tetrahedron) ، إذ أن ذرات السليكون في المركز وكما مبين ذلك بالشكل (٧-٢) .



الشكل (٧-٢) يوضح الأصرة التساهمية للسليكا (SiO_4) [٢٢]

من الشكل (٧-٢) يلاحظ بأن هذا التآصر يكمل مدارات ذرة السليكون ولكن لا يكمل تماما المدارات العائدة لذرات الأوكسجين ، إذ تحتاج كل منها إلكترونات إضافية وكما مبين

بالشكل . وعليه فإن الشكل الرباعي للسطوح المثلثية هو أيون لافتقاره لأربعة إلكترونات ، فإما أن تتأصر ذرة الأوكسجين في السليكا تساهمياً مع ذرات أوكسجين لأشكال رباعية متشابهة لتكوين تركيب سيليكات نقية أو تأصر ايونا مع ذرات العناصر الفلزية مكونة عدداً كبيراً من التراكيب السيراميكية وحدتها الأساسية هو الجسم الرباعي للسطوح المثلثية للسليكا

[٢٢، ٢٨] . بشكل عام تقسم المواد إلى ثلاثة أقسام رئيسية من حيث توصيلها الكهربائي :

- مواد موصلة للتيار الكهربائي مثل (Fe ، Al ، Cu ، ...) .
 - مواد شبه موصلة للتيار الكهربائي مثل (Br ، C ، Si ، ...) .
 - مواد عديمة التوصيل الكهربائي مثل (Ceramic ، Plastic ، ...) .
- فالمجموعة الأولى تتصف بأنها تمتلك إلكترونات حرة كثيرة في مداراتها الخارجية وهذه الإلكترونات تقوم بنقل التيار الكهربائي إذ ما سلط جهد خارجي عليها أما المجموعة الثانية فإنها تمتلك إلكترونات حرة قليلة تقوم بنقل جزء من التيار الكهربائي إذ ما سلط جهد خارجي ، أما المجموعة الثالثة فإنها لا تملك إلكترونات حرة في مداراتها ولهذا فعند تسليط جهد عليها لا تستطيع نقل التيار الكهربائي ولهذا قد استخدمت هذه المواد كعوازل [٤١] .

Physical Properties

٢-٥ الخواص الفيزيائية ؛

لكي نحصل على أفضل المواد السيراميكية يجب أن نحقق مواصفات فيزيائية عدة ، لاستخدام هذه المواد في تطبيقات محددة عملياً ، وأهم هذه الخواص هي :

Apparent Porosity

١.٥.٢ المسامية الظاهرية

يقصد بالمسامية الظاهرية نسبة احتواء الجسم السيراميكي من المسامات المفتوحة إلى الحجم الكلي . وغالباً ما ترافق المسامية الظاهرية كمية امتصاص الماء وذلك لان كمية الماء الممتص تمثل حجم المسامات المفتوحة التي يملؤها الماء . تعتمد هاتان الخاصيتان على عاملين هاميين يتأثران بهما تأثيراً مباشراً هما عمليات التلييد وعملية تكون المسالك والفجوات بسبب الغازات المتحررة ، ويؤثر بهذين العاملين درجة حرارة الحرق والمكونات الكيميائية والمعدنية للمادة السيراميكية [٤٢] .

إنّ الخاصية الميكانيكية والمسامية تعتبران من عوامل السيطرة النوعية على عمليات التصنيع لتقدير تأثير مختلف العوامل الناتجة في خواص المادة السيراميكية النهائية . هناك علاقة بين المسامية والخواص الميكانيكية للمادة السيراميكية فزيادة المسامية تؤدي إلى انخفاض قوة التحمل وتعتبر من العوامل التي تحدد التركيب الداخلي للمادة السيراميكية وبقائها . ومن هذه العوامل أيضا الكثافة الظاهرية ، المساحة السطحية للفجوات (المسامات) وأحجامها وتوزيعها وانتشارها في حجم الحرايات [٤٣] .

يكون عدد المسامات في المواد السيراميكية مختلفا من نوع إلى آخر وكذلك حجمها وشكلها، وهناك عوامل مؤثرة في المسامية مثل (الحجم الحبيبي ، الشكل الحبيبي، التدرج الحبيبي ، طريقة التشكيل ، ضغط التشكيل ، ودرجة حرارة الحرق) . وهناك أنواع من المسامات منها (المسامات المفتوحة) والتي تتصل مع بعضها ويمكن رؤيتها على السطح بواسطة المجهر الالكتروني والأخرى (المسامات المغلقة) والتي تكون معزولة بعضها عن بعض ، والنوعان يعرفان بالمسامية الكلية وهي تختلف عن المسامية الظاهرية . فالمسامية الظاهرية هي حجم المسامات المفتوحة / الحجم الكلي (حجم المسامات الكلية + حجم الحبيبات) . أما المسامية الحقيقية فهي :

(حجم المسامات المفتوحة + حجم المسامات المغلقة) / الحجم الكلي .

وتعتمد المسامية الظاهرية بعد الحرق على نسبة الماء الممتص والذي يستطيع إملاء المسامات المفتوحة حيث يتم حساب المسامية الظاهرية من العلاقة [٤٤] :

$$(A.P)\% = \left[\frac{W_s - W_d}{W_s - W_i} \right] \times 100\% \quad \dots(٣-٢)$$

حيث :

(Ws): وزن النموذج رطب بعد غمره في الماء وامتلاء المسامات المفتوحة وإزالة قطرات الماء العالقة على سطح النموذج بقطعة قماش نظيفة بعد إخراجها من الماء .

(Wd): وزن النموذج جاف .

(Wi): وزن النموذج وهو مغمور بالماء .

بينت التجارب على الكاؤولين أن قيمة المسامية تقل بزيادة درجة حرارة الحرق الاكثر من ($1000^{\circ}C$) تقريباً ، وذلك بسبب قيام منصهرات بعض الشوائب والمواد الصهورة التي يحويها الطين ضمن تركيبه الكيميائي بملئ الفراغات الموجودة بين حبيبات المولايت والكريستوبلايت ، إضافة إلى حدوث عملية تكون الطور الزجاجي فيصبح بناء النموذج السيراميكي أكثر صلابة ، أما في الدرجات الحرارية المنخفضة ، فقد يحدث تزايد في المسامية بزيادة درجة حرارة الحرق ضمن المدى الذي يشمل خروج الماء من التركيب البلوري بسبب المسارات الشعرية المتكونة [٤٥] .

٦.٢ الكثافة

تعد الكثافة الحجمية من أهم خواص المنتجات السيراميكية وهي تحدد إمكانية استخدام هذه المنتجات في الصناعات المختلفة وهي أيضاً تحدد خواص العزل الكهربائي في المواد. هناك عدة عوامل تؤثر في مقدار كثافة المواد السيراميكية مثل التركيب الكيميائي ، التركيب البلوري ، الحجم الحبيبي ، والظروف التي ترافق عمليات التصنيع مثل طريقة التشكيل ، والضغط المسلط ، ودرجة حرارة الحرق [٤٦] .

أما العلاقة بين درجة حرارة الحرق والكثافة فهي علاقة طردية حيث تزداد بزيادة درجة حرارة الحرق وذلك لأن عدد المسامات ينخفض وتقل مسامية الجسم السيراميكي فتزداد بذلك الكثافة .

إنّ حجم الحبيبات يلعب دوراً مهماً في تحديد مقدار كثافة المادة السيراميكية حيث أن صغر حجم الحبيبات للنماذج قبل التشكيل يؤدي إلى تراص الحبيبات الطينية أثناء الكبس وزيادة هذا التراص أثناء عملية التلييد عند الحرق ، إلا أن تأثير درجة الحرارة العالية (C° ١٤٥٠) تؤدي إلى رفع مقدار الكثافة في النماذج الخشنة ، وذلك لأن عملية التزجج وفعال الشوائب في الانصهار يقللان الفراغات ويزيدان الكثافة [٤٧] .

ولكن قد يحدث تناقص في الكثافة عند درجات حرارية مرتفعة للنماذج الطينية ذات الحجم الحبيبي القليل والنسب القليلة جداً من المواد الصهورة بسبب تكون أطوار منفصلة نتيجة انصهار حبيبات المادة السيراميكية [٤٢] .

من الممكن حساب الكثافة بالطرق التقليدية حيث تقاس أبعاد النموذج وكتلته وباستخدام العلاقة المبسطة نحصل على :

كتلة النموذج بعد الحرق (gm)

الكثافة (gm/cm³) =

حجم النموذج بعد الحرق (cm³)

لكن هذه العلاقة غير دقيقة في وصف الكثافة لأسباب عدة منها عدم انتظام أبعاد النماذج بعد الحرق ، وكذلك وجود المسامات التي تشغل حيزاً من حجم النموذج الكلي . إذاً وصف الكثافة مرتبط بالمسامية والمسامات أما مفتوحة وتمثل الفراغات التي من الممكن أن تملأ عند وضع النموذج في سائل ، أو مسامات مغلقة هي تكون على شكل فجوات داخل المادة والتي لا يمكن للسائل من النفاذ خلالها ، فإذا كانت الكثافة معرفة على أنها : كتلة المادة / حجم الحبيبات للطين فقط (بدون مسامات مغلقة) فإنها كثافة حقيقة (True density) . أما إذا عرفت الكثافة على أنها كتلة المادة / الحجم الظاهري [حجم حبيبات الطين + حجم المسامات جميعاً (المفتوحة +المغلقة)] فإنها تسمى بالكثافة الظاهرية ويمكن حسابها باتباع قاعدة ارخميدس [٤٥] .

لقد دلت الدراسات السابقة على أن قيم الكثافة الظاهرية تنخفض باستمرار عند رفع درجة الحرارة الى (٩٥٠ °C) ، وقد يعزى سبب ذلك الى تأثير تحرر الغازات وكذلك فإن حجم الفراغات سوف يكبر فتقل الكثافة ، إضافة الى التمدد الحاصل في أبعادها ، في حين رفع درجة حرارة حرق النماذج الى (١٠٥٠ °C) يؤدي إلى ارتفاع قيم الكثافة الظاهرية ، الذي يمكن أن يعود سببه إلى زيادة كمية نواتج عملية التليد من الأطوار البلورية والزجاجية مع انخفاض نسبة تحرر الغازات [٤٥] .

إن سبب استخدام التشكيل بالكبس مع الضغط العالي هو لزيادة التقارب في الحبيبات المكونة للنموذج المكبوس مع بعضها البعض بفعل قوة ضغط مكبس التشكيل الذي يؤدي إلى زيادة كمية كتلة الحبيبات المرصوفة في وحدة حجم النموذج وهو العامل الذي يعود إليه سبب ارتفاع كثافة النماذج ، وهذا لا يعني الحصول على كثافة تامة للمواد السيراميكية (بدون مسامات) . كذلك تقارب الحبيبات للنماذج المكبوسة يؤدي إلى زيادة تكون الأطوار الزجاجية والبلورية التي تزيد من كثافة النماذج بعد الحرق [٤٧] . لهذا فمن الضروري إجراء عمليات الطحن الجيد لنماذج الكاؤولين وتنعيمها بواسطة الطاحونة ذات الكرات .

فإذا علمنا أن (Va) يمثل الحجم الظاهري وان (m_١) يمثل وزن النموذج في الهواء فإن الكثافة الظاهرية تعطى بالعلاقة [٣٤] :

$$(A.d) = \frac{m_1}{V_a} = \frac{m_1}{V_s + V_{v_0} + V_{V_s}} \text{ (gm / cm}^3\text{)} \dots \dots (\text{٤ - ٢})$$

حيث :

(A.d) : الكثافة الظاهريه

(V_s) : حجم حبيبات الطين.

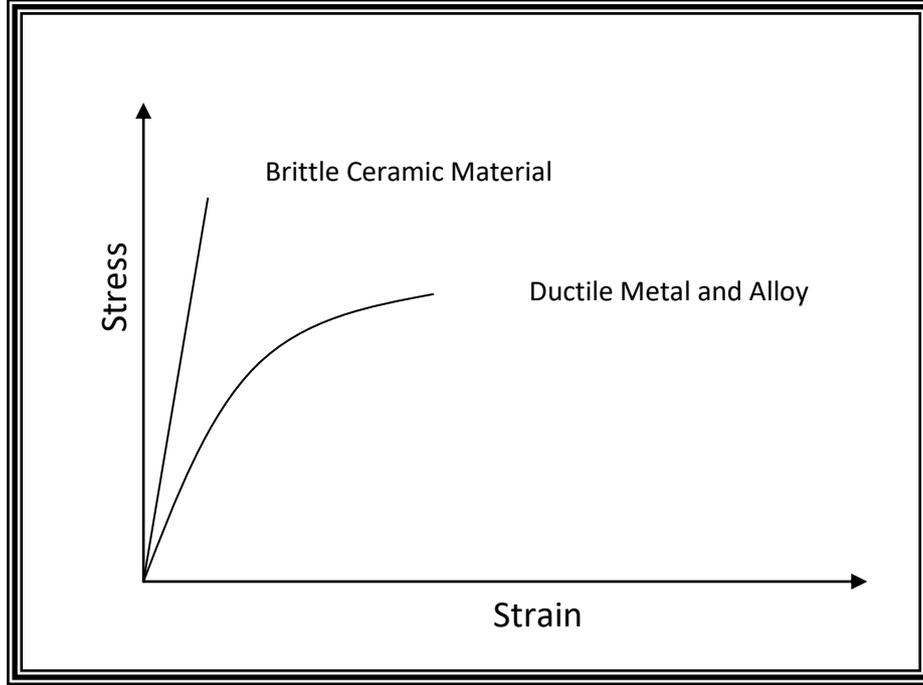
(V_{v₀}) : حجم المسامات المفتوحة .

(V_{V_s}) : حجم المسامات المغلقة .

ويمكن إيجاد حاصل الجمع هذا باستخدام التغطيس بالزئبق أو بإتباع قاعدة ارخميدس

٢- ٧ الخواص الميكانيكية

بصورة عامة فان المواد السيراميكية مواد صالدة وهشة (Rigid and Brittle) ، ويلاحظ ذلك من خلال رسم العلاقة البيانية لمنحني الإجهاد – الانفعال للمواد السيراميكية وكما مبين في الشكل (٢-٩) أدناه



شكل (٢-٩) يبين مقارنة العلاقة للاجهاد – الانفعال للمادة السيراميكية مع المادة المطيلية والسبانك [٤٨].

يلاحظ من ذلك بأن المادة السيراميكية مادة هشة تفشل بانفعال قليل دون أن تمر بنقطة خضوع ، وهذا يعني بان المنطقة اللدنة فيها قد اختفت ، والجدول (٢-٢) يوضح بعض هذه الخواص [٩] . فالصلادة ومعامل يونك لكثير من مواد السيراميك الجديد يفوق المعادن . نظرياً فان المقاومة للمواد السيراميكية أعلى من المعادن بسبب الأواصر بين ذراتها والتي لا تسمح بالانزلاق كما تم التطرق له سابقاً.

المادة Materials	الصلادة Hardness	معامل يونك Elastic modulus "E" MPa	الجدول (٢-٢) (يبين بعض الخواص للمواد السيراميكية [١] (غير متاح) NA= Not Avail
السيراميك التقليدي Tradition Ceramics			
الطابوق ، الطين الحراري Brick ، Fire clay	NA	95×10^2	
كاربيد السيلكون Silicon Carbide (Sic)	٢٦٠٠ Hv	460×10^3	
السيراميك الجديد New Ceramic			
الومينا (Al ₂ O ₃) Alumina	٢٢٠٠ Hv	345×10^3	
نترتيد البورون Boron Nitride. Cubic	٦٠٠٠ Hv	NA	
كاربيد التيتانيوم (TiC) Titanium Carbide	٣٢٠٠ Hv	300×10^3	
كاربيد التنكستن (WC) Tungsten Carbide	٢٦٠٠ Hv	700×10^3	
الزجاج Class			
زجاج السليكا Silica glass (SiO ₂)	٥٠٠ Hv	69×10^3	

able ، أي ذو قيمة عالية .

المواد السيراميكية ذات مقاومة ضعيفة إزاء الأحمال الشدية . أي أنها ذات مقاومة شد قليلة ولكنها ذات مقاومة عالية للانضغاط (High Compression Strength) ، لهذا فان المادة السيراميكية تستخدم لتقاوم أحمال الانضغاط ولا تستخدم لمقاومة أحمال الحني والشد إلا في حدود . ولزيادة مقاومة المادة السيراميكية هناك عدة طرق منها سطحية والأخرى داخل التركيب البنيوي للمادة وهذه الطرق هي [١] :

- ١ . تقليل الحجم الحبيبي في المنتجات السيراميكية المتعددة التبلور .
- ٢ . تقليل المسامية .
- ٣ . زيادة مقاومة الأسطح التي تتعرض إلى اجهادات كعمليات التزجج بمعامل تمدد حراري قليل .
- ٤ . استخدام الألياف للتقوية .
- ٥ . استخدام المعاملات الحرارية .

إن عمليات الفشل ممكن تميزها عن الضرر المحتمل حصوله بسبب التصميم والذي ممكن تخمينية من خلال متوسط عمر القطعة ، حيث أن معظم نظريات هندسة السيراميك تعتبر الهشاشة عاملاً مهماً لحصول الفشل والتي يعبر عنها بـ (K_{IC}) وهي متانة الكسر الحرجة أو مقاومة الكسر وهذا العامل يجب أن لا يتغير بارتفاع درجة الحرارة ، ولهذا فممكن اعتبار البنية السيراميكية دالة مع درجة الحرارة حيث يجب معرفة المدى الذي فيه تكون هذه الخواص ثابتة بارتفاع درجات الحرارة [٤٨] وهذا ما منطبق مع بحثنا وهناك بعض الخواص المتعلقة ببحثنا والتي يمكن استعراض قسمياً منها .

Fracture

١.٧.٢ الكسر

يحدث الكسر في الأجسام الصلبة تحت تأثير الإجهاد ويمكن إيجاز الكسر بمرحلتين

[٤٩] :

الأولى : مرحلة تكوين الشق (Crack Initiation) .

الثانية : مرحلة انتشار الشق (Crack Propagation) .

ويمكن تصنيف الكسر حسب الطاقة اللازمة للكسر إلى كسر هش وكسر مطيلي والكسر الهش يحتاج إلى طاقة قليلة في حين أن الكسر المطلي يحتاج إلى طاقة كسر عالية . في الكسر الهش لا يحدث أي تشوه دائمى لذا فمن المستحيل إعادة تركيب الأجزاء المكسورة .

Fracture Strength

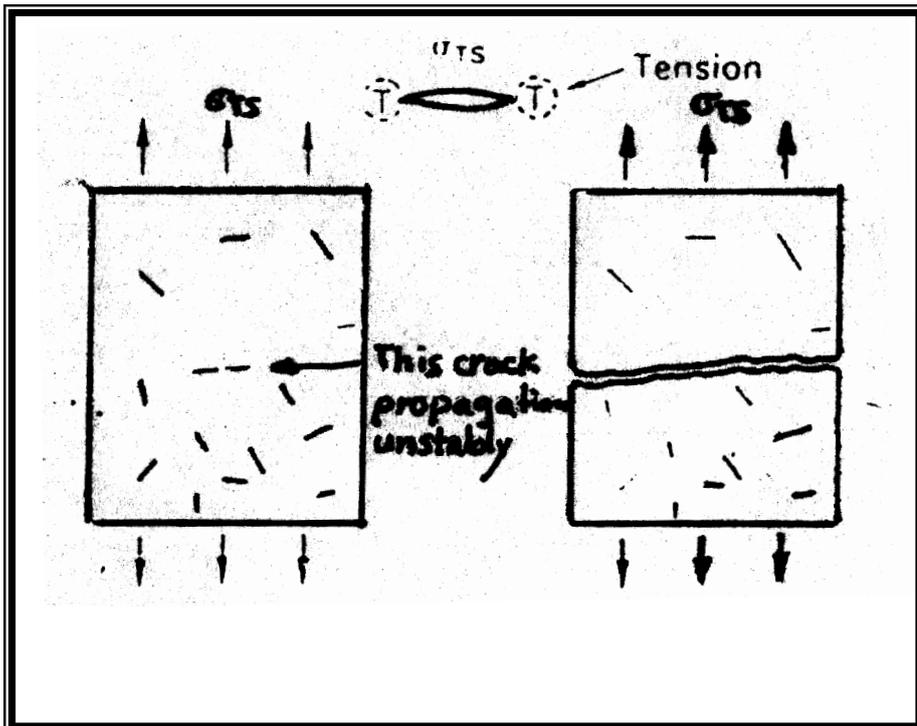
٢.٧.٢ مقاومة الكسر

سبق وأن ذكر بأن المواد السيراميكية هي مواد هشة وتكون قوية في حالة الانضغاط وضعيفة في حالة الشد والانحناء ولهذا فان مقاومة الانضغاط هو المعيار المعتمد بالنسبة إلى المواد السيراميكية حيث يظهر الكسر الهش في البداية على سطح النموذج وذلك بسبب الاجهادات المتكونة في العيوب الموجودة وبصورة مسبقة في المادة (شقوق ، ثقوب) ويتركز الإجهاد في هذه المناطق مؤدياً إلى حدوث كسر هش سريع (Catastrophic Failure) وحسب نظرية (Griffith) [١] . يمكن قياس مقاومة الكسر للمواد السيراميكية بالطرق الآتية:-

Tensile Strength

١.٢.٧.٢ مقاومة الشد

عند حساب مقاومة الشد يعرض النموذج إلى إجهاد محوري منتظم يزداد بالتدرج إلى أن يحدث الكسر ، وتقاس مقاومة الكسر في الشد البسيط من مقياس الإجهاد اللازم لجعل طول الشق في النموذج ينتشر بشكل سريع وغير مستقر والشكل (٢-١٣) يوضح قياس مقاومة الكسر باختبار الشد والمعادلة المستخدمة لحساب مقاومة الكسر هي [٤٨] :



الشكل (١٠-٢) يوضح قياس مقاومة الكسر [٤٨]

$$\sigma_{TS} = \frac{P}{A} \quad (٢ - ٥) \dots\dots\dots$$

حيث أن :

σ_{TS} : مقاومة الكسر (Mpa) .

A : مساحة المقطع العرضي (mm²) .

P : الحمل المسلط (N) .

يكون إجراء اختبار الشد للمواد السيراميكية صعباً بسبب :

- ١ . صعوبة تشغيل المواد السيراميكية لتصنيع النماذج الخاصة بالاختبار .
 - ٢ . الفكوك المستخدمة في تثبيت النموذج قد تؤدي إلى الفشل بسبب تركيز الاجهادات .
 - ٣ . حساسية المادة السيراميكية بتركيز الجهد .
- وتؤدي هذه الصعوبات إلى زيادة حدوث التشقق في المعلومات التي لا يمكن الاعتماد عليها عند التصميم وعند الحاجة الضرورية جداً لأجراء هذا الاختبار للمواد السيراميكية ولهذا يجب استخدام احتياطات للحصول على نتائج تقريبية كاستخدام وسائل مطاطية في فكوك مسطحة لتجنب كسر العينة داخل الفك أو الاستعاضة عن هذا الاختبار باختبار آخر أكثر دقة وملائمة وهو اختبار الانضغاط .

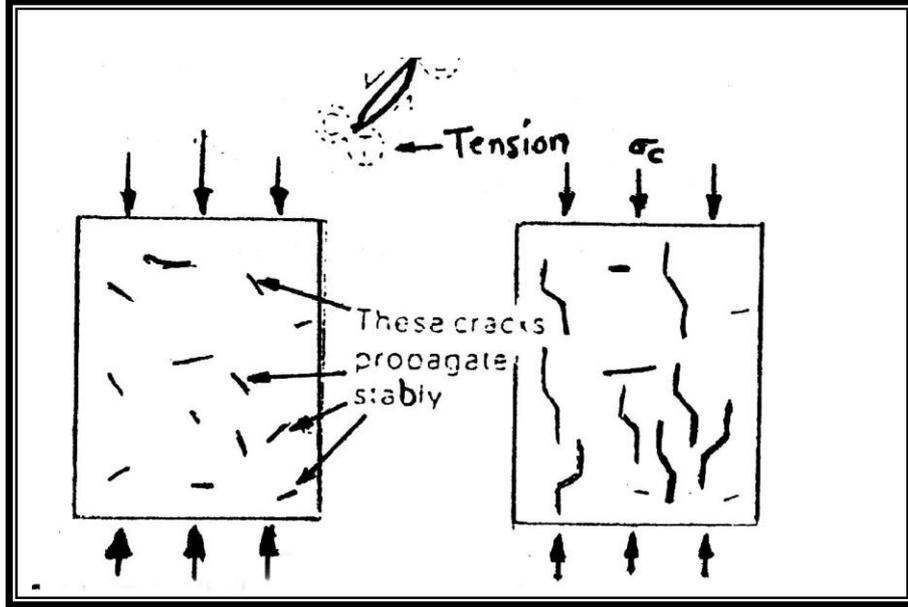
Compressive Strength

٧.٢.٢٢. مقاومة الانضغاط

وهو بصورة عامة أكثر ملائمة للمواد الهشة وللسيراميك بصورة خاصة حيث أن مقاومة الانضغاط تعادل (١٠ - ٨) مرة اكبر من مقاومه الشد وذلك بسبب العيوب الداخلية كما أن الشق في حالة الانضغاط ينتشر باستقرار وتتحرف الشقوق خارج اتجاهاتها الأصلية لتنتشر بموازية محور الانضغاط والكسر لا يحدث بسبب الانتشار السريع لشق واحد ولكن يحدث بسبب التمدد البطيء لعدد من الشقوق والتي تشكل منطقة التهشم (Crushed zone) والشكل (١١-٢) يوضح ذلك [١] :

وتستخدم نفس المعادلة (٥-٢) لاستخراج إجهاد التهشم (σ_c) حيث :

$$\text{MPa } \sigma_c = \frac{P}{A}$$



الشكل (١١-٢) يوضح قياس مقاومة الكسر باختبار الانضغاط [١]

Bending Strength

٣.٢.٧.٢ مقاومة الانحناء

إن اختبار الانحناء من أكثر الاختبارات المستخدمة للمواد السيراميكية وذلك لسهولة تحضير نماذج الاختبار . وتستخدم هذه الطريقة لحساب معامل التمزق ومعامل المرونة (Modulus of rapture and modulus of elasticity) بطريقه اختبار الانحناء ذي الثلاث نقاط أو أربعة نقاط . الشكل

(١٢-٢) يوضح ذلك والشكل (١٣-٢) يوضح توزيع الاجهادات [٥٠] . بحسب معامل التمزق للنماذج ذات المقطع المتوازي مستطيلات في اختبار الانحناء ذي النقاط الثلاثة من المعادلة التالية [٥] :

..... (٦ - ٢)

$$\sigma_{\max} = \frac{3PI}{2Bh^2}$$

حيث أن :

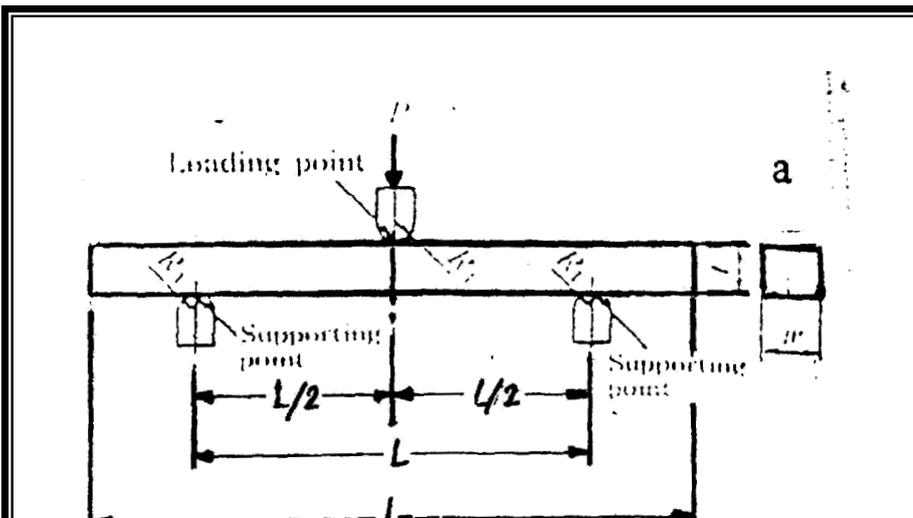
σ_{\max} : أقصى جهد تتحمله العينة .

l : المسافة بين المرتكزات (mm) .

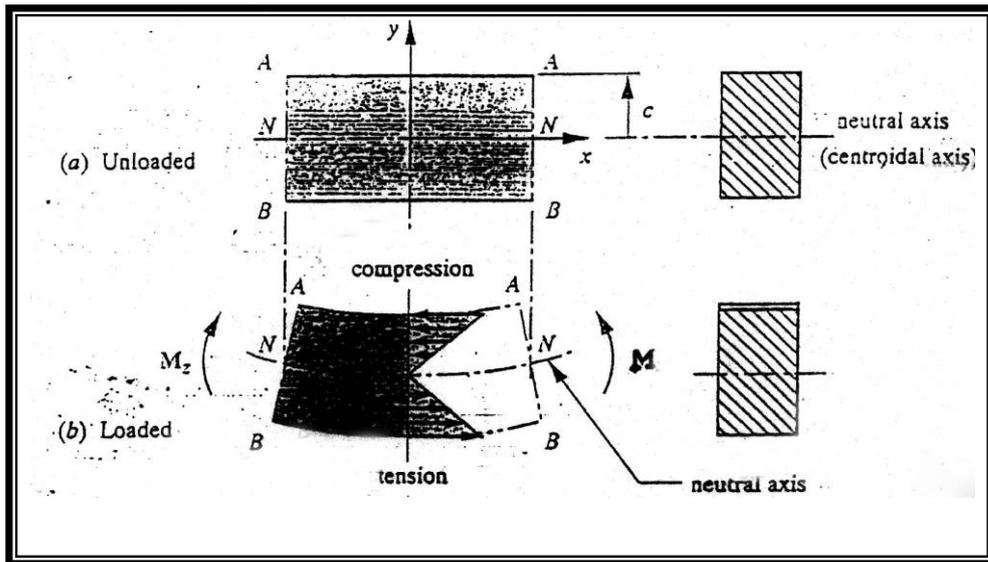
h : الارتفاع (mm) .

P : الحمل المسلط (N) .

B : عرض النموذج (mm) .



الشكل (٢-١٢) يوضح قياس مقاومة الانحناء ذي الثلاث نقاط [٥٠]



الشكل (٢-١٣) يوضح توزيع الاجهادات في اختبار الانحناء [٥٠]

٣.٧.٢ مقاومة الصدمة الحرارية (TSR) Thermal Shock resistance

كما هو معروف ان المواد السيراميكية عموماً مواد هشه وذات حساسية تأثر عالية للصدمة الحرارية . فعندما يتعرض النموذج السيراميكي الى تغير مفاجئ بدرجات الحرارة ، يحصل عندها انحدار حراري شديد الذي بدوره سوف يغير في حجم النموذج وبالتالي سوف تتولد اجهادات داخلية تسبب الانهيار المفاجئ . ان الجسم السيراميكي الذي يمتلك معامل تمدد ايجابي سوف يتعرض سطحه الى الانضغاط في حالة زيادة درجة الحرارة وهذا يتفق مع خاصية المادة السيراميكية في تحملها للاجهادات الانضغاطية ، وعلى العكس فعند تبريد النموذج السيراميكي المفاجئ ، فإن سطح النموذج سيتعرض الى اجهادات شد مسببة فشل النموذج وتكسره ، وهذا متفق مع قابلية المواد السيراميكية الضعيفة للاجهادات الشدية .

وبناء عليه فان المواد ذات التمدد الحراري القليل لها مقاومة صدمة حرارية عالية بسبب قلت الاجهادات المتولدة .

في البداية يتعرض السطح الخارجي إلى حرارة ويبدأ سريان الحرارة إلى الداخل وعبر طبقات المادة إلى المركز وهنا تلعب توصيلية المادة الحرارية (Thermal diffusivity (D) دوراً مهماً وكما يلي :

$$D = \frac{\lambda}{\rho * C}$$

حيث أن :

ρ : الكثافة (Density) .

C : الحرارة النوعية (Specific heat) .

λ : التوصيل الحراري (Thermal conductivity) .

وعلى هذا الأساس تكتب معادلة مقاومة الصدمة الحرارية كالآتي :

$$R = \frac{\sigma_F (1-\nu) D}{\alpha E}$$

حيث (ν) هو معامل بويسون (Poisson's ratio) .

وعلى هذا الأساس تعرف الصدمة الحرارية على أنها الجهد الذي يؤدي إلى الفشل عند تعرض المادة إلى مدى متغير من درجات الحرارة [٢٠] .

٢-٨ الخواص الكهربائية

Dielectric Materials

١.٨.٢ العوازل الكهربائية

العوازل هي مواد غير موصله تزداد أهمية في مجال الانتقال الإلكتروني المستمر بالحالة الصلبة ، حيث يتطلب تصميمها الثبات في التركيب عند انتقال السيل الإلكتروني خلال المادة وحسب الحاجة مما يحول بعدم حصول الفشل الذي قد يؤدي إلى خسارة مادية فاحشة في بعض الأحيان . فمثلاً نحن نفكر بتقليل حجم أجهزة الاتصال إلى حدود دنيا وجب علينا أن نفكر باستخدام مادة ذات عزل عالي لا تؤدي إلى حصول الفشل أثناء الاستخدام المتكرر وبنفس الوقت فهي ذات كفاءة عالية في الإرسال والاستقبال [٢] .

إنّ التطبيقات العملية لاستخدام العوازل كثيرة ومتعددة فهي تستخدم في محطات التوليد والمحطات الثانوية وكذلك في أبراج نقل القدرة الكهربائية كما أنها تستخدم في المفاعلات الذرية ومحولات نقل القدرة والأجزاء الكهربائية والبويلرات وكذلك في الدوائر الإلكترونية البسيطة منها والمعقدة [٥١] .

Dielectric Properties

٢.٨.٢ خواص العوازل

إن الأساس المعتمد في العوازل السيراميكية هو العناصر السعوية

(Capacitive elements) التي تستخدم في الدوائر الإلكترونية والعازلية الكهربائية وان معظم الخواص للعوازل يتعلق بما يسمى ثابت العزل (Dielectric constant) عامل الفقد للعازل (Dielectric loss factor) ومقاومة العازل (Dielectric strength) حيث أن العاملين الأول والثاني يتعلقان بالخواص الكهربائية في حين أن العامل الثالث يتعلق بالخواص الميكانيكية . وقد اخصت الدراسات الجديدة عوامل أخرى مقرونة بخواص العازل منها مدى التردد (Frequency range) كذلك المدى الذي تعمل فيه أي ظروف الجو المحيط (The range of enviromental) كذلك درجات الحرارة . عادة يتم تصنيع العوازل الكهربائية أما من مواد بلاستيكية عضوية أو مواد سيراميكية والأولى أرخص ثمناً وذات قابلية عالية على التشكيل وبأبعاد

دقيقة ومسيطر عليها أكثر من الثانية ولكن هنالك دواعي لاستخدام المواد السيراميكية في إنتاج عوازل ذات مواصفات خاصة كأن تكون مقاومه للزحف (Creep) أو مقاومة للأحمال العالية بدرجة حرارة الغرفة وكذلك مقاومة عالية إلى تغيرات ظروف المحيط (درجة الحرارة ، التأكسد ، التسامي ، التحلل) وكذلك القابلية على إنتاج سدادات محكمة للغازات لذلك عند الاستخدام المتكرر للعازل يجب ملاحظة عدد من العوامل الأساسية وخصوصاً عندما يعمل العازل في ظروف المناخ الجوية حيث يجب أن يقاوم عوامل التمدد الحراري (Thermal expansion) مقاوم للاجهادات الحرارية وكذلك الصدمة (Impact) بالإضافة إلى القابلية العالية للتشكيل بأشكال متعددة وبانهاءات عالية [٢] .

٣.٨.٢ الظواهر الكهربائية Electrical Phenomena

نحاول في هذا المقطع أن نعرف خواص العازل من خلال التطبيقات المهمة للعوازل السيراميكية حيث تتضمن ثابت العزل (Dielectric constant) عامل الفقد للعازل (Dielectric loss factor) مقاومة العازل الميكانيكية (Dielectric strength) مقاومة العازل الكهربائية (Dielectric resistivity) بحيث يكون من الضروري أن نعرف مهندسين الكهرباء مزايا السيراميك الذي تجعله أن يكون مؤهلاً في استخدامه بالعوازل وهذه الحقائق سيجري تطبيقها عملياً من دون اللجوء إلى استخدام المعادلات الرياضية المعقدة والمطبقة في دوائر التصميم . بل أن الصياغات والمعادلات تشير إلى التفسير والتقييم الرياضي الذي يعبر عن الاستخدام الأمثل وفق الخواص المحددة للمادة الذي يلعب فيه التركيب البلوري (Crystal structure) والتركيب المجهري (Micro structure) والتركيب الزجاجي (Glass structure) دوراً كبيراً فيه [٢] .

Polarization

١.٣.٨.٢ الاستقطاب

إذا ما سلط جهد كهربائي على مادة فان ذرات المادة سوف تتأين بحيث تصبح الذرة القريبة من الشحنة السالبة أيوناً موجباً والذرة القريبة من الشحنة الموجبة أيوناً سالباً وتسمى كل من هذه الايونات دايبولاً (Dipoles) وهذه الايونات سوف تنفصل عن بعضها تاركة مسافة صغيرة بين كل واحد منها (r) ونتيجة لتباين الشحنات بينها فان هناك قوة ستتولد بينها مولدة عزماً يدعى عزم ثنائي القطب ويمكن التعبير عنه رياضياً كالآتي :-

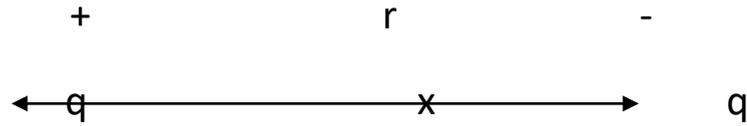
$$P=q*r$$

حيث ان :-

P : عزم ثنائي القطب (كولوم . متر)

q : قيمة الشحنة (كولوم)

r : المسافة بين الشحنتين (متر)



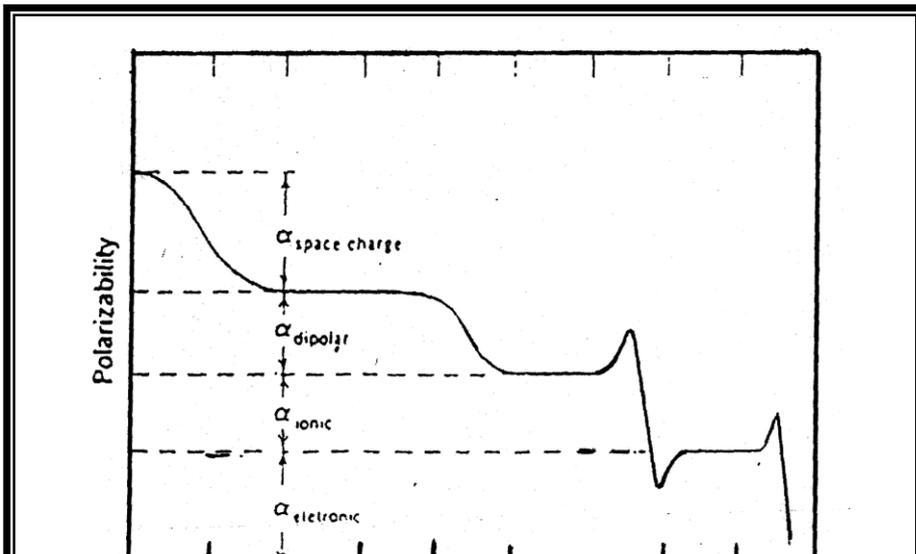
$$P = q \times r$$

ان عزم ثنائي القطب في وحدة الحجم يدعى بالاستقطاب (Polarization) فاذا رمزنا لعزم ثنائي القطب بالرمز "P" ، وحجم العازل "V" ، فيكون الاستقطاب :-

$$Polarization = \frac{P}{V} = \frac{C.M}{M^3} = \frac{C}{M^2}$$

وان المادة التي يبدو فيها الاستقطاب واضحاً تسمى عازلاً (Dielectric) إن عملية الاستقطاب في العوازل تحصل بسبب بعض العيوب في الشبكة أو الجزيئات أو الايونات أو الذرات [٥٢] .

وهناك أربعة آليات لوصف عملية الاستقطاب ضمن الطيف الترددي الممتد من التردد الصفري إلى التردد المطابق لأشعة كاما والشكل (٢-١٤) يوضح ذلك .



الشكل (٢-١٤) يوضح الآليات المساهمة في الاستقطابية [٥٢]

أولاً : الاستقطاب الإلكتروني Electronic Polarization

وهو يحدث في مدى ترددات عالية مسبباً تشوهاً في الذرة وبالذات في توزيع الشحنات حيث يؤدي إلى إزاحة الإلكترونات بالاتجاه المعاكس في حين تبقى الذرة في مكانها [٥٧] وهذا النوع من الاستقطاب لا يعتمد على درجة الحرارة ويسمى بالاستقطاب البصري لأنه يحدث عند الترددات البصرية أو الأشعة فوق البنفسجية .

ثانياً: الاستقطاب الأيوني Ionic Polarization

وهي آلية استقطاب تحصل عند الترددات دون المنطقة تحت الحمراء والتي ترددها أقل من (10^{14} Hz) وينشأ من انتقال الأيونات الموجبة والسالبة خلال الشبكة البلورية مسبباً تغير طول الأواصر الأيونية عن طريق إزاحة الأيون الموجب إلى اليمين باتجاه المجال والأيون السالب إلى اليسار . ونتيجة لذلك يتكون عزم ثنائي القطب جديد في الجزيئة ولا يعتمد على درجة الحرارة ويحصل ضمن تردد واطئ ويتولد بسبب إجهاد إلكتروني يتولد في مركب كيميائي ذي صفة أيونية .

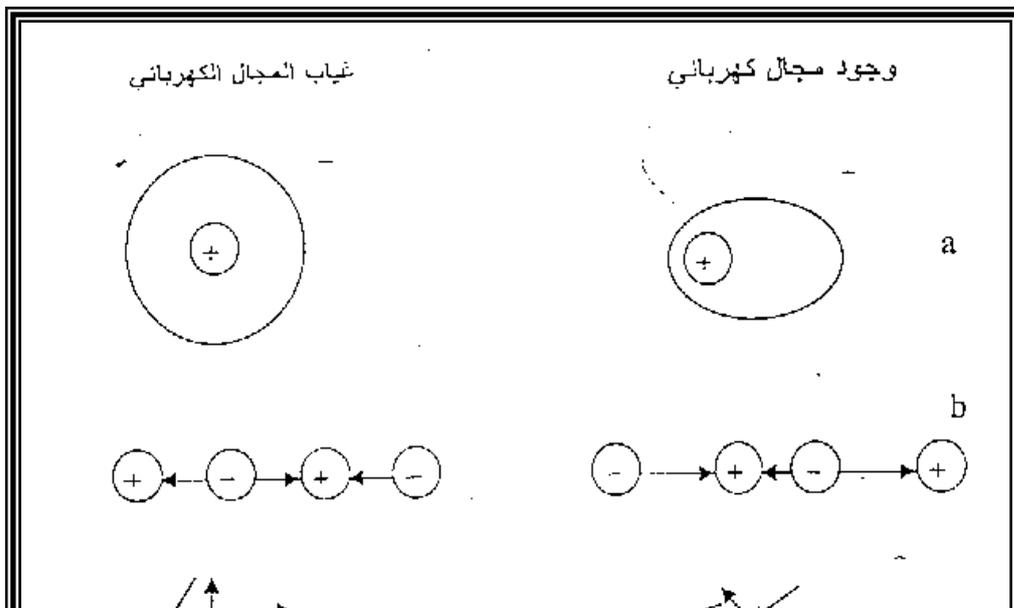
ثالثاً: الاستقطاب الاتجاهي Orientational Polarization

هناك بعض المواد تمتلك عزمًا ثنائي قطب دائم حتى في حالة عدم وجود المجال الكهربائي الخارجي وتعرف (بالمواد الثنائية القطب) (Polar Molecules) أو الجزيئات القطبية ، وطبيعة هذه المواد تكون جزيئاتها المنفردة تمتلك عزمًا دائمًا لذلك فإن صافي العزوم الجزيئية تكون عشوائية الاتجاه مما يؤدي إلى إلغاء بعضها البعض [٥٤] وعند تعرضها إلى مجال كهربائي خارجي فإن ثنائيات القطب ستميل باتجاه المجال . وفي هذا النوع من الاستقطاب تكون زيادة درجات الحرارة تزيد من صعوبة التحكم في توجيه الجزيئات لذلك فإنه يعتمد بشكل كبير على درجات الحرارة .

رابعاً : الاستقطاب البيئي أو استقطاب الشحنة الفراغية

Interfacial or Space Charge Polarization

وينشأ هذا الاستقطاب عن تجمع الشحنات عند تقاطع اوجه البلورات للمادة المتعددة البلورات او من هجرة حاملات الشحنات ، وذلك نتيجة لاحتواء بعض بلورات المواد على عيوب [٥٣] التي قد تكون بشكل ذرات ثنائية أو فراغات في البلورة أو فقاعات هوائية في سائل أو مناطق غير متجانسة من المادة . وقد تخلل المادة حواجز تنجم عن هذه العيوب ، أو قد تكون الحواجز ناجمة من وجود شقوق ، وعند تعرض هذه الشوائب إلى مجال كهربائي خارجي سيمكنها ذلك من الانتقال خلال البلورة كونها تملك شحنة مما يجعلها سهلة الاصطياد من قبل العيوب الأخرى أو أنها تتراكم عند هذه العيوب وبالتالي فإنها تؤدي إلى خلق تراكم محلي للشحنات الذي يعمل على حث الشحنات في الجهة الأخرى المعاكسة مؤدية بذلك إلى نشوء ثنائيات قطبية في المادة وهذه الثنائيات سوف لا تقتصر على ذرة واحدة أو جزيئة بل تمتد ضمن مناطق كبيرة ويجب أن نشير هنا إلى أن هذا النوع من الاستقطاب يعتمد على مقدار التجانس في المادة ، ونسبة خلوها من العيوب البلورية بخلاف الأنواع الأخرى من الاستقطاب التي تعتمد على التركيب الكيميائي ومكوناتها . يحدث هذا النوع من الاستقطاب في مدى واطى من الترددات دون السمعية الشكل (٢-١٥) يوضح أنواع الاستقطاب الأربعة .



الشكل (٢-١٥) يوضح نوع الاستقطاب الأربعة [٥٣]

Dielectric Capacitance

٢.٣.٨.٣ سعة العازل

إن معظم التخصصات الهندسية تختص بدراسة العلاقة ما بين مادة العازل إلى سعته ونعني بالسعة هنا القابلية على خزن الشحنات الكهربائية التي يخزنها العازل (Q) والتي تعطى بالعلاقة التالية [٢] .

$$Q = CV \quad \dots\dots\dots(٧-٢)$$

حيث أن (V) الفولتية المطبقة ، (C) السعة ، والفولتية المسلطة تتناسب مباشرة مع معدل الشحنة المخزونة والتي تساوي التيار المار خلال العازل حيث يعطى :

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{\int I dt}{C} \Rightarrow I = C \frac{dV}{dt}$$

عند استخدام دوائر التيار المتناوب (Ac Circuit) وعندما تكون الفولتية جيبيية (Sinusoidal Voltage) أي :

$$V = V_0 \exp i\omega t \quad \dots\dots\dots (٨-٢)$$

في دوائر التيار المتناوب (Ac Circuit) يكون تغير التيار كالاتي :

$$I_c = i\omega CV \quad \dots\dots\dots (٩-٢)$$

إن فرق الطور بين الفولطية والتيار يساوي (٩٠) والتي تشير لها المعادلة (٩-٢) حيث أن ($i = \sqrt{-1}$) ، ($\omega = 2\pi f$) حيث أن (f) يساوي التردد الذي يساوي دورة بالثانية .

إن سعة المتسع لها علاقة بعاملين احدهما هندسي والآخر يتعلق بمادة العازل فالعوازل الصفائحية ذات مساحة (A) وسمك (d) تحتسب السعة لها كالاتي :

$$C_0 = \frac{A}{d} \epsilon_0 \quad \dots\dots\dots (١٠ - ٢)$$

حيث ان :-

C : سعة العازل عندما يكون بين لوحيه الهواء

(ϵ_0) هي سماحية العازل (Permittivity) أو ثابت العزل

في الفراغ وقيمته تساوي (8.854×10^{-12} F/m) [٦٠] إذا كان العازل المستخدم بين لوحى المتسع هو السيراميك فان سماحية العازل (ϵ) (ثابت العزل) وان سعة العازل تعطى بالعلاقة التالية :

$$C = C_0 \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} = C_0 K' \quad \dots\dots\dots (١١ - ٢)$$

حيث (K') يسمى بنسبة السماحية أو نسبة ثابت العزل للمادة إلى ثابت العزل بالفراغ ، وهي خاصية المادة التي تحدد السعة عندما يستخدم عازل من المادة سيراميكية وعند تعويض (١٠-٢) في المعادلة (١١-٢) ينتج :

$$(١٢-٢) \text{-----} C_p = \frac{A \cdot \epsilon'}{d \cdot \epsilon_0}$$

وعند استخراج (ϵ') ينتج :

$$(١٣-٢) \text{-----} \epsilon' = \frac{C_p \cdot d}{A \cdot \epsilon_0}$$

٣.٣.٨.٢ سماحية العازل (ϵ) Dielectric Constant or Permittivity

هو النسبة بين الطاقة المخزونة إلى الطاقة المخزونة في الهواء الذي يحتل نفس الحجم . وهي تقاس بالقابلية على خزن الكهرباء أو المتسعة (Capacitance) إن سماحية العازل تتغير بتغير درجات الحرارة [٥١] . أو هي النسبة بين سعة العازل الصلب الموضوع بين لوحين موصولين إلى السعة التي يشغلها الفراغ بين نفس اللوحين وهي يعتمد على الكثافة (كثافة المادة الصلبة Density) الترتيب الجزيئي (Molecular arrangement) قابلية استقطاب الجزيئات (Polarization) (of the molecules) [٥١] .

Loss Angle

٤.٣.٨.٢ زاوية الفقد

إن العوازل التي يمر خلالها تيار كهربائي وفولتية ، فإن زاوية الطور التي تكون بينهما (θ) والتي تكون قيمتها (٩٠°) فما يفقد من هذه القيمة (٩٠°)

خلال العازل يعرف بزاوية الفقد (δ) حيث أنها تساوي الفرق بين (٩٠°) وزاوية الطور خلال العازل أي :

$$\delta = ٩٠^\circ - \theta$$

وان قيمة (δ) للمواد السيراميكية عادة أقل من (٥°) [٩] .

٥.٣.٨.٢ عامل الفقد

Loss Factor

هو العامل الناتج من حاصل ضرب نفاذية العازل (*) ظل زاوية الفقد أي :

$$\tan \delta * \text{Loss factor} = \varepsilon$$

$$\text{When } \delta < 90^\circ \Rightarrow \text{L. F.} = \varepsilon * \sin \delta \text{ or } \text{L.F.} = \varepsilon * \text{P.F}$$

حيث (P.F) هو عامل القدرة "power Factor"

عامل الفقد يستخدم في تدرج العوازل ذات الترددات العالية ، وان هذه الخاصية مهمة في الاعتبار بالعوازل ذات الترددات ودرجات الحرارة العالية ، حيث أن القيمة للتردد عادة تزيد على واحد .

والفقد في الطاقة الكهربائية (N) يعطى بالمعادلة التالية :

$$N = E^2 * 2\pi C * F \tan \delta \quad \dots\dots\dots (١٤-٢)$$

حيث أن :

(E) : مقدار الجهد (Potential) .

(F) : التردد (Frequency) .

(C) : السعة (Capacitance) .

والسعة (C) تعطى بحاصل ضرب السماحية الكهربائية للعازل (ε) بالثابت (K) الذي يعتمد على شكل وموقع المجال للعازل وعند التعويض بالمعادلة (١٤-٢) ينتج :

$$N = (E^2 * 2\pi F K) * \varepsilon \tan \delta \quad \dots\dots\dots (١٥-٢)$$

٦.٣.٨.٢ انهيار العازل ، كسر العازلية

Break down strength or dielectric break down

من أهم الصفات التي يجب أن تؤخذ بنظر الاعتبار عند اختيار العازل هو مدى تحمل العازل للإجهاد الكهربائي دون أن ينهار . والانهيار يعني فقدان العازل خاصية العزل وتحوله إلى موصل . وقد يسمى أقصى مجال كهربائي مطبق على العازل دون حصول الانهيار بمتانة العازل (Dielectric strength) [٣٤] وهي تقاس بدلالة المجال الكهربائي المسلط أي الجهد الذي عنده ينهار العازل فان :

$$E_{br} = \frac{U_{br}}{h} \text{ (Volt / m or KV / mm)} \text{ ---- (١٦-٢)}$$

حيث :-

E_{br} : المجال الكهربائي المسلط

U_{br} : الجهد الذي عنده انهار العازل

h : سمك النموذج

وتعتمد متانة العازل على كثير من العوامل منها ما يتعلق بتركيب العازل مثل التركيب البلوري والعيوب والشوائب الموجودة فيها ، وعوامل خارجية مثل الشكل الأقطاب التي تستخدم في تسليط الجهد الكهربائي ، وطبيعة السطح الخارجي وظروف القياس من درجة الحرارة والرطوبة وتردد المصدر والفترة الزمنية عند تطبيق الفولتية على العازل .

إن حدوث الانهيار يعني ظهور شحنات متحركة داخل المادة باستطاعتها الانتقال خلال المادة من طرف إلى آخر ويكون مصدر هذه الشحنات إما من داخل المادة وذلك نتيجة تحررها من مستقراتها بفعل الطاقة المكتسبة نتيجة المجال الكهربائي المسلط . أو قد تكون ناتجة عن انتقال الشحنات من القطب المعدني إلى داخل العازل وتمكنها من اجتيازه .

في بداية تسليط الجهد العالي يكون عدد الشحنات قليلاً والذي قد يتضاعف نتيجة انتقال الطاقة إلى شحنات أخرى 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 [٥٥] .

هناك ظواهر عدة تحدث في العازل عند تأثير المجال الكهربائي مثل التوصيل الكهربائي ، الاستقطاب ، الفقدان العزلي فزيادة الفولتية على العازل تؤدي إلى زيادة تيار التسرب والتيار السعوي للفولتية المتناوبة وعند الاستمرار بزيادة الفولتية المطبقة إلى أن تصل إلى أعظم قيمة لها في حالة انهيار العازل عند هذه اللحظة يمر تيار التوصيل خلال

العازل بصورة متزايدة. بعدها تبدأ الفولتية بالتناقص بسبب تناقص مقاومة العازل إن هذه التوصيلية غالباً ما تمثل دائرة قصر بين أقطاب المصدر [٥٦].

إنّ مقدرة مصدر الطاقة الكهربائية ونوعية أقطابه (مصدر شراري أو قوس كهربائي) على إحداث حالة حرق العازل وصهره وشقه بين الأقطاب يعتمد على شكل الأقطاب وتكون هيئة الانهيار على شكل ثقب منصهر أو فسحة محترقة ونافذة بشكل غير منتظم وإذا طبقت الفولتية على نفس الثقب الذي حصل فيه الانهيار فإن الانهيار للحالة الجديدة يحصل عند فولتية أدنى من السابقة [٥٧].

هناك نوعان من الانهيار في العوازل الصلبة هما الانهيار الكهربائي والانهيار الكهروحراري .

أ. الانهيار الكهربائي

يدعى هذا الانهيار في بعض الأحيان (جهد الانهيار الكهربائي النقي) لتمييزه من بين أنواع الانهيارات في العازل ويتسبب هذا الانهيار من تأثير المجال الكهربائي فقط وتدمير العازل بواسطة القوى التي يؤثرها هذا المجال الكهربائي وهو يتميز بالميزات الآتية [٥٥] .

١. الزمن قصير جداً (أحيانا يصل إلى المايكروثانية) لتزايد الفولتية ويحدث الانهيار حالاً بعد تطبيق الفولتية عندها يسمى الانهيار الكهربائي النقي .
٢. الاعتماد الواطئ والقليل لجهد الانهيار (U_{br}) ومتانة العزل مع تردد الفولتية .
٣. الاعتماد القليل لمتانة العازل على درجة الحرارة في بعض الأحيان اعتماد (E_{br}) على درجة الحرارة يأخذ اعتدالاً لمدى كبير من درجة الحرارة .
٤. عند تأثير مجال كهربائي منتظم على العازل فان اعتماد متانة العزل على أبعاد العازل وأقطابه يكون قليلاً .

ب. الانهيار الكهروحراري

ترتبط ظاهرة الانهيار الكهروحراري مباشرة بعملية فقدان في العازل على شكل حرارة نتيجة وضع العازل تحت تأثير مجال كهربائي وهو يحدث كما يأتي :

فولتية مطبقة على العازل تؤدي إلى انطلاق حرارة من العازل نتيجة الفقد ويزداد الفقد بزيادة درجة الحرارة ثم يظهر تأثير الانصهار والاحتراق والاختراق والتشقق في العازل . إن أفضل نظرية لآلية الانهيار الكهروحراري طورها (Semenov and Fok) [٥٦] .

عند تأثير فولتية متناوبة على العازل وتم التوصل إلى العلاقة التالية :

$$U_{br} = 382 \left[\frac{\lambda}{f \varepsilon_i K \tan \delta_i} \right]^{\frac{1}{2}} \phi(Bh) \quad (١٧ - ٢) \dots\dots\dots$$

حيث أن :

U_{br} : فولتية الانهيار (القيمة المؤثرة) (Kv)

λ : معامل التوصيل الحراري للعازل (w / m.k)

f : تردد الفولتية .

δ_i , ϵ_i : سماحية وزاوية الفقد عند درجة الحرارة الابتدائية قبل تطبيق الفولتية على العازل .

K : المعامل الحراري لمعامل الفقد العزلي .

h : سمك العازل .

B : معامل يصف شرط استرجاع الحرارة من العازل إلى الوسط المحيط.

على الرغم من صعوبة تحقيق العلاقة (٢٣-٢) عملياً لكثرة المعاملات التي يعتمد عليها الانهيار وتحتاج إلى مواصفات خاصة بأبعاد العازل وأقطاب التوصيل المستخدمة إلا أنها توضح مجموعة معاملات يعتمد عليها جهد الانهيار وكيفية التغير معها فمثلاً اعتماد (U_{br}) على التردد نحصل عليه على فرض أن كل المقادير ما عدا (f) في الطرف الأيمن من العلاقة (٢٣-٢) هي ثوابت أي أن :

$$U_{br} = A / \sqrt{f}$$

حيث أن :

A : ثابت .

الفصل الثالث

الجزء العملي

في هذا الفصل ، سيتم التعرّف الخطوات التي أتبع في تهيئة المواد للحصول على الأجسام السيراميكية . كما سيتم التطرق إلى إجمالي الفحوصات الميكانيكية ، الفيزيائية والكهربائية التي أجريت على الأجسام السيراميكية لمعرفة خواصها وتحديد هويتها .

المخطط A أدناه يوضح المسلك التكنولوجي الذي أتبع لتصنيع النماذج ، كما يوضح بعض الاختبارات التي أجريت عليها للوصول إلى أفضل النتائج بالنسبة للعوازل السيراميكية للخزف الحجري "Stoneware" .

كما يوضح المخطط "B" المسلك التكنولوجي الذي اتبع في تصنيع النماذج وبعض الاختبارات التي أجريت عليها للوصول إلى أفضل النتائج بالنسبة للخزف الصيني "Porcelain" .

مخطط B

كاؤولين + فلدسبار + سليكا

تحليل معدني وكيميائي

خاط

تشكيل شبه جاف

مخطط A

كروك + مادة رابطة

تحليل معدني وكيميائي

طحن وتفقيت

تصنيف حجمي

خاط

تشكيل شبه جاف

تلييد

اختبار ضغط

اختبار الانحناء

صدمة حرارية

اختبار كهربائي

٢-٣ اختيار المواد الأولية

Kaoline

١.٢.٣ الكاؤولين

استخدم خام الكاؤولين الأبيض من ترسبات منطقة (دويخلة) الواقعة في محافظة الأنبار ، والجدول رقم (٣ - ١) المبين لاحقاً ، يوضح نتائج التحليل الكيماوي للكاؤولين المستخدم ، كما يوضح الشكل (٣ - ١) تحليل الأطوار لهذا الخام ، والتي أظهرتها نتائج التحليل الطيفي باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية .

Silica

٢.٢.٣ السليكا

استخدمت رمال السليكا من ترسبات منطقة ارضمة ، التي تم تجهيزها من قبل معمل الزجاج إلى شركة المسح الجيولوجي والتعدين العامة ، والجدول (٣ - ٢) يوضح نتائج التحليل الكيماوي للخام المستخدم ، كما يوضح الشكل (٣ - ٣) تحليل الأطوار لخام السليكا المستخدمة .

Feldspar

٣.٢.٣ خام الفلدسبار

استخدم خام الفلدسبار المجهز من قبل إحدى الشركات المحلية كمواد مضافة ، والجدول (٣ - ٣) يوضح نتائج التحليل الكيماوي للفلدسبار ، كما يوضح الشكل (٣ - ٤) تحليل الأطوار لخام الفلدسبار المستخدم . علماً أن التحليل الكيماوي وتحليل الأشعة السينية قد تمّ في شركة المسح الجيولوجي والتعدين العراقية ولجميع الخامات ، بجهاز من نوع (Philips) ذي خام هدف مصنوع من النحاس بطول موجي ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) (Cu Ka) ، وفلتر من النيكل (Ni) ، ومدى زاوية الفحص ($2\theta = 60^\circ - 20^\circ$) .

من خلال ملاحظة الأشكال (٣-١ ، ٣-٢ ، ٣-٣ ، ٣-٤) ، والتي تمثل العلاقة البيانية بين شدة الشعاع الساقط (I) وزاوية الحيود (2θ) ، يتم إيجاد قيمة (d) ،

والتي تمثل المسافة بين المستويات الذرية ، وذلك من خلال تطبيق معادلة براك ، والتي تمّ التطرق لها سابقاً ، وكما يأتي :

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

حيث أن :

$$n = 1, \quad \lambda = 1.0404 \text{ \AA}$$

يتم إيجاد قيم (d) لجميع القمم (Peaks) ، بعدها يتم الدخول إلى بطاقات (ASTM) القياسية ، والتي عن طريقها يتم تحديد الأطوار .

٤.٢.٣ تهيئة الكاؤولين المحروق مسبقاً Grog

لقد تمّ حرق كمية من الكاؤولين (Kaoline) مقدارها (٣ Kg) بدرجة حرارة (١٢٥٠°C) ولمدة ساعتين ، بعدها تمّ الحصول على مادة متصلبة شبيهة بالحصى متكتلة تسمى الكروك (Grog) ، وقد تم الكشف عنها بالأشعة السينية ، إذ ظهر مخطط تحليل الأطوار بالشكل (٢-٣) ، إذ يلاحظ من الشكل بأن الأطوار التي ظهرت تختلف عن تلك التي ظهرت لمخطط أطوار الكاؤولين ، حيث أعطت أطواراً هي المولايت والكريستوبلايت ، والأول هو مركب وسطي للألومينا في السليكا ، بينما الثاني هو طور من أطوار السليكا . إنّ الكاؤولين المحروق مسبقاً يمنح المادة السيراميكية هيكلية ثابتة عند الحرق ، إذ تتحول مادة الكاؤولين إلى مركبات نهائية لا يحدث فيها تغيرات خلال عملية الحرق مثل المولايت والكريستوبلايت .

الجدول (٣ - ١) التحليل الكيماوي لخام الكاولين

Oxides	Wt %
SiO _٢	٥١.١٦
Al _٢ O _٣	٣٣.٣٢
Fe _٢ O _٣	١.١٧
Na _٢ O	٠.٤١
K _٢ O	٠.٤
MgO	٠.٤١
CaO	٠.٢٣

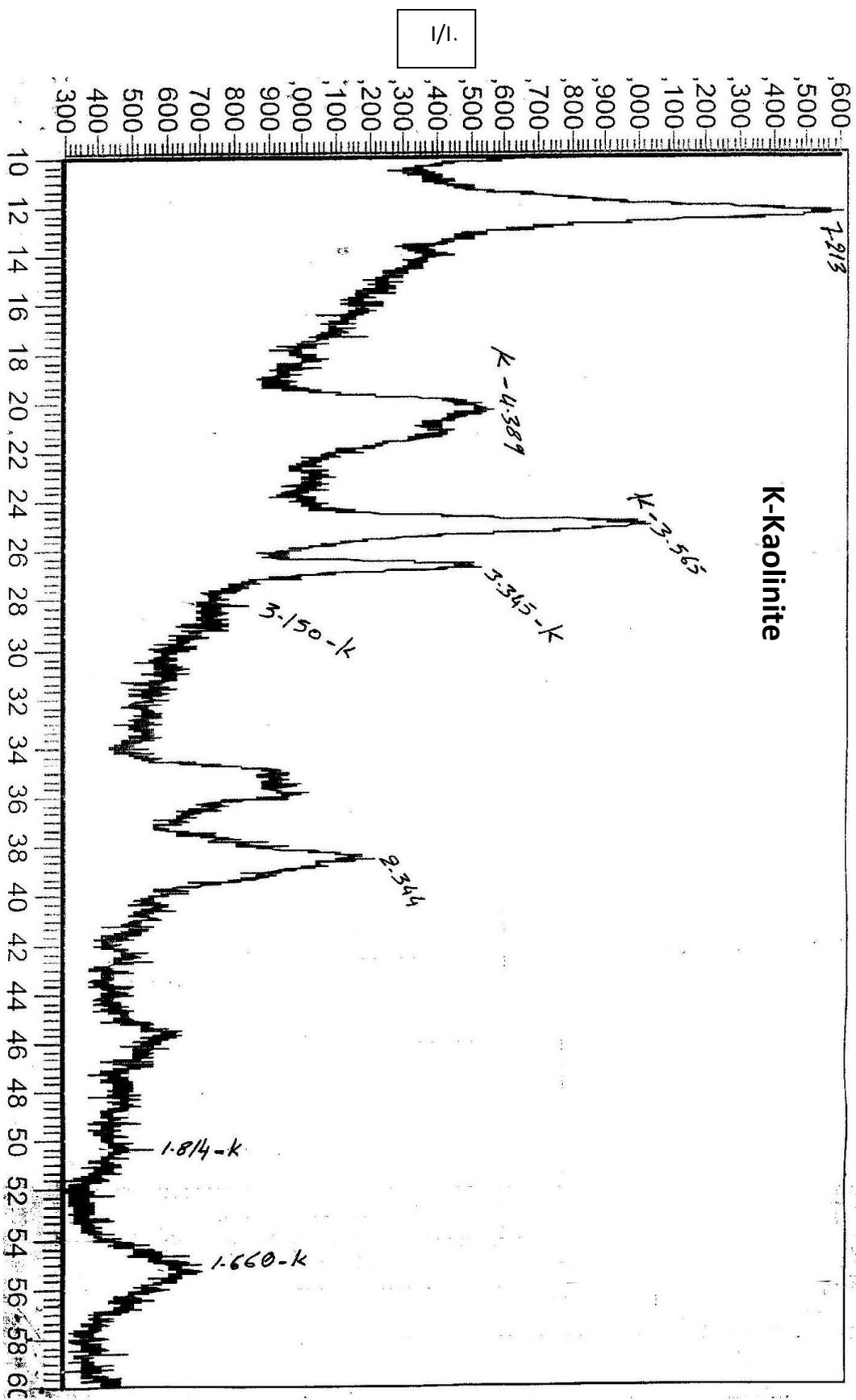
L.O.I = ١٣%

الجدول (٣ - ٢) التحليل الكيماوي لخام السليكا

Oxides	Wt %
SiO _٢	٩٨.٤
Al _٢ O _٣	٠.٤
Fe _٢ O _٣	٠.٠٥
MgO	٠.٣
CaO	٠.٣

الجدول (٣ - ٣) التحليل الكيماوي لخام الفلدسبار

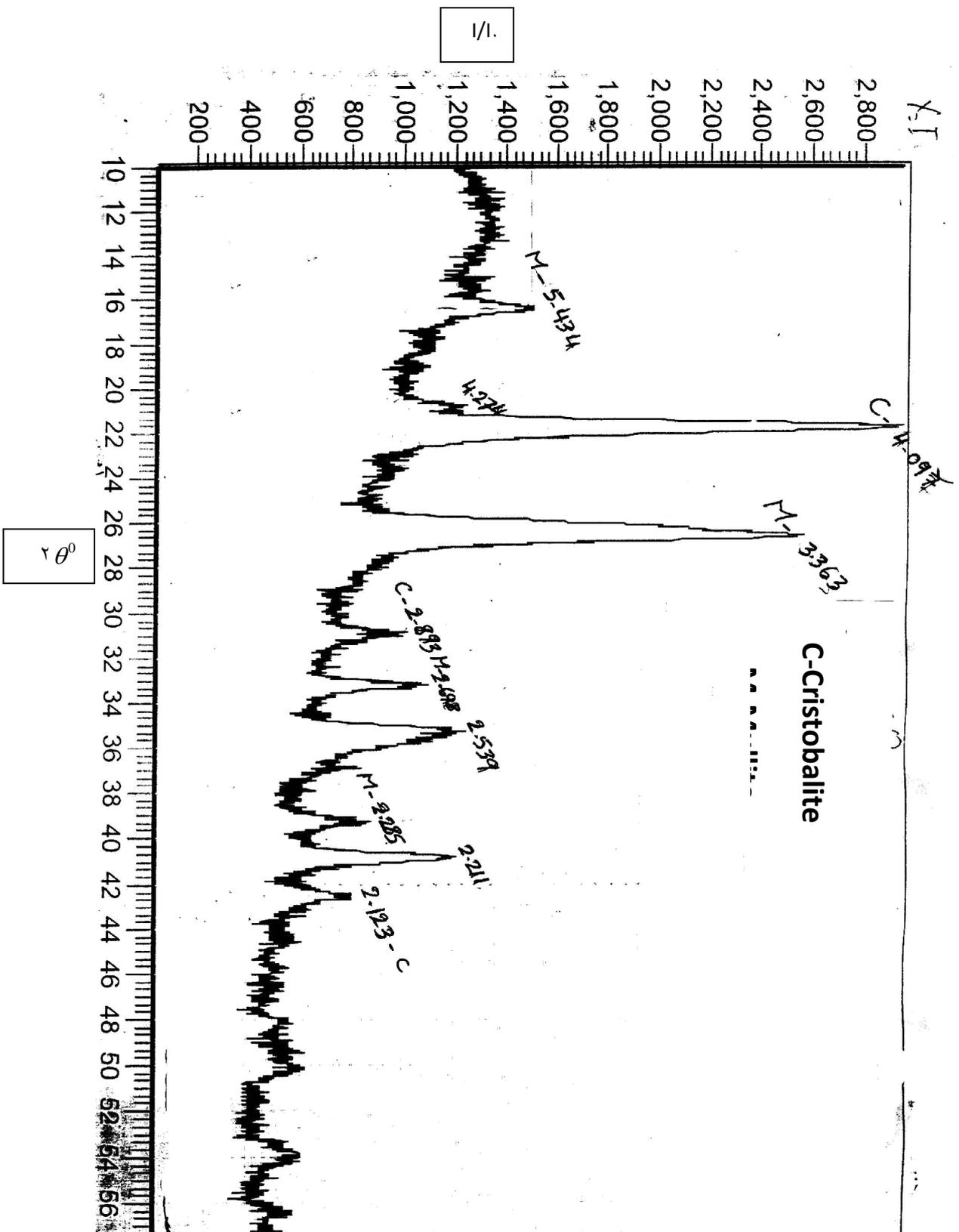
Oxides	Wt %
SiO _٢	٦٦.٢٧
Al _٢ O _٣	١٧.٩٤
Na _٢ O	٢.٥٦
K _٢ O	١١.١٦
CaO	٠.٥٦



I

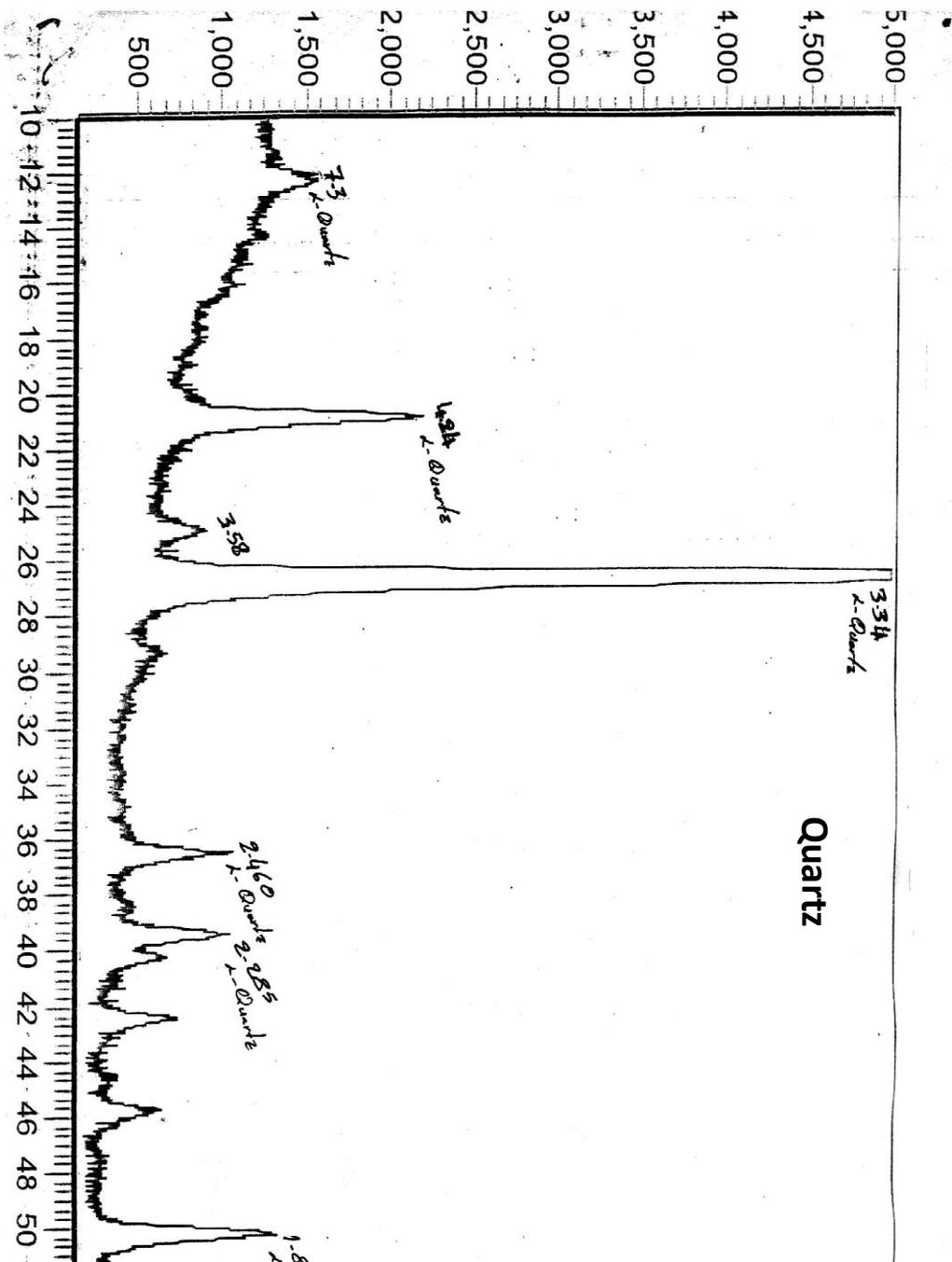
2θ

الشكل (١-٣) يوضح النتائج التي اظهرها تحليل حيود الاشعة السينية لخام الكاؤولين



الشكل (٢-٣) يبين نتائج تحليل حيود الأشعة السينية إلى الكروك

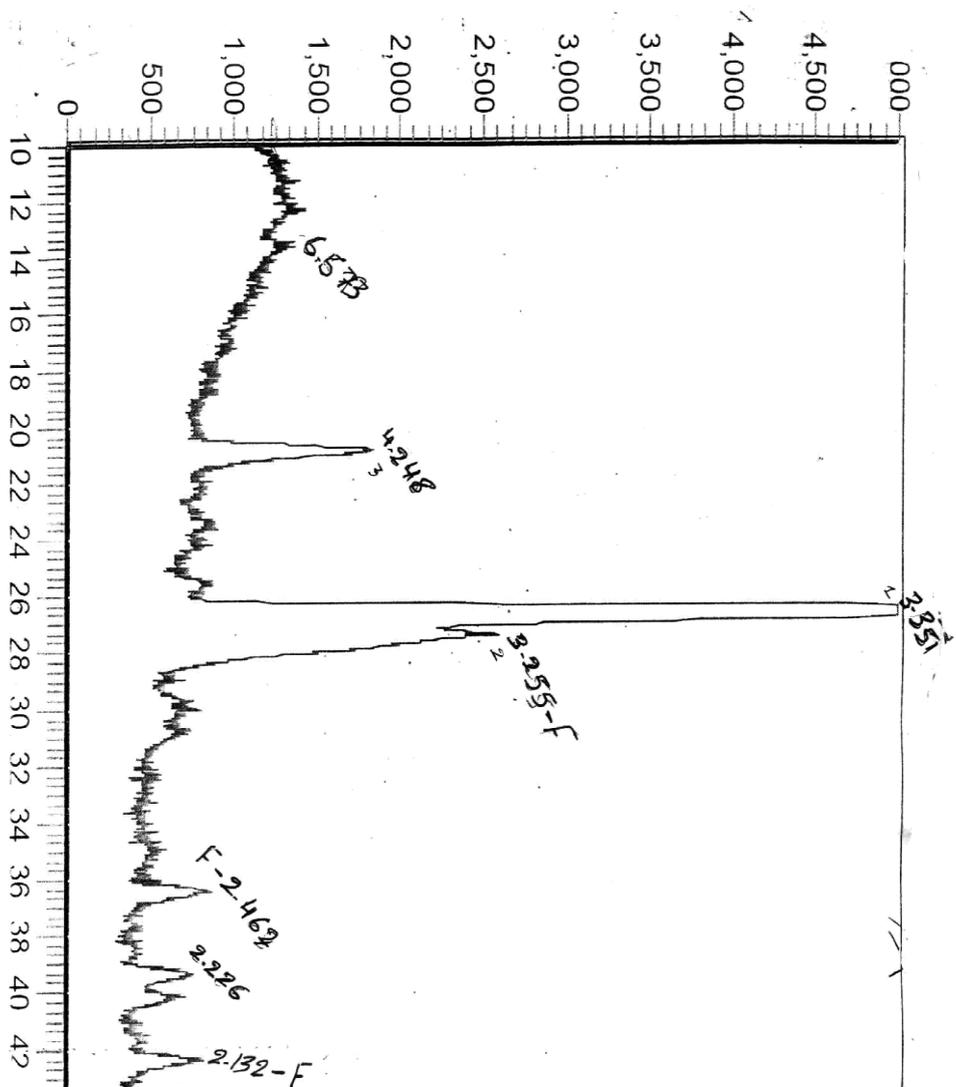
1/1.



$2\theta^\circ$

الشكل (٣-٣) يوضح النتائج التي اظهرها تحليل قيود الاشعة السينية للسليكا

1/1.



$2\theta^\circ$

الشكل (٤-٣) يوضح النتائج التي اظهرها تحليل حيود الاشعة السينية لخام الفلدسبار

٣-٣ تهيئة المواد الأولية

تتضمن هذه المرحلة تهيئة المكونات الأساسية للمواد الأولية من خلال السيطرة على حجم الدقائق والنسب مع خلطها للحصول على المزيج الأساسي .

Crushing Raw Material

١.٣.٣ طحن المواد الأولية

بعد أن تمّ حرق الكاؤولين ، تمّ الحصول على ما يسمى بالـ (Grog) ، وهو مادة صلبة شبيهة بالحصى الناعم ، لذا يجب تكسيرها إلى حجم مناسب ، ولقد تمّ تكسيرها فعلاً بكسارة ذات كرات فولاذية ، ومن ثمّ تمّ تمريرها في مناخل (Sieves) بحجم (٣٠٠ mesh) لتنتج حبيبات بحجم (٥٣ μ m) .

٢.٣.٣ تهيئة مزيج المواد الأولية

بعد أن تمّ تحضير المواد الأولية ، أجريت عملية المزج باستخدام نسب مختلفة من الكاؤولين ، الكروك ، السليكا ، والفلدسبار ، وقد تمت عملية الخلط باستخدام خلاط مختبري ذو اسطوانات دوارة توضع بينها الحاوية التي تحوي على المزيج ولمدة ساعتين من الاشتغال ، وذلك لضمان تجانس المواد ومزجها مع بعضها البعض ، وإعطاء توزيع منتظم لخليط المواد المستخدمة .

Stoneware

١.٢.٣.٣ الخزف الحجري

تمّ خلط الكروك مع المادة الرابطة (Binder) ، وهو عبارة عن الكاؤولين نفسه بنسب وزنية محددة ، وكما مبين في الجدول (٣ - ١) ، لتنتج مادة ذات تماسك كبير تسمى الخزف الحجري (Stoneware) ، وكما يلي :

الجدول (٣-٤) يوضح النسب المختلفة للخزف الحجري (Stoneware)

Material	a	b	c
١. Grog	٧٥%	٨٠%	٨٥%
٢. Kaoline	٢٥%	٢٠%	١٥%

إنّ الحروف (c, b, a) تشير إلى تركيبة الخلطات ، والتي تمّ تمييزها عن خلطات البورسلين ، والتي سيتم عرضها لاحقاً . لقد تمّ اختيار كتلة مقدارها (٥٠٠ gm) من الخلطات (c, b, a) ، وعلى أساسها تمّ احتساب كتلة المادة الأساسية والمادة الرابطة .

٢.٢.٣.٣ الخزف الصيني (البورسلين) Porcelain

لقد تمّ خلط مكونات البورسلين الأساسية مع بعضها وهي الكاؤولين ، السليكا ، والفلدسبار بنسب وزنية متفاوتة ، وكما مبين في الجدول (٣ - ٢) ، وذلك لإنتاج ثلاث خلطات من البورسلين ، بعدها وضعت في خلاط كهربائي وبصورة جافة لمدة ساعتين لضمان تجانس هذه المواد ، علماً بأن هذه المواد كانت بأحجام حبيبية صغيرة ، بحيث لا

تتعدى (٥٠ μm) ، عدا السليكا الذي كان بحجم صغير جداً (Fine sand) ، وكما يلي :

الجدول (٥-٣) يوضح مكونات الخلطات للبورسلين (Porcelain) المستخدمة في البحث

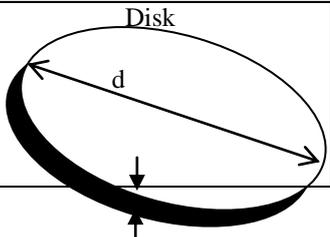
Material	Standard	A	B	C
١. kaoline	٥٠٪	٥٠٪	٥٠٪	٥٠٪
٢. K-Feldspar	٢٥٪	٢٠٪	٣٠٪	٤٠٪
٣. Fine sand	٢٥٪	٣٠٪	٢٠٪	١٠٪

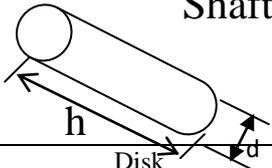
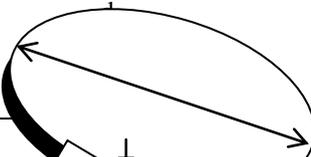
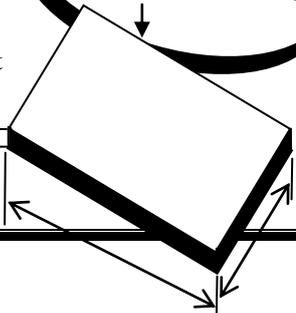
لقد تم اختيار كتلة مقدارها (٥٠٠ gm) من الخلطات (A,B,C) وعلى اساسها تم احتساب كتلة المكونات .

٤-٣ تهيئة نماذج الاختبار

لقد تم تحديد مواصفات نماذج الاختبار وفقاً إلى المقياس الامريكي لفحص المواد (ASTM) ، وكذلك طبقاً لما تتطلبه الأجهزة التي تم الاختبار فيها ، والمتواجدة في أماكن متفرقة من القطر ، بعد أن تم التعرف على آلية الاختبار فيها ، وكما يلي ، حيث وضحت هذه النماذج بالجدول (٦-٣) .

الجدول (٦-٣) يوضح نماذج الاختبار المستخدمة

Samples النماذج	رقم المقياس	Sample shape شكل النموذج	Dimen- sions الأبعاد mm	Applied load الحمل المسلط	Net weight الوزن الصافي gm
Electrical sample test نموذج اختبار الكهرباء	[٦٤]	Disk 	d = ٣٠ t = ٣	٥٠٠٠ Kgf	٧ gm

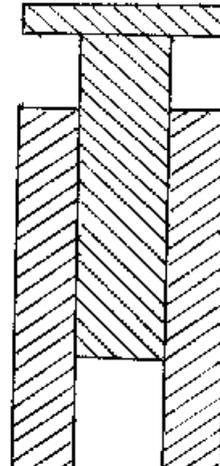
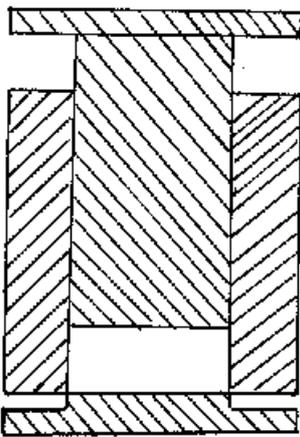
<p>Compressive sample test نموذج اختبار الضغط</p>	<p>[٦٥]</p>	<p>Shaft </p>	<p>$d = 10$ $h = 20$</p>	<p>٥٥٥ Kgf</p>	<p>٤ gm</p>
<p>Thermal shock sample test نموذج اختبار الصدمة الحرارية</p>	<p>[٦٦]</p>	<p>Disk </p>	<p>$d = 30$ $t = 3$</p>	<p>٥٠٠٠ Kgf</p>	<p>٧ gm</p>
<p>Bending sample test نموذج اختبار الانحناء</p>	<p>[٦٧]</p>	<p></p>	<p>$L = 110$ $b = 20$ $t = 11.0$</p>	<p>٢٠٣٤٦ Kgf</p>	<p>٦٠ gm</p>

١.٤.٣ معدات التشكيل

١. ميزان حساس .
٢. خلاط مختبري ذات دقة ٠.٠٠٠١ (Mixture) .
٣. دوراق وملاعق وأوعية مزج .
٤. طاحونة تكسير ذات كرات معدنية (Crusher) .
٥. مناخل ذات تصنيف حجمي بحجم "٣٠٠ mesh" .
٦. جهاز كبس هيدروليكي - كهربائي .
٧. قوالب كبس كربيدية ذات تحمل عالي ثنائية التأثير (Double Action Die) ، وهي موضحة بالشكل (٣ - ٥) .
٨. فرن تجفيف كهربائي (Oven) .
٩. أوراق سنفرة مختلفة النعومة .
١٠. قدمة قياس فكية (Vernia Caliper) .

٢.٤.٣ قوالب الكبس

لقد تمّ تصنيع قوالب من الفولاذ الكربوني المعامل حرارياً ، وذلك لكي يتحمل الأحمال العالية التي تسلط لأغراض الكبس ، وتمّ تصنيعها وفقاً للأبعاد التي حُددت للعينات المختلفة طبقاً إلى المقاييس العالمية . وقد تمّ تصنيع القالب بحيث يكون السطح الداخلي الملامس لحبيبات المادة السيراميكية ناعم جداً ، وذلك لسببين ، أولهما هو لتقليل الاحتكاك للحدود الدنيا بين جزئي القالب ، والثاني هو لعدم التصاق المادة السيراميكية بجدار القالب أثناء خروجها من القالب بعد الكبس، لهذا يستخدم الزيت لغرض زيادة كفاءة القالب للسببين اللذين ورد ذكرهما ، وقد وضحت القوالب بالشكل (٣ - ٥) .



الشكل (٣ - ٥) يبين الأشكال المختلفة لقوالب الكبس

٣.٤.٣ تشكيل النماذج

لقد تمّ تشكيل النماذج وفق متطلبات الأجهزة المختبرية المتوفرة في الأماكن التي أجريت فيها الاختبارات ، وكذلك حسب نظام التقييس العالمي

(ASTM) الأمريكي ، وقد تمّ الحصول على الأبعاد النهائية لعينات الاختبار بعد التجريب وتعديل المتغيرات من الكتلة والحمل المسلط ونسبة الرطوبة وغيرها ، وكما يأتي :

١.٣.٤.٣ تحديد الظروف المثلى لعملية التصنيع

The Optimum Conditions for the Manufacturing

- ضغط التشكيل :

لقد تمّ إجراء الفحص العياني على الشكل الخارجي للنماذج ، بعد أن تمّ كبسها باستخدام ضغط مقداره (٤٠ MPa) ، وقد وجد بأن دقائق المسحوق لم تتماسك بعد ، والعينة ذات مسامية عالية ، وعند زيادة الضغط بزيادة الحمل المسلط إلى (٧٠ MPa) ، وكما مبين أدناه ، تمّ الحصول على نماذج خالية من التشققات والمسامات ، كما أنها ذات حافات حادة جيدة ، وبزيادة الضغط لوحظ حدوث تهشم بالعينة ، وكذلك وجود شق قطري على طولها ، ولهذا فقد استخدم الضغط (٧٠) ميكا باسكال لجميع العينات ، ومنه تمّ احتساب الحمل المسلط ولجميع النماذج ، وكما يلي :

العينة القرصية (Disk) مساحة مقطعها تساوي :

$$A = \pi r^2 = 3.14 * (10)^2 = 706.5 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = P / A = 5000 / 706.5 = 7.07 \text{ Kg.mm}^2$$

$$= 70.77 \text{ MPa}$$

وهكذا فقد تمّ احتساب قيمة الحمل المسلط على العينة ، بعد معرفة مساحة مقطعها ، بعد تطبيق هذه العلاقة ، وكما يأتي :

Bending sample test (Bar)

$$A = 110 * 25 = 2875 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = P / A \Rightarrow P = \sigma * A = 70.7 * 2875 = 20326 \text{ Kg}$$

- نسبة الماء المضافة

لقد لوحظ بأنه عند إضافة نسبة من الماء مقدارها (٥%) إلى خليط المساحيق السيراميكية قبل التشكيل ، إن هنالك صعوبة في كبس النماذج و حدوث تهشم للنماذج أثناء خروجها من القالب ، مما يدل على أن هذه النسبة غير كافية لتشكيل المسحوق . وعند زيادة نسبة الماء إلى (٩%) ، تم الحصول على نماذج ذات تماسك جيد ، خالية من العيوب السطحية والتشققات . وفي حالة زيادة نسبة الماء إلى حوالي (١٥%) ، وجد بأن خليط المساحيق سوف يؤدي إلى التصاق المسحوق بجدار القالب ، وكذلك على سطح المكبس (Punch) ، وذلك بسبب الزيادة في محتوى الرطوبة ، لذلك تم تثبيت نسبة الرطوبة المثلى ، والتي تعطي منتجاً خالٍ من العيوب السطحية ، فضلاً عن سهولة إخراجها من القالب دون حدوث تهشم أو انكسار ، وبهذا فقد استخدمت طريقة الكبس شبه الجاف (Semi dry pressing) .

٤.٤.٣ تجفيف وضغط النماذج

بعد أن تم تشكيل النماذج بالاسلوب الذي قد تم شرحه سابقاً ، تترك النماذج لمدة ساعتين ومن ثم توضع داخل فرن (Oven) بدرجة (١١٠°C) ولمدة (٢٤) ساعة ، لكي نضمن خلوها من الرطوبة تماماً ، فضلاً عن أن النموذج يصبح قابلاً للنقل والمداولة .

٥-٣ حرق النماذج

لقد أجريت عملية الحرق للنماذج باستخدام فرن نوع (Naber therm) مبرمج بالتيار ، تصل درجة الحرارة فيه إلى (١٤٠٠ °C) كحد أقصى ، ولهذا فقد حددنا بهذه الدرجة (١٢٥٠ °C) لضمان بقاء الفرن صالحاً وبحالة جيدة ، وهذه الدرجة غير كافية لحرق الخزف الحجري ، كما أنها تصهر بعض مكونات البورسلين ، كما سيتم شرح ذلك بالتفصيل في الفصل القادم ، لذلك كان الأجدر استخدام المجهر الحراري (Heating Microscope) الذي من خلاله يتم مراقبة البنية السيراميكية ، وبالتالي تحديد

درجة حرارة الحرق بشكل مضبوط ، لكن فقدان هذا الجهاز من المختبرات في الوقت الحالي جعلنا نفكر بطريقة بديلة ، سيتم شرحها لاحقاً .

لقد تمّ اختيار ثلاث درجات حرق لكلا المادتين (الخرزف الحجري والبورسلين) وهي ($1050^{\circ}C$ ، $1150^{\circ}C$ ، $1250^{\circ}C$) ، هذا بالنسبة إلى الخرزف الحجري ، أما بالنسبة للبورسلين ، فكانت ($1100^{\circ}C$ ، $1150^{\circ}C$ ، $1200^{\circ}C$) ، وبزمن إنضاج مقداره ساعتين ، وكما مبين ذلك بالجدولين (٧-٣) و (٨-٣) على التوالي .

الجدول (٧-٣) بين درجات الحرق والمعدلات لخرزف الحجري

Temp. ($^{\circ}C$)	Rate of heating	Time (hr)	soaking time (hr)	Total time (hr)
١٠٥٠	$5^{\circ} / \text{min}$	٣.٥	٢	٥.٥
١١٥٠	$5^{\circ} / \text{min}$	٤	٢	٦
١٢٥٠	$5^{\circ} / \text{min}$	٤	٢	٦.٥

الجدول (٨-٣) بين درجات الحرق والمعدلات للبورسلين

Temp. ($^{\circ}C$)	Rate of heating	Time (hr)	soaking time (hr)	Total time (hr)
١١٠٠	$5^{\circ} / \text{min}$	٣.٧	٢	٥.٧
١١٥٠	$5^{\circ} / \text{min}$	٣.٨	٢	٥.٨
١٢٠٠	$5^{\circ} / \text{min}$	٤	٢	٦

٦-٣ فحوصات ما بعد الحرق

لقد تمّ إجراء العديد من الفحوصات على النماذج التي أجري تليبيدها بدرجات حرارية مختلفة ولكلا المادتين لمعرفة خواصها الميكانيكية والكهربائية ، وقد أعد لهذا الغرض ثلاثة نماذج لتعطي قيمة واحدة من القياس لكل اختبار .

Visual Test

١.٦.٣ الفحص البصري

أجري الفحص العياني على النماذج الملبدة ، لغرض التعرف على التغيرات التي قد تطرأ على السطح الخارجي والتشققات والانحناءات ، كما تمّ ملاحظة اللون وتغيراته بالنسبة للنماذج المحروقة وتأثيرات ذلك أثناء رفع درجة حرارة الحرق .

Firing Shrinkage

٢.٦.٣ النقلص بعد الحرق

يحدث التقلص في المواد السيراميكية بعد إجراء عمليات التليبيد ، خاصة عند التليبيد بالحالة السائلة ، وهي عملية تغير في أبعاد وحجم النموذج بعد تليبيده ، وقد تمّ قياس التقلص القطري ، وذلك بحساب قطر النموذج قبل وبعد عملية التليبيد بالقدمة الفكية (Vernia Caliper) ، إذ تمّ حساب التقلص القطري من العلاقة التالية [٣٣،٣٨] .

$$\text{Radial shrinkage \%} = [(D_1 - D_2) / D_1] * 100\% \dots (1-3)$$

إذ أن :

D_1 : قطر النموذج قبل التليبيد (ملم) .

D_2 : قطر النموذج بعد التليبيد (ملم) .

وقد تمّ قياس قطر النموذج من عدة زوايا ، وأخذ متوسط القطر لكل نموذج .

٣.٦.٣ الكثافة الظاهرية والمسامية وامتصاصية الماء

Apparent Density, Porosity and Water Absorption

إنّ الكثافة الكتلية هي العلاقة بين الجزء الصلب إلى الجزء الغازي المتمثل بالمسام في الجسم السيراميكي ، وتعد الكثافة من أهم الخصائص الفيزيائية التي تحدد خواص ونوعية المنتجات السيراميكية [٩] . وقد تمّ الاعتماد على طريقة أرخميدس لقياس الكثافة [٥٨] ، إذ تمّ وزن النماذج الملبدة بعد أن تمّ تجفيفها باستخدام ميزان حساس ذي دقة (٠.٠٠٠١ غم) ، وأخذ الوزن (D) ، بعدها غمرت النماذج في ماء مغلي لمدة (٥) ساعات ، وتركت مغمورة فيه لمدة (٢٤) ساعة ، بعدها وزنت مرة أخرى ، وهي موضوعة في ورق لكي يأخذ الوزن (S) ، بعدها أخرجت من الماء ، وقد مسحت بقطعة قماش نظيفة ، ثم وزنت مرة أخرى ، وأخذ الوزن (M) .

والشكل (٦ - ٣) يوضح طريقة القياس المستخدمة . ولقد تمّ حساب الكثافة والمسامية الظاهرية ، من خلال العلاقات التالية :

$$\text{Apparent(Bulk) density} = [D / (M - S)] \dots\dots (٢-٣)$$

$$\text{Apparent porosity \%} = [(M - D) / (M - S)] * ١٠٠\% \dots(٣-٣)$$

كما يمكن حساب امتصاصية الماء من الأوزان السابقة وفق المعادلات التالية :

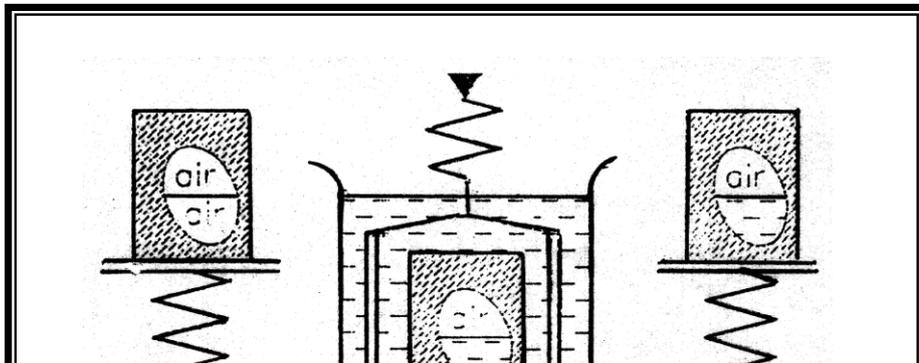
$$\text{Water absorption \%} = [(M - D) / D] * ١٠٠\% \dots\dots (٤-٣)$$

إذ أن :

D : وزن العينة وهي جافة .

M : وزن العينة وهي مشبعة بالماء .

S : وزن العينة وهي مغمورة ومعلقة بالماء .



الشكل (٣ - ٦) يوضح طريقة أرخميدس لقياس الكثافة

٤.٦.٣ مقاومة الانضغاط Compressive Strength

تعرف مقاومة الانضغاط بأنها القوة المسلطة على وحدة المساحة السطحية للجسم الصلب ، كما تعرف بأنها مقدار تماسك الجسم السيراميكي وقدرته على الحفاظ على هذا التماسك مع تغير ظروف الاستعمال [٥٩] . وقد تم تحضير نماذج اسطوانية الشكل بقطر (١٠ ملم) وطول (٢٠ ملم) ، بعدها تم تسليط الحمل لمعرفة مقدار تحمل المنتج للانضغاط بعد عملية التليد باستخدام جهاز (Universal Testing Machine) ، وعند معدل تحميل مقداره (٠.٥) ملم / دقيقة ، تم حساب مقاومة الانضغاط اعتماداً على العلاقة الآتية ، وحسب مواصفات الجمعية الأمريكية القياسية (ASTM) [٦٠] .

$$\sigma_c = P / A \quad \dots\dots\dots (٥-٣)$$

إذ أن :

σ_c : مقاومة الانضغاط (MPa) .

P : الحمل المسلط (N) .

A : مساحة المقطع (mm²) .

Modulus of Rapture

٥.٦.٣ معيار الكسر

لقد تمّ تحديد معيار الكسر لبعض النماذج التي تمّ تليبيدها ، وذلك للتعرف على مقدار تحمل النموذج عند تعرضه إلى إجهادات سطحية ، واستخدمت لهذا الغرض طريقة الانحناء (3 point bend) ، بالاستعانة بجهاز فحص الشد (Instron Universal Test Machine) ، بمعدل تحميل مقداره (٠.٥) ملم / دقيقة بعد أن تمّ تحضير النماذج بشكل متوازي مستطيلات بأبعاد (١١٥ * ٢٥ * ١١٥) ملم وفقاً لما يتطلبه الجهاز ، وكما موضحة بالجدول (٣- ٣) ، وبمسافة ارتكاز مقدارها (١٠٠) ملم .

لقد تمّ احتساب معيار الكسر من العلاقة الآتية ، وحسب المواصفة القياسية (ASTM) [٦١] .

$$M.O.R = \frac{3 (P.l)}{2 (bh^2)} \dots\dots\dots (٦-٣)$$

إذ أن :

M.O.R : معيار الكسر (MPa) .

P : الحمل المسلط (N) .

l : المسافة بين قواعد الارتكاز (mm) .

b : عرض النموذج (mm) .

h : سمك النموذج (mm) .

٦.٦.٣ مقاومة الصدمة الحرارية Thermal Shock Resistance

تعرف مقاومة الصدمة الحرارية على أنها الثبات في التركيب أثناء تعرّض الجسم السيراميكي إلى ظروف مختلفة من درجات الحرارة . وبما أن العوازل السيراميكية معرضة إلى مياه الأمطار الباردة شتاءً وحرارة أشعة الشمس صيفاً ، كذلك يمكن أن

تتعرض إلى ارتفاع درجات الحرارة بسبب التيارات الناتجة من الاتصال المباشر مسببة دوائر قصر (Short Circuits) ، لذا يجب أن يجرى عليها مثل هذا الاختبار ، وقد تمّ تصنيع نماذج على هيئة أقراص دائرية الشكل بقطر (30 mm) وسمك (3 mm) لجميع الخلطات [٦٢] ، وتمّ وضعها داخل فرن بدرجة حرارة (950 °C) ، بعدها توضع بالماء ، ومن ثمّ تجفف النماذج لمدة ساعتين في فرن بدرجة حرارة (110 °C) ، وتلاحظ التغيرات التي قد تطرأ عليه من تشققات أو عيوب أو غيرها ، وهذا ما يسمى بالدورة الواحدة . وبتكرار العملية بعدد من الدورات لحين حصول الفشل ، ولا تكتب الدورة التي يفشل بها النموذج ، بل تكتب الدورة التي قبلها على هيئة عدد [٥٩].

٧.٦.٣ الفحوصات الكهربائية

١.٧.٦.٣ ثابت العزل (ϵ) Dielectric Constant

لقد تضمن الفحص الكهربائي قياس مقدار ثابت العزل (ϵ) لكل نموذج ، بتغيير التردد واستخدام جهاز (L.C.R Meter) من نوع (Agilent) ، والذي يعمل بمدى تردد (40 Hz – 110 MHz) ، والمبين في الشكل (3-3) ، مع هولدر وعدة الفحص . وتمّ قبل إجراء القياسات معايرة الجهاز وحسب التعليمات المرفقة مع الجهاز ، وعلى ما موجود من ثوابت قياسية في المعايرة لقيمة (C_p) للهواء بسمك (0.1 mm) ، إذ تكون قراءة ($17 \text{ pf} \leq C_p \leq 12 \text{ pf}$) ، بعدها يتم تحديد مدى القياس المعمول به في هذا البحث وهو (40 Hz - 15 MHz) ، ويجعل التدرج في القياس أوتوماتيكياً يحدد الجهاز خطوات القياس .

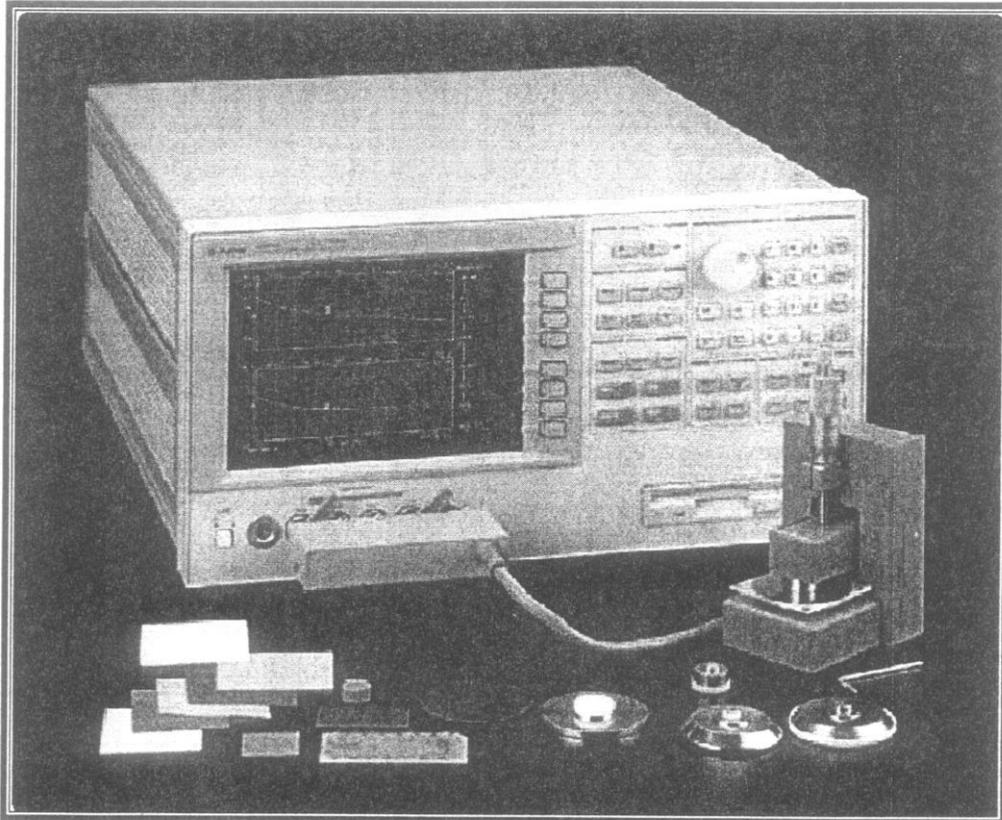
يقوم الجهاز بإظهار قيمة ($\tan\delta - C_p$) بشكل منحنى ماسح لقيم الترددات ضمن المدى ، ومن الممكن تسجيل هذه القيم على قرص مضغوط مسجل فيه جدول لقيم (C_p) بتغيير التردد ضمن المدى المقترح وهو (40 Hz - 15 MHz) ، وكذلك ($\tan\delta$) (تمثل زاوية الفقد) ، بعدها تنقل هذه المعلومات إلى حاسبة ، ومنها يتم حساب قيم (ϵ) باستخدام برنامج (Microsoft Excel) وذلك لتسهيل العمل . فقد بلغت قيم تغير التردد مع (C_p , $\tan\delta$, R_x) لكل نموذج أكثر من (750) قراءة ، مما جعل استحالة حسابها يدوياً وبالسرعة والدقة التي تنجزها الحاسبة ، وذلك بتطبيق المعادلة التالية :

$$C_p * d$$

$$\epsilon' = \frac{A}{\epsilon_0}$$

$$A * \epsilon_0$$

والتي تمّ التطرق إليها في الفصل الثاني من هذا البحث ، وقد تمت القياسات جميعاً في درجة حرارة الغرفة [٦٣] .



الشكل (٣ - ٧) يبين جهاز (L.C.R) الذي يقيس $(\tan\delta, C_p)$

٢.٦.٦.٣ مقاومة العازل

Dielectric Strength

تمّ قياس جهد الانهيار للنماذج في الجامعة التكنولوجية / قسم العلوم التطبيقية ، باستخدام جهاز (BAUR-PGO-S-٣) بمدى فولتية يصل إلى (٣٠٠ KV) ، والمبين بالشكل (٨-٣) وقد تم تسليط جهد مقداره ٦٠Kv بمعدل (٠.٥ KV/Sec) ، وقد استخدمت نماذج ذات سمك (٣ mm) بقطر (٣٠ mm) ، ويحتوي الجهاز على أقطاب نحاسية ذو نقطة تماس مع النموذج كروية قطرها (٢ mm) ، يحتوي على حوض يملأ بالزيت الذي أجريت عليه عملية اختبار أولية . ووجد أن معدل متانته الكهربائية هي (٣٥ KV/mm) لمدة دقيقة واحدة ، وهو مناسب لهذا الغرض ، وهناك سبب آخر يدعو إلى استخدام هذا السائل ، هو ارتفاع درجة حرارته استعماله (توجهه) جعله يكون بمثابة الوسط الخامد للحرق الذي قد يحصل من جراء الشرار المتولد

ويفضل قياس جهد الانهيار لمناطق عدة في النموذج الواحد ، وأخذ معدل أفضل تلك القياسات بسبب اختلاف تجانس النموذج السيراميكي ، والذي قد يحدث أثناء الحرق والناشئ من الأطوار المتعددة [١٥] .

$$\text{Dielectric Strength} = \frac{V_{av}}{h}$$

إذ أن :

V_{av} : معدل فولتية الانهيار (KV) .

h : السمك (mm) .



الشكل (٣ - ٨) يوضح جهاز (BAUR) PGO

الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

١-٤ تقييم المواد الأولية Raw Materials Evaluation

١.١.٤ التحليل الكيماوي وتحديد الأطوار

١.١.١.٤ التحليل الكيماوي

يوضح الجدول (٣ - ١) نتائج التحليل الكيماوي لخام الكاؤولين (Kaolinite). كما يظهر المكونات الرئيسية لهذا الخام ، وهي السليكا (٥١ %) والألومينا (٣٣ %). وكذلك يبين بعض الأكاسيد المرافقة بنسب منخفضة متباينة . إن هذه الأكاسيد التي تشمل (أكسيد الحديد Fe_2O_3 ، أكسيد الصوديوم Na_2O ، أكسيد البوتاسيوم K_2O ، وأكسيد المغنيسيوم MgO ، وأكسيد الكالسيوم CaO) ، والتي مجموعها (٢.٦٢ %) تعد من المواد المساعدة للصهر ، مما يشير إلى أن هذه المادة لا يمكن حرقها بدرجات حرارية عالية لوجود هذه الأكاسيد رغم قلة نسبتها . وبما أن مجموع هذه الأكاسيد لا يزيد على (٢.٦٢ %) في محتوى معدن الكاؤولين ، لذا فإن خام الكاؤولين الأبيض من منطقة (دويخلة) يكون ملائماً للاستخدام في هذا البحث [٦٤،٦٥]

أما نتائج التحليل الكيماوي لخام السليكا المستخدم في البحث ، فقد وضحت نتائجها بالجدول (٣ - ٢) . وقد بينت هذه النتائج بأن الخام يحتوي على حوالي (٩٨ %) سليكا ، كما يحتوي على نسبة واطئة من الشوائب المرافقة .

الجدول (٣ - ٣) بين التحليل الكيماوي لخام الفلدسبار ، ويظهر من الجدول بأن الفلدسبار المستخدم في البحث ، هو من نوع بوتاسيوم ، إذ ظهرت نسبة البوتاسيوم (١١.١٦ %) ، وقليل من أكسيد الصوديوم والكالسيوم ، وعند مقارنة نسب احتواء هذا الخام على كل من السليكا والألومينا مع خامات الفلدسبار المستخدمة في البحوث السابقة [٦٥،٦٦،٦٧] . وجد بأن هذه النسب متقاربة ، لذا يعد هذا الخام ملائماً لأغراض البحث . إنَّ الفلدسبار سوف يسهم في تكوين منصهرات داخل البنية السيراميكية (البورسلين) .

٢.١.١.٤ تحديد الأطوار

يوضح الشكل (٣ - ١) الأطوار التي أظهرتها نتائج حيود الأشعة السينية ، إذ يلاحظ من الشكل ، الذي قد تم عرضه في الفصل السابق بان هناك نسبة كبيرة من مادة الكاولين (Kaoline) قد ظهرت اما الباقي فقد ظهر على هيئة سليكا حرة (Free Silica).

وقد تم حرق مادة الكاولين كمرحلة أولى إلى درجة (١٢٥٠ °C) للحصول على كاولين خامل (Dead burn) ، أي الكروك الذي يشكل الهيكلية الثابتة للجسم السيراميكي من نوع الخزف الحجري (Stoneware) .

الشكل (٣ - ٢) في الفصل السابق يمثل حيود الأشعة السينية لمادة الكروك ، وتبين ظهور مركبات المولايت والكريستوبلايت ، وهذان الطوران يعدان من الأطوار الثابتة والمستقرة .

الشكل (٣ - ٣) يمثل مخطط حيود الأشعة السينية لخام السليكا الذي استخدم في البحث ، ويلاحظ بأن السليكا ذات نقاوة عالية .

كما بين الشكل (٣ - ٤) الذي عرض في الفصل السابق ايضاً الأطوار التي أظهرها التحليل الطيفي لخام الفلدسبار ، والذي ظهرت فيه أطوار الأكاسيد ، فضلاً عن السليكا والألومينا ، والتي أظهرت تطابقاً مع ما جاء بنتائج التحليل الكيماوي المشار إليها سابقاً .

٢.١.٤ تحديد درجة حرارة الحرق

عادة تحدد درجة حرارة الحرق للمواد السيراميكية بواسطة حرق نماذج صغيرة ومراقبة سلوكها بواسطة المجهر الحراري (Heating Microscope) . وبسبب ظروف البلد ، ولفقدان هذا الجهاز من المختبرات خلال الحرب ، لم نستطع إجراء هذا الاختبار ، الأمر الذي جعلنا أن نحدد درجة حرارة الحرق للخزف الصيني (Porcelain) من خلال عمل قضيب بقطر (٣٢ mm) وطول (٤٨ mm) من البورسلين القياسي ، وقد تم حرقه بدرجة (١٢٥٠ C°) وبمعدل (٥° / sec) ، وبفترة إنضاج مقدارها ساعتين ، إذ لوحظ بعد إتمام عملية الحرق حصول تقلص قطري فيه ، إذ أصبح القطر (٢٩ mm) ، وقد ظهر شق طولي واضح على السطح ، إذ تم احتساب نسبة التقلص هذه بتطبيق العلاقة (٣ - ١) المشار إليها سابقاً وكما يلي :

$$٣٢ - ٢٩$$

$$\text{Radial shrinkage} = \frac{\quad}{\quad} \times ١٠٠\% = ٩.٤\% \text{ mm}$$

$$٣٢$$

وأن سبب استخدام البورسلين القياسي ، يعود الى أن خلطات البورسلين المستخدمة في البحث ذات نسبة فلدسبار أعلى من نسبة الفلدسبار في البورسلين القياسي ، وهذا يعني أن التقلص بعد الحرق سوف يزداد كثيراً ، ولربما نصل إلى حالة إنصهار الجسم كلياً عند الاستمرار برفع درجة الحرارة . وللحفاظ على سلامة النماذج من الانصهار ، ولعدم إمكانية اكتشاف درجة إنصهار المادة كما ذكر آنفاً ، فإننا اخترنا درجة (١٢٠٠C°) كدرجة حرارة حرق قصوى ، هذا بالنسبة للخزف الصيني (Porcelain) .

أما بالنسبة للخزف الحجري (Stoneware) ، فقد تم تحديد أعلى درجة حرارة حرق هي (١٢٥٠ C°) ، علماً أن هذه الدرجة غير كافية لإتمام عملية التحول كلياً ، ولكن

تمّ تحديدنا بهذه الدرجة وبهذا المعدل ($50^\circ / \text{sec}$) لأسباب أمنية تتعلق بدائرة المسح الجيولوجي (المكان الذي تمّ فيه حرق النماذج) .

٢-٤ فحص الشكل الخارجي واللون (الفحص البصري) Visual Test

بعد ملاحظة العينات التي حُرقت بدرجات حرارية (1050°C ، 1100°C) لكلا المادتين الخزف الحجري والخزف الصيني ، وجد بأن العينات التي حُرقت بهذه الدرجات تميل إلى اللون الأحمر ، وبارتفاع درجة حرارة الحرق فإن اللون يميل إلى الأصفر ، ومن ثم يبدو أبيضاً عند درجة حرارة حرق (1250°C ، 1200°C) ، وهذا يدل على تحوّل قسم من الكاؤولين إلى مولايت الذي يبدو لونه مائل إلى البياض . كما تم فحص الشكل الخارجي للعينات ، فيما إذا كانت تحتوي على تشققات أو انحرافات ، وكانت العينات بحالة جيدة جداً ، ولا تحوي على تشققات أو انحرافات .

٣-٤ الخواص الفيزيائية

١.٣.٤ النسبة المئوية لامتناس الماء والمسامية الظاهرية

الشكل (٤ - ١) يوضح العلاقة بين درجة حرارة الحرق والمسامية الظاهرية للخزف الحجري . والشكل (٤ - ٢) يوضح العلاقة بين درجة حرارة الحرق ونسبة امتصاصية الماء للخزف الحجري .

يتضح من الأشكال المذكورة ارتفاع قيم المسامية وامتصاصية الماء عند التليد بدرجة حرارة (1050°C) ، إذ أن هذه الدرجة غير كافية لإتمام عملية التليد بشكل كامل ، ويلاحظ بأنه عند التليد بدرجة حرارة (1250°C) للخلطات (a, b, c) ، إن المسامية قد انخفضت كثيراً ، ويعزى سبب ذلك إلى أن الزيادة بالتليد عند هذه الدرجة الحرارية ، يعني ازدياد حجم حبيبات بلورية على حساب حبيبات بلورية أصغر منها ، مما يقلل من الكم الكلي للفجوات [٣٨] . ولكنها ما زالت مرتفعة عند مقارنتها بالحالة المثالية للبنية السيراميكية والممتلئة (١ %) ، وهذا يعني أن هذه الدرجة تكون أيضاً غير كافية لإتمام عملية التليد بشكل كامل .

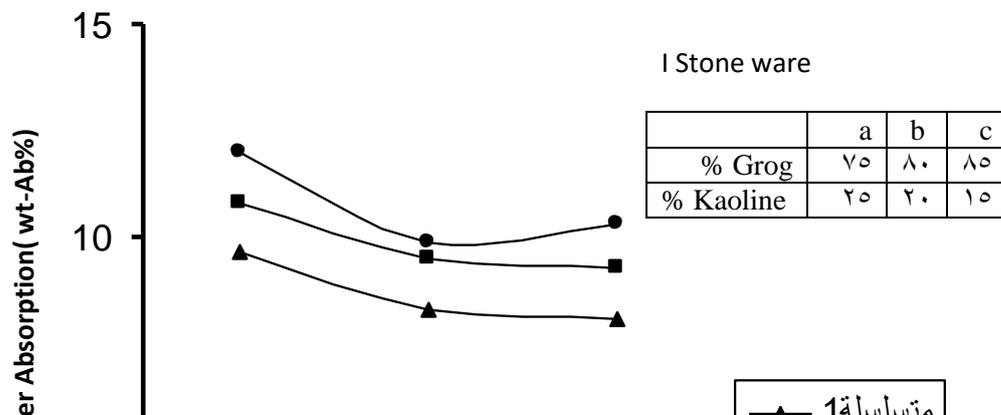


I Stone ware

	a	b	c
% Grog	٧٥	٨٠	٨٥
% Kaoline	٢٥	٢٠	١٥

الشكل (٤-١) يوضح العلاقة بين المسامية - درجة حرارة الحرق
لمادة (الخزف الحجري)

نلاحظ من الشكل (٤-٢) ، إن امتصاصية الماء تأخذ نفس المنحى للمسامية ، لأنها
متعلقة بالفجوات المفتوحة ، والتي تشكل المسامية الظاهرية



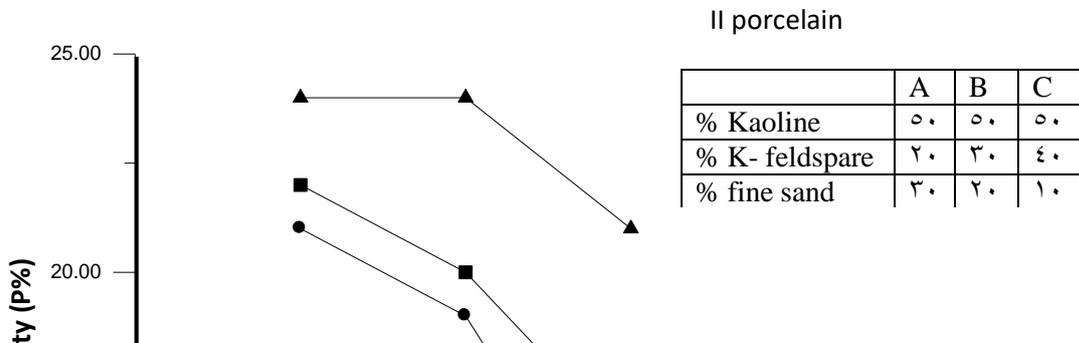
A
B

Firing temp. °C

الشكل (٤ - ٢) الذي يمثل العلاقة بين امتصاصية الماء - درجة حرارة الحرق لمادة (الخزف الحجري)

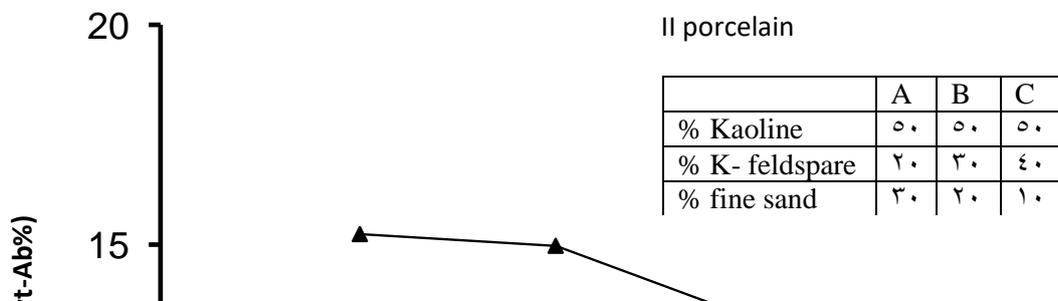
الشكل (٤ - ٣) يوضح العلاقة بين درجة حرارة الحرق والمسامية الظاهرية للخزف الصيني . كما يوضح الشكل (٤ - ٤) يوضح العلاقة بين درجة حرارة الحرق ونسبة امتصاصية الماء للخزف الصيني .

وقد أظهرت هذه الأشكال ارتفاعاً ملحوظاً في قيم المسامية ونسبة امتصاصية الماء بدرجة حرارة (١١٠٠ °C) ، والسبب في ذلك يرجع إلى كون هذه الدرجة غير كافية لانصهار الفلدسبار وتحويله إلى الطور السائل ، الذي ينفذ خلال الحبيبات ويغلق المسامات ، ولكن عند رفع درجة الحرارة أكثر تبدأ المسامية وامتصاصية الماء بالانخفاض كثيراً ، وذلك لانصهار الفلدسبار وتحويله إلى طور سائل ليغلق المسامات ، وبذلك فإن المسامية وامتصاصية الماء ستنخفض ، وقد لوحظ بأن النماذج للخلطة (C) قد أعطت قيماً بأقل ما يمكن من المسامية وامتصاصية الماء ، وذلك للزيادة في محتواها من الفلدسبار ، والذي بلغ (٤٠ %) ، وهذه النسبة كافية للتحويل إلى الطور السائل ، وبالتالي غلق المسامات للبنية السيراميكية .



Firing temp. °C

الشكل (٣-٤) الذي يمثل العلاقة بين المسامية – ودرجة حرارة الحرق
لمادة (الخزف الصيني)

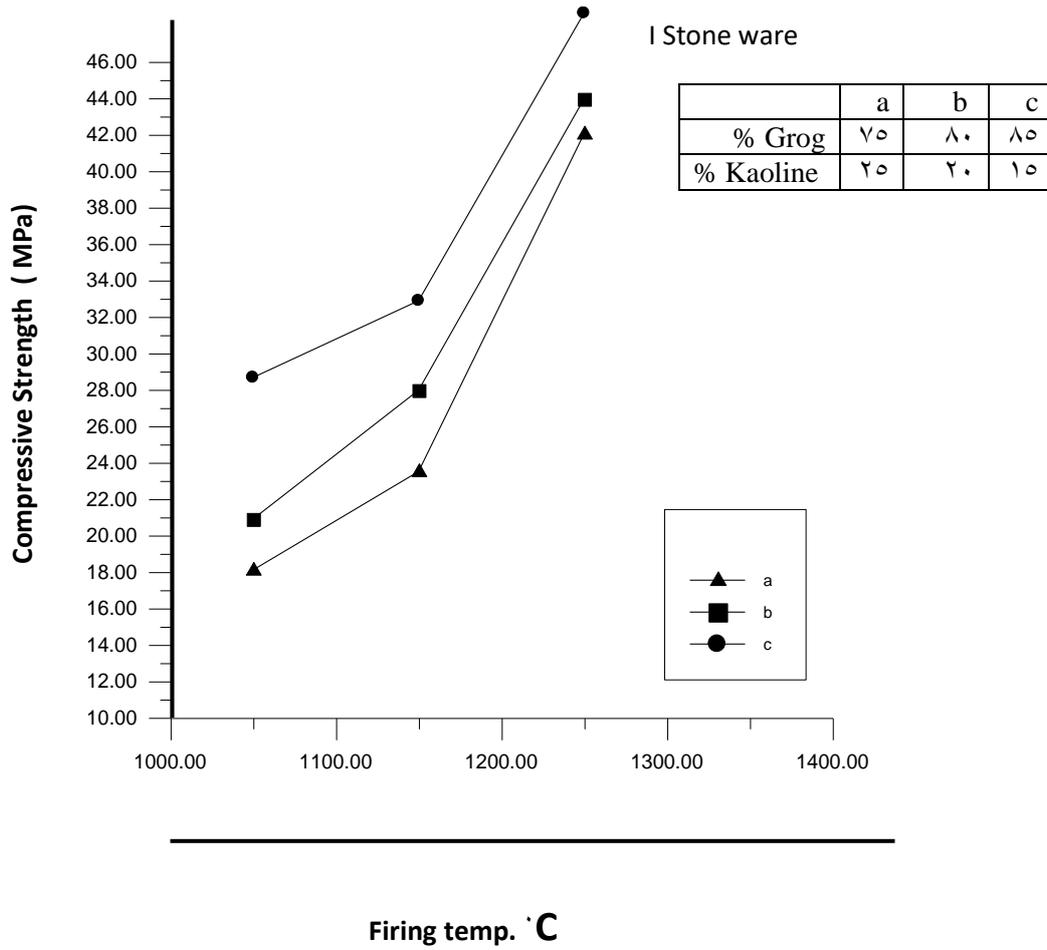


الشكل (٤-٤) الذي يمثل العلاقة بين امتصاصية الماء - ودرجة حرارة الحرق لمادة (الخزف الصيني)

٤-٤ الخواص الميكانيكية

١.٤.٤ مقاومة الانضغاط

الشكل (٤ - ٥) يمثل العلاقة بين درجة حرارة الحرق ومقاومة الانضغاط للخزف الحجري . وقد لوحظ من هذا الشكل بأن النماذج للخلطة (c) أعطت أعلى قيم لمقاومة الانضغاط ، وتزداد هذه القيمة حتى تبلغ ذروتها عند درجة حرارة تلييد (١٢٥٠ °C) . ويمكن تعليل ذلك لمحتواها العالي من الكروك الذي يشكل أعلى نسبة في النماذج لبقية الخلطات ، الأمر الذي أكسبها مقاومة انضغاط عالية . وكذلك فإن النسبة المتبقية من الكاؤولين قد تحولت بارتفاع درجات الحرارة إلى مولايت ، مما أضاف للبنية خصائص مقاومة انضغاط وصلادة عالية . إن هذا التحول في بقية النماذج للخلطات جزئياً وليس كلياً ، لارتفاع نسبة الكاؤولين فيها مما جعل مقاومة الانضغاط لبقية النماذج تنخفض عن (c) ، إذ أن المولايت يتميز بخواص ميكانيكية عالية قياساً بالكاؤولين [٦٨] .



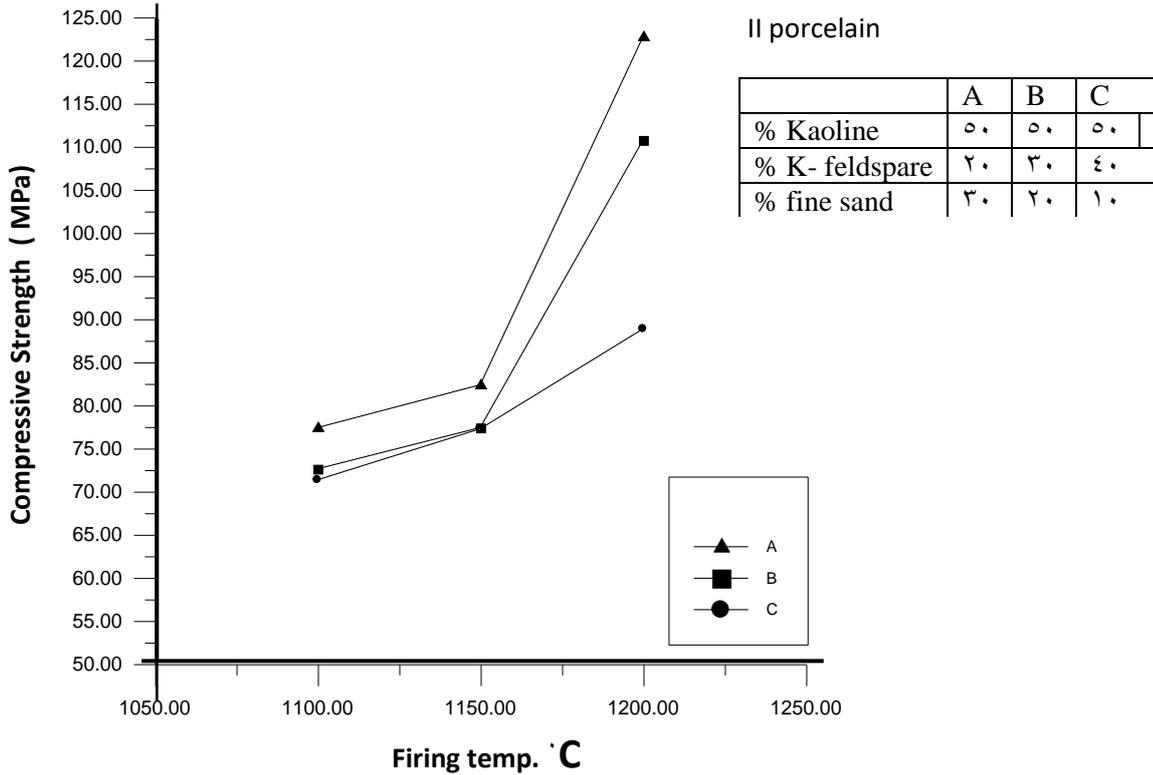
الشكل (٤-٥) يوضح العلاقة بين مقاومة الانضغاط ودرجة حرارة الحرق

لمادة (الخزف الحجري)

الشكل (٤ - ٦) يمثل العلاقة بين درجة حرارة الحرق ومقاومة الانضغاط لنماذج الخزف الصيني ، وقد تبين من الشكل بأن النماذج للخلطة (A) من الخزف الصيني ، قد أعطت أعلى قيمة لمقاومة الانضغاط من غيرها للنماذج من الخلطات (B, C) وترتفع قيمتها بشكل كبير بدرجة حرارة حرق (١٢٠٠ °C) ، ويعزى ذلك إلى الزيادة في محتوى السليكا الذي يؤدي إلى تكوين كمية أكبر من المولاييت والكريستوبلايت ، وانخفاض في نسبة الفلدسبار ، بحيث تكون الأطوار عبارة عن المولاييت والكريستوبلايت والكوارتز (Mullite, Cryatabolite and Quartz) .

إنّ مزيداً من السليكا سوف يتحول إلى كريستوبلايت [٩] ، الذي يضيف مقاومة عالية للبنية الناتجة . بعد عملية التليد ، يلاحظ أن الزيادة في محتوى السليكا غير المتحولة ، ووجود الفلدسبار في تركيب الجسم السيراميكي يؤدي إلى تكون الكوارتز الحر (Free quartz) في الأرضية [٦٩] ، مما يؤدي إلى تركيز الإجهادات في بعض المناطق

بسبب اختلاف معاملات التمدد الحراري للأطوار الناتجة عند تحول السليكا وبعض المعادن البلورية ، لذلك فإن هنالك فرصة لتولد فراغات مغلقة في الأرضية أثناء التبريد ، والتي تعد كمناطق تمرکز إجهادي ، وبالتالي تؤدي إلى تقليل الخواص الميكانيكية ومنها مقاومة الانضغاط لذلك فإن نماذج الخلطات (C,B) تبدو ذات مقاومة انضغاط اقل في درجات الحرق الحالية لنماذج الخلطة (A).



الشكل (٦-٤) يوضح العلاقة بين مقاومة الانضغاط ودرجة حرارة الحرق لمادة (الخزف لصيني)

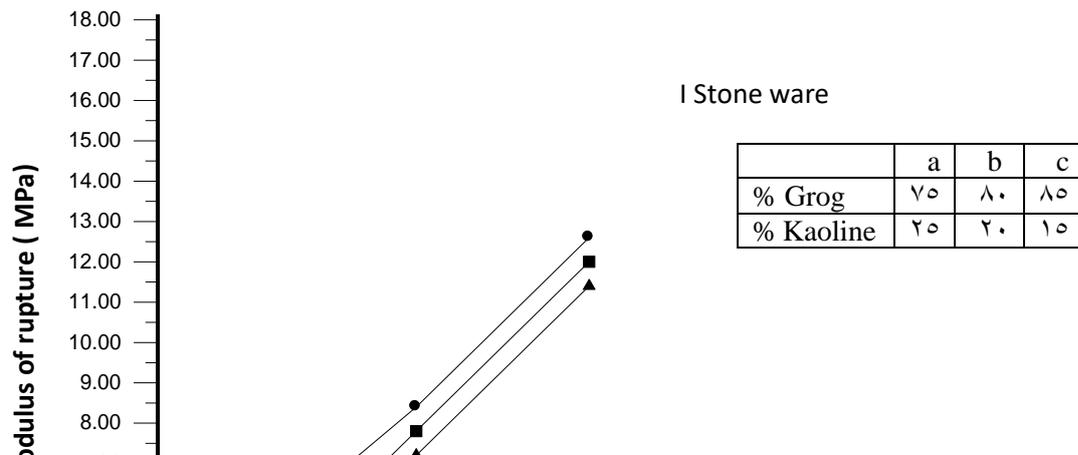
Modulus of Rupture

٢.٤.٤ مقاومة الانحناء

الشكل (٧ - ٤) يبين العلاقة بين درجة حرارة الحرق ومقاومة الانحناء لنماذج مختلفة من خلطات الخزف الحجري . وقد تبين بأن نماذج الخلطة (c) ، قد سجلت أعلى

قيمة لمقاومة الانحناء من نماذج الخلطات (a, b) بدرجات الحرارة العالية والواطئة ، ويمكن تعليل ذلك بأن نماذج الخلطة (c) ذات محتوى عالٍ من الكروك ونسبة كاؤولين أقل ، والذي يتحول جزءاً كبيراً منه في درجات الحرق العالية إلى المولايت والكريستوبلايت ، وهذا سوف يضيف مقاومة إلى البنية السيراميكية ، فضلاً عن مقاومتها العالية إضافة إلى ذلك فإن المحتوى المنخفض للكاؤولين في نماذج هذه الخلطة (c) جعلها تتأصر بارتفاع درجات الحرارة مع حبيبات الكروك لتعطي بنية متماسكة خالية من التشققات والعيوب فضلاً عن محتواها العالي من الكروك الذي جعلها تسجل أعلى قيمة لمقاومة الانحناء [٩].

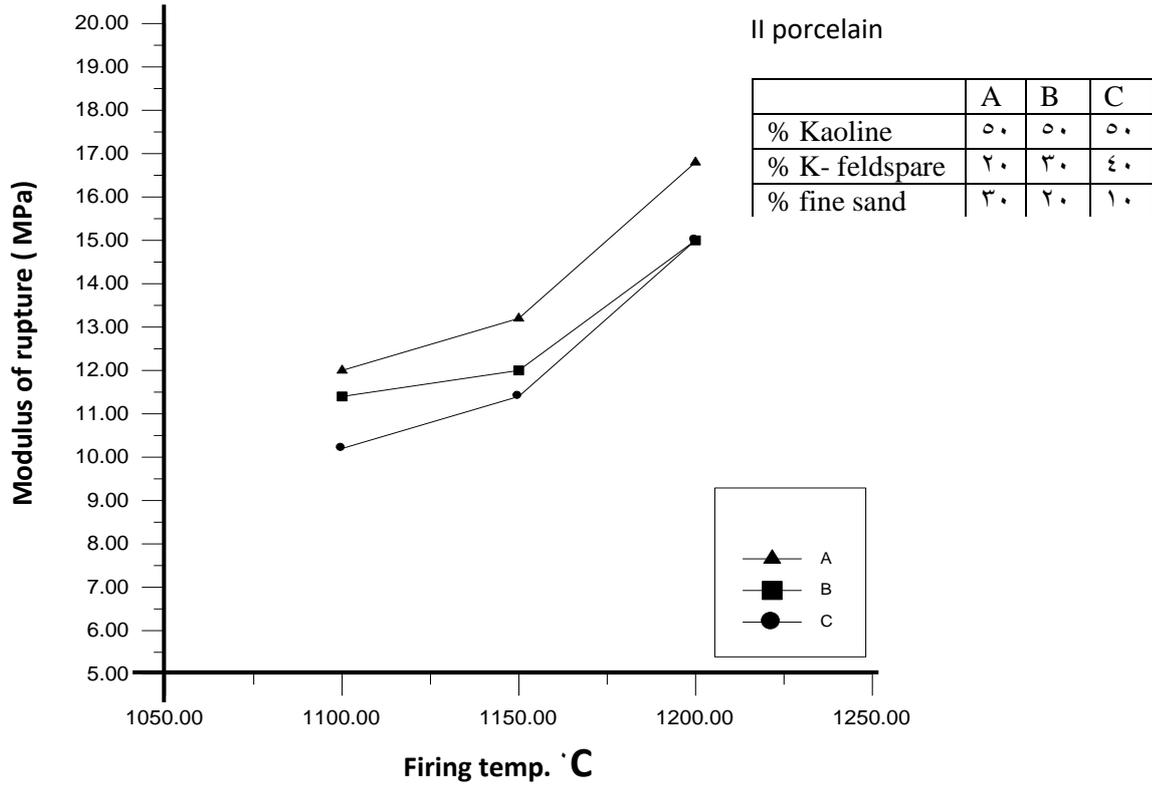
أما بقية النماذج للخلطات (a, b) ، فإن ارتفاع نسبة الكاؤولين فيها جعلها تسجل انخفاضاً في مقاومة الانحناء لوجود قسم من الكاؤولين غير المتحول إلى مولايت ، وخصوصاً في درجات الحرق الواطئة ، ما جعل ذلك يؤدي إلى خفض في مقاومة الانحناء لهذه النماذج [٩] .



الشكل (٧-٤) يوضح العلاقة بين معامل الانحناء- ودرجة حرارة الحرق لمادة (الخزف الحجري)

يذكر بأن الكروك الذي يمتلك المركبات من نوع المولايت والكريستوبلايت في بنيته ، والتي تكون ذات تركيب ثابت في البنية تمنح الجسم السيراميكي الهيكلية القوية ، وهي التي تؤدي إلى هذه الزيادة في مقاومة الانحناء .

الشكل (٨ - ٤) يبين العلاقة بين درجة حرارة الحرق ومقاومة الانحناء للخزف الصيني . من خلال ملاحظة الشكل ، تبين بأن النماذج للخطة (A) ، قد أعطت أعلى مقاومة للانحناء من بقية النماذج للخطات (B, C) بدرجات الحرق العالية والواطئة ، ويعزى ذلك إلى محتواها العالي من السليكا ، والذي جعلها تتحول إلى المولايت والكريستوبلايت بدرجات الحرارة العالية ، إذ أن نسبة السليكا العالية ترجح كفة تفاعل تحول الكاؤولين إلى مولايت ، أما السليكا المتبقية داخل البنية فإنها سرعان ما تتحول إلى كريستوبلايت والذي يعطي المقاومة العالية . فضلاً عن ذلك ، فإن نسبة الفلدسبار الواطئة جعلت وجود الطور الزجاجي بأقل ما يمكن لسابقتها من بقية النماذج للخطات (B, C) ، لذلك فإن هذه البنية لنماذج الخطة (A) سوف تميل إلى اكتساب المقاومة عن طريق تكون المركبات أكثر من ميلها إلى مقاومة الطور الزجاجي . إن الزيادة في محتوى الفلدسبار لنماذج الخطتين (B, C) الذي يرافقه زيادة في محتوى الألومينا وانخفاض في محتوى السليكا ، يعزى لها مقاومة الانحناء المنخفضة لنماذج هذه الخطات [٩] .



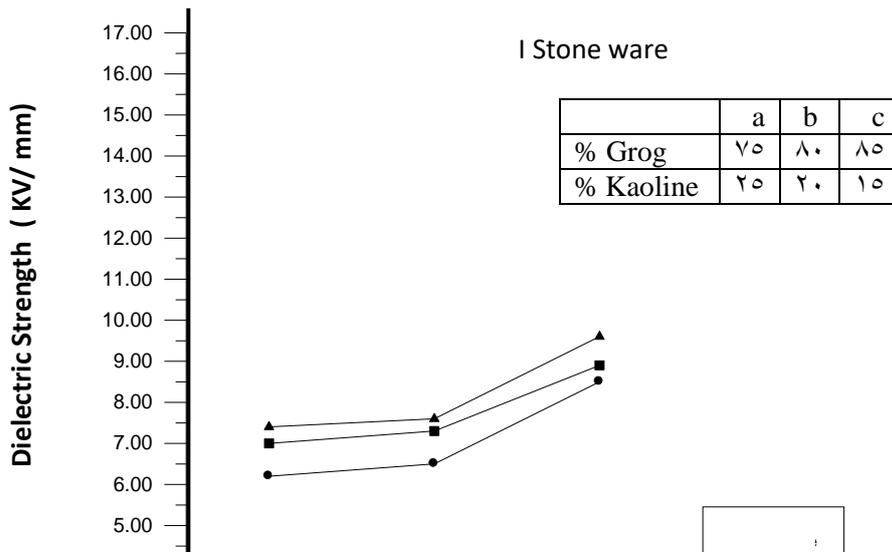
الشكل (٤-٨) يوضح العلاقة بين معامل الانحناء- حرارة الحرق
لمادة (الخزف الصيني)

٤-٥ خواص العزل الكهربائي

Dielectric Strength

٤.٥.١ متانة العزل الكهربائية

الشكل (٤ - ٩) يبين العلاقة بين درجة حرارة الحرق للمادة السيراميكية المحضرة من الخزف الحجري و متانة العزل الكهربائي . ويلاحظ من الشكل ، إن متانة العزل تزداد قليلاً بمدى درجات الحرارة (١٠٥٠٠C ، ١١٥٠٠C) ، ويعزى ذلك إلى أن هذا المدى من درجات الحرارة غير كافٍ لتحويل الكاؤولين إلى مولايت [٧٠] . أما عند رفع درجة حرارة التلبيد ، فإن متانة العزل ستزداد بشكل ملحوظ ، لأن المسامية سوف تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة ، مما يزيد من متانة العزل ، إذ أن متانة العزل الكهربائي تتناسب عكسياً مع زيادة المسامات ، حيث أن زيادة المسامات سوف يؤدي إلى تكوين مجالات كهربائية داخلها ، وبالتالي ستقل متانة العزل [٧٠] . ومن الملاحظ بأن النماذج في الخلطة (a) ، أظهرت أعلى قيمة لمتانة العزل ، ان ذلك يفسر بأن المحتوى العالي من الكاؤولين في نماذج هذه الخلطة جعل قسماً منه يتحول الى مولايت بأرتفاع درجات الحرارة اما القسم الباقي فإنه سوف يتأصر مع حبيبات الكروك بحيث تكون البنية الجديدة ذات اطوار تمتلك خواص عزل عالية [٧٠] .



الشكل (٩-٤) يوضح العلاقة بين متانة العازل -و حرارة الحرق

لمادة (الخزف الحجري)

الشكل (٤ - ١٠) يوضح العلاقة بين متانة العزل ودرجة حرارة الحرق للخزف الصيني . ويلاحظ من الشكل بأن متانة العزل تسلك سلوكاً مشابهاً لما ذكر في أعلاه ، إذ أنها تقل بزيادة المسامية ، وتزداد حينما تقل المسامية . وهذا ما جاء واضحاً لنماذج الخلطة (C) ، إذ أن متانة العزل فيها بدأت بالتناقص ، ويعزى ذلك إلى الزيادة في تسرب التيارات الناتجة من انتقال حاملات الشحنات بين قطبي التوصيل ، وهذا ما ينطبق مع بقية الدراسات والبحوث [٧٠] .

II porcelain

17.00
16.00
15.00
14.00

	A	B	C
% Kaoline	٥٠	٥٠	٥٠
% K- feldspare	٢٠	٣٠	٤٠
% fine sand	٣٠	٢٠	١٠

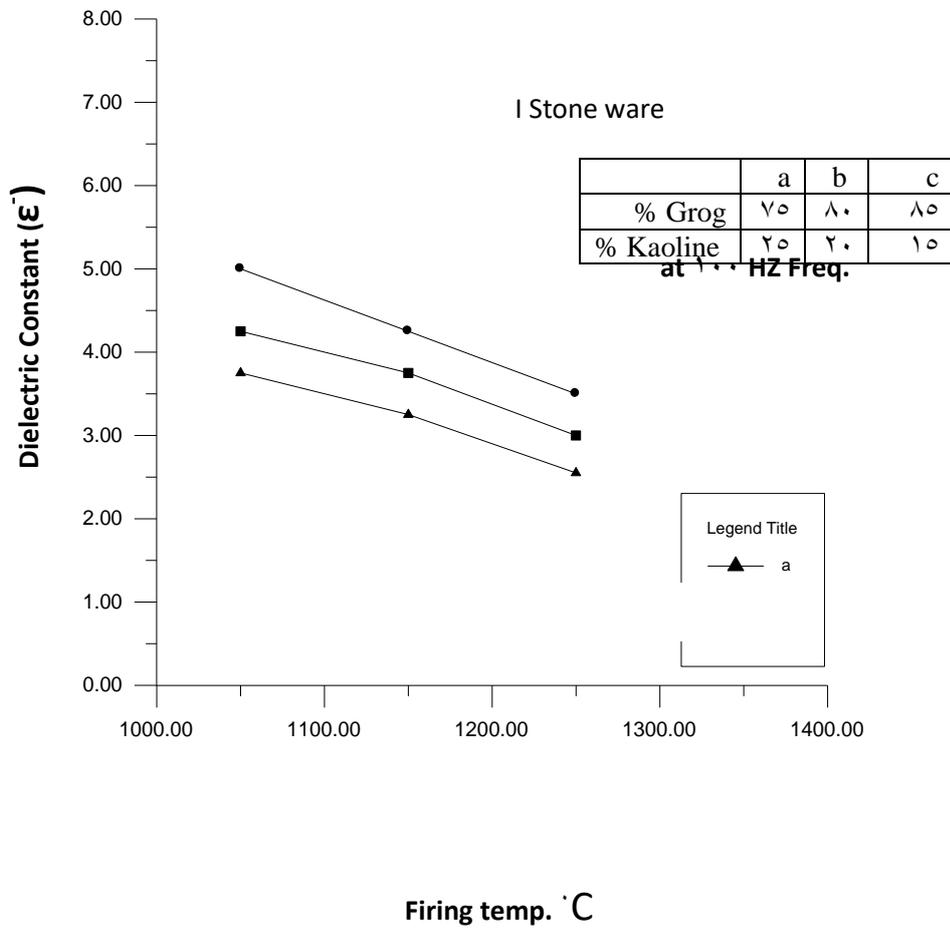
الشكل (٤-١٠) يوضح العلاقة بين متانة العازل - درجة حرارة الحرق
لمادة (الخزف الصيني)

٤.٥.٢ ثابت العزل (ϵ')

الشكل (٤ - ١١) يوضح العلاقة بين ثابت العزل (ϵ') ودرجة حرارة الحرق للخزف الحجري . إذ يبدو ثابت العزل بالدرجة (1050°C) أعلى منه في درجة (1250°C) ولجميع النماذج ، والسبب في ذلك يعود إلى أن المسامية في درجات الحرق الواطئة تكون عالية نسبياً ، مما يسبب ذلك زيادة في الاستقطابية الناشئة من الشحنات الفراغية عند الترددات الواطئة [٥٥] . وقد لوحظ من الشكل نفسه ، أن النماذج للخلطة (c) ذات ثابت عزل أعلى من بقية النماذج لبقية الخلطات ، وقد يعود السبب في ذلك ، إلى أن المحتوى

العالي لهذه النماذج من الخلطة (c) من المولايت والكريستوبلايت ، وبالتالي فإن عدد الدايبولات

بوحددة الحجم سوف يزداد ، وبالتالي سوف يزداد عدد الدايبولات المستقطبة ، والتي تدور مع تأثير المجال الكهربائي [٥٥] .

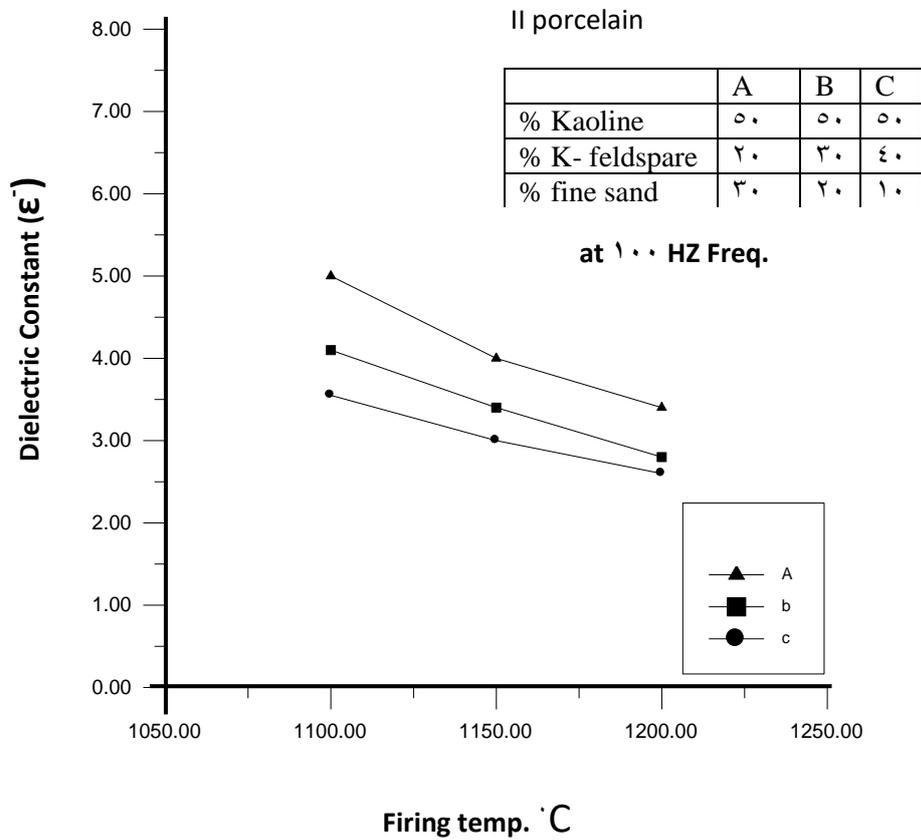


الشكل (١١-٤) يوضح العلاقة بين ثابت العازل (ϵ') حرارة الحرق

لمادة (الخزف الحجري)

الشكل (١٢ - ٤) يبين العلاقة بين ثابت العزل (ع) ودرجة حرارة الحرق للخزف الصيني . ويلاحظ من هذا الشكل بأن النماذج للخلطة (A) تمتلك ثابت عزل

أعلى من بقية النماذج للخلطتين (C, B) ، و يعزى ذلك إلى المسامية العالية لهذه النماذج والتي تؤدي إلى زيادة في الاستقطابية الناشئة من الشحنت الفراغية ، فضلاً عن ذلك ، فإن النماذج في الخلطة (A) ذات محتوى أعلى من السليكا ، مما جعلها تملك نسبة أعلى من مركبات المولايت والكريستوبلايت ، والتي تمتاز بثابت عزل أعلى من الطور الزجاجي ، الذي يمكن أن يظهر في النماذج الأخرى لبقية الخلطات (C, B) [٥٥] . كما وجد بأن النماذج التي أحرقت بدرجات حرارة (١٢٠٠°C) قد أظهرت قيمةً منخفضةً لثابت العزل ، وهذا يعزى إلى الانخفاض في المسامية لهذه النماذج ، مما أدى إلى التقليل من الاستقطابية التي تنشأ من الشحنت الفراغية .



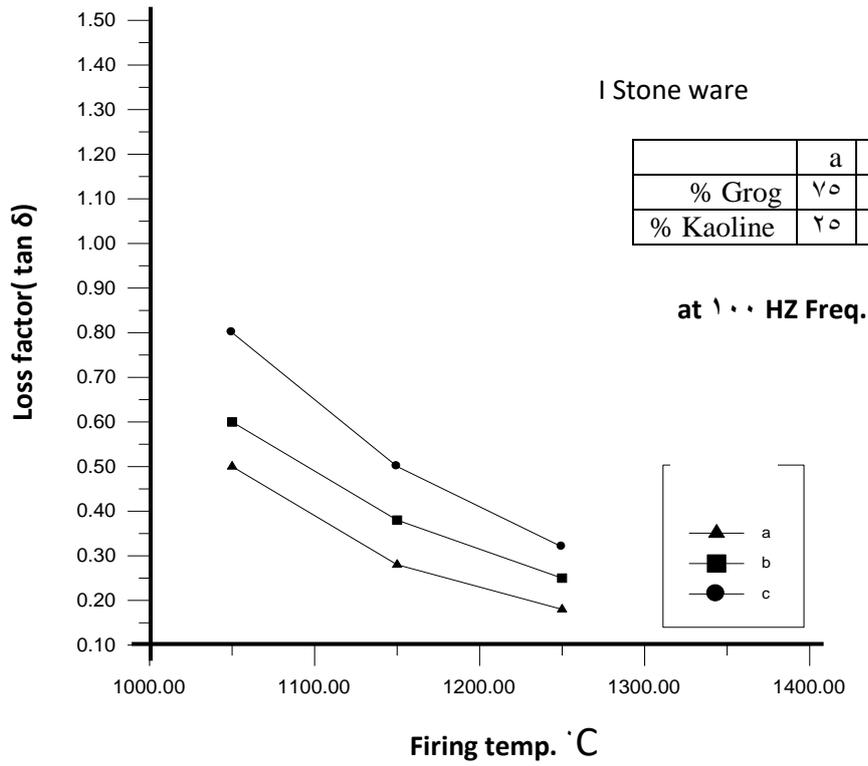
الشكل (٤-١٢) يوضح العلاقة بين ثابت العازل (ϵ') حرارة الحرق-

لمادة (الخزف الصيني)

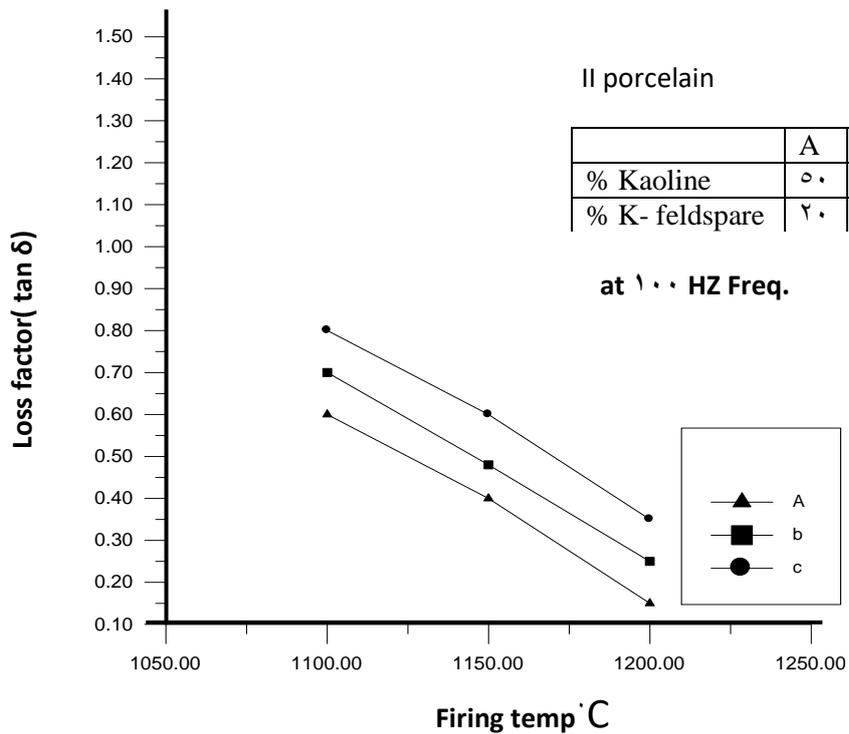
٣.٥.٤ عامل الفقد (الفقد العزلي)

الشكل (٤ - ١٣) يبين العلاقة البيانية بين عامل الفقد ($\tan \delta$) ودرجة حرارة الحرق للخزف الحجري . ويلاحظ من الشكل ، إن الفقد العزلي ($\tan \delta$) يكون أقل ما يمكن لنماذج الخلطة (a) ، وبدرجة حرارة حرق (1250°C) . والسبب في ذلك يرجع إلى زيادة محتوى الكاؤولين في هذه النماذج ، وهذا يعني زيادة في نسبة الألومينا (التي تتميز بالايصالية الواطئة) ، وعند الحرق بدرجة (1250°C) ، فإن هذه النسبة من الألومينا ستؤدي إلى تكوين زيادة في الأطوار المستقرة ومنها المولايت . وهذه الأطوار تلعب دوراً كبيراً في تحديد مقدار الفقد العزلي ، إذ أن المجال الكهربائي المسلط يؤثر على الإلكترونات الحرة في المادة ، وعلى الأيونات والفراغات الموجودة . مع ذلك ، فإن حركة الشحنات خلال المادة تتباطأ عندما تلاقى أي طور في المادة بسبب حدود تلك الأطوار ، مما يؤدي إلى تقليل التوصيلية ، وبالتالي تناقص الفقد العزلي .

أما بالنسبة للشكل (٤ - ١٤) فهو يبين العلاقة بين عامل الفقد ودرجة حرارة الحرق للبورسلين . وقد لوحظ من الشكل ، بأن نماذج الخلطة (A) ، قد أعطت أقل ما يمكن من عامل الفقد وبدرجة حرارة (1200°C) . إن السبب في ذلك يرجع إلى الزيادة في محتوى السليكا في نماذج هذه الخلطة ، والذي يؤدي إلى زيادة في تكوين الأطوار المستقرة ومنها المولايت ، وكما ذكر ، وهذه الأطوار تلعب دوراً في تحديد الفقد العزلي ، بسبب ما موجود من حدود بين تلك الأطوار التي تؤدي إلى تقليل التوصيلية ، وبالتالي تناقص لهذه النماذج [٥٥] .



الشكل (١٣-٤) الذي يبين العلاقة ما بين عامل الفقد ($\tan \delta$) ودرجة حرارة الحرق لمادة الخزف (الحجري)



الشكل (١٤-٤) الذي يبين العلاقة ما بين عامل الفقد ($\tan \delta$) ودرجة حرارة الحرق لمادة (الخزف الصيني)

لقد تبين من خلال النتائج بأن الخلطتين "a" , "C" هي افضل الخلطات ولكلا المادتين الخزف الحجري ، والخزف الصيني لذا فقد تم مقارنة قيمها مع المقياس العالمي لخواص العوازل حيث وضعت هذه القيم بالجدول (١-٤) وكما يأتي :

الجدول (١-٤) يبين مقارنة الخواص القياسية المستخدمة في العوازل الكهربائية مع الخواص التي تم الحصول عليها

الخاصية Property	القياسي [٧١] Standard	الخاصية للخلطة "a" من الخزف الحجري	الخاصية للخلطة "C" من الخزف الصيني
الكثافة Density	(٢.٣-٢.٥)g/cm ^٣	(٢-٠)/cm ^٣	(٢.٨) g/cm ^٣
امتصاصية الماء Water Absorption	(٢)%	(١٥)%	(٧.٩)%
درجة حرارة الاشتغال الآمنة Save Operating Temperature	١٠٠٠ °C	أكبر من ١٠٠٠ °C	أكبر من ١٠٠٠ °C
مقاومة الانضغاط Compressive strength	(٣.٦٢-٧.٢٥)MPa	(٤٢)MPa	(٨٧.٥)MPa
معامل السكر Modulus of Rupture	(١.٣-٢.٢)MPa	(١١.٥)MPa	(١٥)MPa
الصدمة الحرارية Thermal Shock	وسط - جيد	ممتاز	ممتاز
متانة العازل Break Down	(٩.٨٥-١٥.٧٦) KV/mm لسمك ٦mm or (١/٤)inch	(٩.٥) KV/mm لعينة ذات سمك (٣mm)	(١٣.٢) KV/mm لعينة ذات سمك (٣mm)
ثابت العزل Dielectric Constant	(٦-٧)at(٤٠-٥٠)Hz Freq.	(٢.٥)at ١٠٠Hz Freq.	(٢.٧)at ١٠٠Hz Freq.

مما مر نلاحظ بأن الخلطة "C" للخزف الصيني هي الأكثر ملائمة في تصنيع العوازل ذات الضغط العالي (High tension) لما تمتلكه من متانة عزل عالية مع مقارنتها بالقياسي اضافة الى خواصها الميكانيكية الجيدة .

اما الخلطة "a" للخزف الحجري فأنها تبدو اقل متانة من سابقتها وذات خواص ميكانيكية عالية ايضاً ولهذا فأنها تصلح ان تستخدم للعوازل المنزلية ذات الجهد الواطئ (Low Voltage) بعد ان تم مقارنتها بالقياسي .

- من خلال ملاحظة نتائج مقاومة الانضغاط ، ومقاومة الانحناء ، وجد أن قيم مقاومة الانضغاط مرتفعة ، في حين أن مقاومة الانحناء منخفضة كثيراً ولكلا المادتين (الخزف الحجري والخزف الصيني) ، وهذا متوقع لأن الجسم السيراميكي يسلك هكذا . لهذا فعند استخدام المادة السيراميكية في صناعة العوازل ، فإنها تصمم بالشكل الذي تكون القوى المسلطة عليها قوى انضغاط وليست قوى شد ، إذ يستخدم الحديد المطاوع في الأجزاء الخارجية للعازل ، التي تكون معرضة لأجهادات شد الخطوط وإجهادات التثبيت بالبراغي ، وبهذا نضمن بأن المادة السيراميكية الموجودة تحت هذه الأجزاء بحالة إجهاد ضغطي ، ولهذا فإن العازل سيكون صامداً إزاء هذه الأحمال .

- بعد مقارنة نتائج الاختبار العملية لكلا المادتين (الخزف الحجري والخزف الصيني) وجد بأن نماذج الخلطة " C " لخزف الصيني Porcelain والتي تكون من (% ٥٠ sand + ١٠% feld spare + ٤٠% Kaolin) ذات مسامية وأمتصاصية اقل مايمكن في بقية الخلطات وخصوصاً عند درجة حرق

١٢٠٠ °C . كما أنها قد سجلت أعلى قيمة لمتانة العزل الكهربائي حيث بلغت Kv/mm "١٣.٢" . بالإضافة الى خواصها الميكانيكية العالية إذ بلغت مقاومة الانضغاط لها "٨٧.٥MPa" لذا فإن هذه الخلطة تعد الأكثر ملائمة لصناعة عوازل الضغط العالي .

- لقد وجد أن النماذج التي تتصف المسامية العالية قد أظهرت قيماً مرتفعة لثابت العزل ، على العكس من النماذج التي تتصف المسامية الواطئة ، التي أظهرت قيماً منخفضة لثابت العزل . إن المسامات يتخللها الهواء ، وبالتالي فإنها ستعمل بمثابة متسعات مربوطة مع بعضها ، لذا فإنها ستؤدي إلى زيادة العازلية .

الفصل الخامس

الاستنتاجات والتوصيات والمقترحات

Conclusions

١-٥ الاستنتاجات

لقد أظهرت مناقشة نتائج العمل في هذا البحث نقاطاً عديدة يمكن أخذها بنظر الاعتبار عند التصميم، أو الاستخدام العلمي لعوازل الضغط العالي التي تعمل في أجوائنا . ومن اهم هذه الاستنتاجات التي تم التوصل إليها في هذا البحث هي :-

أولاً:- دراسة إمكانية استثمار خامات الكاؤولين العراقي ، بعد أن يتم تنقيته وتركيزه في صناعة العوازل السيراميكية ذات المقاومة لأجوائنا .

ثانياً:- من خلال ملاحظة نتائج اختبار المسامية ، وجد أن المسامية قد بلغت (٢٠ %) للخزف الحجري ، بينما سجل البورسلين (٢٤ %) ، وان هذه القيم تنخفض مع ارتفاع درجة حرارة الحرق حتى بلغت (١٥ %) للخزف الحجري عند درجة حرق (١٢٥٠ °C) ، بينما كانت (١٢ %) للبورسلين عند درجة حرق (١٢٠٠ °C) ، إن هذه القيم لازالت مرتفعة لذا يجب الوقوف عليها من خلال السيطرة على عدد من العوامل :-

أ. ضغط التشكيل الذي يجب أن يكون متجانساً على جميع أجزاء المنتج ، لهذا تستخدم مكابس ذات اتجاهين في تسليط القوة ، بحيث تعطي نموذجاً ذو قوى كبس متجانسة ، وذات حبيبات متقاربة ، بحيث تكون المسامية أقل ما يمكن .

ب. رفع درجة حرارة الحرق لكلا المادتين ، وهذا يتطلب وجود أفران ذات سعة حرارية عالية ، يصل مدى الحرارة فيها إلى (١٦٠٠ °C) ، وبهذا نضمن المدى الذي تحصل فيه عملية التلييد بشكل كامل ، بحيث يؤدي ذلك إلى حصول تقارب للحبيبات مع بعضها البعض ، وبذلك تقل المسامية ، هذا بالنسبة للخزف الحجري ، أما البورسلين فإن رفع درجة حرارة الحرق يؤدي إلى ضمان الحصول على الطور السائل الذي يتخلل المسامات ويغلقها ، وبذلك تقل المسامية .

ج. رفع درجة حرارة الحرق بمعدلات بطيئة لا تتجاوز ($30^{\circ}/\text{min}$) ، لكي يتم زيادة احتمالية تكون المولايت بأقل درجة حرارة حرق مع تحول للسليكا إلى الأطوار المستقرة ، التي لا تسبب تغيراً في أبعاد المنتج لاحقاً .

ثالثاً:-النماذج ذات المسامية القليلة ، أظهرت متانة عزل كهربائي عالي ولكلا المادتين ، إن هذا مقرون بالبنية الداخلية للنموذج ، وبكون الأطوار المستقرة التي تعين انتقال الشحنات عبر المادة ، وبالتالي الزيادة في استقرارية العازل .

رابعاً :- بما أن العازل معرض لظروف الجو الاعتيادي من البرد والأمطار شتاءً ، إلى حرارة الشمس صيفاً ، لذا فإنه يصمم بشكل اسطواني متعدد الأقطار ، إذ يكون قطر الاسطوانة العلوي أكبر من قطرها السفلي ، والسبب في ذلك لكي يكون مستقر الشحنات الكهربائية مسلكاً للنقل على السطح الخارجي ، وبذلك يمنع حدوث التفريغ ، إذ إن وجود التموجات هو لتجنب تكوين طبقة مستقرة من الماء أو الثلج ، والتي قد تؤدي إلى حصول قصر في الدائرة الكهربائية ، إذ أن طبقات العازل تقي بعضها البعض بحيث تحافظ السطوح الخارجية على السطوح الداخلية جافاً نسبياً في ظروف جوية رطبة .

١. إن صناعة العوازل تلحق بعملية أخرى هي عملية التزجيج لسطح العازل ، وذلك لسببين :
أ. لأن الزجاج خالٍ من المسامات ، وبهذا فهو يحمي السيراميك الذي تحته من مياه الأمطار .
ب. معامل تمدد الزجاج أقل بكثير من معامل تمدد السيراميك ، لهذا فإن الزجاج سيعمل بمثابة طبقة حامية للسيراميك أثناء تعرضه لأجواء متغيرة .
٢. استخدام بعض الإضافات الأخرى مثل (ZrO_2 , Al_2O_3) لتحسين بعض الخواص الميكانيكية لهذا النوع من السيراميك .
٣. استخدام تقنيات بطرائق تصنيع أخرى ، لغرض الحصول على مختلف الأشكال البسيطة منها والمعقدة .
٤. استخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) في تحديد البنية المجهرية الدقيقة لهذا النوع من المنتجات ، كما تستخدم بعض الأجهزة كالمجهر الحراري في تحديد درجة حرارة الحرق للمادة السيراميكية .
٥. استخدام الأفران المفرغة جزئياً من الهواء عند إجراء الدراسات والبحوث التقنية .

References

المصادر

- [١] Mikell P. Grover "Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials Processes and Systems".lehigh University , Prentice Hall. ١٩٩٩.
- [٢] Kingery, W.D .Bawen ,H.K, Uhlmann , D.R "Introduction to Ceramics"., ٢nd Edition Wiley New York. ١٩٧٦.
- [٣] George Y. Onoda Jr. and Larry L. Hench "Ceramic Processing before Firing," John Wiley & Sons . ١٩٧٨.
- [٤] Inter Ceram (International Ceramic Review). Vol. ٤١, No. ٤٣. ١٩٩٥, Germany.

[٥] Shigeyuki. S. "Advanced technical Ceramics". Academic press
١٩٩٢

[٦] www.isolationline.net/Arabic/science/٢٠٠١/٠١/article٢١.shtm.

[٧] Inter Ceram (International Ceramic Review). Vol. ٤١, No. ٢.
١٩٩٤, Germany.

[٨] Intermetallies. www.elsevier.com/locate/internet.

[٩] Felix .S and Sonjas. S "Industrial Ceramics". Printed by photo
lithograph , Germany . ١٩٧٦

[١٠] Hartshorn Phys, Soc,proc, ٣٧, ٢١٥. ١٩٢٥.

[١١] Boning, Zeit Phys, Soc, ٣٧, ٤٢. ١٩٥٤.

[١٢] D.M. Bowie Electrical Manufacturing. ٦٢, ١٤٤. ١٩٥٨.

[١٣] Dye and Hartshorn Phys, Soc, ٣٧, ٤٢. ١٩٥٤.

[١٤] Abd-El-Nour, K.N. AL-Ani, A.S.J " Dielectric of some clay ,
Feldspar Ceramic bodies at the low Frequency "Central Glass and
Ceramics Research Institute Bulletin". Vol. ٣٤,(No. ٣). ١٩٨٧.

[١٥] Hong Y" Effect of Firing Atmosphere on the Properties of
electrical Porcelain" International Ceramic Review, Vol. ٤٣,(
No.٤). ١٩٩٤. PP. ٢٦٨-٢٦٩ .

[١٦] D.A. Robinson "Calculation of the Dielectric Properties of the
Temperate and Tropical Soil Minerals from Ion Polarizabilities
using the Clausius –Mosotti Equation "Soil science Society of
American ٢٠٠٤.

[١٧] Syryasarthi. B and P.A. Mahanwar"Effect of flyash on the
Mechanical thermal , Dielectric Rheological and Morphological

Properties of Filled Nylon 6" Journal of Minerals Engineering.
Vol. 3 No. 2. PP. 60-72. (2004).

- [18] Norton F.H. "Element of Ceramics". 2nd ed , Addison- Wesley
Pub . Com, Inc Philippines . 1974 P(30, 114-120, 126-132)
- [19] Choudhury S.K.H. "Material Science and Process" Indian Book
Distributing Co. 1980 P 603.
- [20] W. Bolton. "Engineering Materials Technology". Third edition.
Prentice , Hall.(1998)P290, 291, 300.
- [21] Rado Paul, F.I. Ceram "An Introduction to the Technology of
Pottery" 2nd edition .
- [22] Krauskopf, K.B: "Introduction to geochemistry" P, 221. McGraw
Hill. N.Y. (1967).
- [23] P.P Bndnikev. "The Technology of Ceramics and Refractory".
M.I.T. Press. Bndikev. 1964.
- [24] James D. Dana, "Manual of Mineralogy". 2th John Wiley &
Sons. 1980.
- [25] Michael J. Potter "Feldspar and Nepheline ". Syntine. 1998.
- [26] Brownell, W.E., "Structural Clay Products"., Wien New York.
1976. PP (1-22, 199-206)
- [27] Worrall, W.E. " Ceramic Raw Materials"., 2nd ed., Institute of
Ceramics. London. PP. (16-22, 26, 46-48, 96) 1982 .
- [28] Donald R. Askeland "The Science and Engineering of Material"
1984.

- [٢٩] Worrall, W.E, "Clays: Their Nature Origin and General Properties". Maclaren& Sons. London. PP. (٣٩. ٩٤, ١٠٦, ١٠٨) ١٩٦٨.
- [٣٠] Carlos Suchicital. MSE "Ceramics Processing". ١٩٩٨.
- [٣١] ذكرى مهدي ، هندسة انتاج ومعادن ، الجامعة التكنولوجية -١٩٩٩ . اطروحة ماجستير
- [٣٢] Ceramic Industry "The Energy Conservation Center".. Japan. ١٩٩٤.
- [٣٣] Anilkumar.S. "Powder Metallurgy". ٢nd edition. ١٩٨٧.
- [٣٤] Lawrence. H. Van Vlack "Materials for Engineering Concepts and Application." Addison Wesley Publishing Com.U.S.A ١٩٨٢.
- [٣٥] Michel W.Barsoum "Fundamentals of Ceramics".Drexel University.PP(٣٣١-٣٨٩,٣٩١-٤٣٨) ١٩٩٧
- [٣٦] C. Herring .APple, Phy. ٢١, J.: ٣٠١ - ٣٠٣. ١٩٥٠.
- [٣٧] Webmaster. "Katholieke Assisted sintering Technology for densification of nonostructured Powders " , Katholieke Universiteit teuven, ١٩٩٩.
- [٣٨] Henry H.H. Hausner and M. Mall . "Handbook of powder Metalurgy". ٢nd edition. Chemical Publication Co. Inc. ١٩٨٢.
- [٣٩] Tony H ." The magic of Fire". Alberta Canada. ١٩٩٦.
- [٤٠] Michael F. Ashby. "Engineering Materials, an Introduction to Microstructure, Processing and Design".PP(١٦٢). ١٩٨٦
- [٤١]. KittelL. "Introduction to Solid Physics", John Wiley & Sons Inc. New York.(١٩٨٩).

- [٤٢] Nosbusch, H. Milchell. "Clay-Based Materials for the Ceramics Industry". I.V. Elsevier Applied Science. London.. PP. (١٠١ - ١١٥ and ٣٩ - ٤٨) ١٩٩٨ .
- [٤٣] Clements, J. F., Vyse.J. "A Comparison of Methods Measuring Pore-Size Distribution in Refractories". Tran. J. Brit. Ceram Soc. Vol. ٦٧.(No. ٧). ١٩٦٨ (PP. ٢٨٥).
- [٤٤] Ryan, W., Radford. "White Wares: Production, Testing and Quality Control." The Institute of Ceramics. Pergamon Press. UK. ١٩٨٧. PP.(١٩٧, ٢٢٤ - ٢٣٣).
- [٤٥] R. Peters Iberg, R., "Mineralogical Changes during Firing of Calcium Rich Brick Clays".. Ceramics Bul. Vol. ٥٧. No. ٥ (١٩٧٨). PP. (٥٠٣ - ٥٠٦)
- [٤٦] Chester, J.H "Refractories: Production and Properties". ٥th ed. The Iron and Steel Institute. House Press. London. ١٩٧٣. PP. (٤-٨, ٤٢٥-٤٣٠).
- [٤٧] Essen S.H. Internationa"Chemical and Physical Reactions in Heavy Clay Bodies during Firing". Ziegelindustrie ١. July and Aug. ١٩٨١. PP. (٣٨٧-٣٩٧, ٣٤١-٣٤٢).
- [٤٨] Patl-Mangonon. Ph.D P.E.FASM "The Principles of Materials Selection for Engineering Design".by Prentic Hall, Inc. ١٩٩٩
- [٤٩] MEYERS. C "Mechanical Behavior of Materials". ١٩٩٩.
- [٥٠] R.S. Khurmi and R.S. Sedha "Material Science ".. ٢nd ed. ١٩٨٩.
- [٥١] "Encyclopedia of Materials Science and Engineering" Volume ٢ Pergaman Press(١٩٨٦).
- [٥٢] E.R. Dobbs, "Electromagnetic Waves". Cox and Wyman Ltd London. ١٩٨٥.

- [٥٣] M.A. Omer "Elementary Solid State Physics". ١st ed. Addison Wesley Pub. Co. ١٩٧٥.
- [٥٤] H.P. Myers "Introductory Solid State Physics". Taylor and Francis ١٩٩٠.
- [٥٥] Pampuch, R. "Ceramic Materials: an Introduction to their Properties" Elsevier Scientific Pub. Comp. Amsterdam. ١٩٧٦.
- [٥٦] Tareev, B. "Physics of Dielectric Material", Mir Publishers Moscow. ١٩٧٩.
- [٥٧] Hooper, A. "Electrical Breakdown in Beta-Alumina Ceramics" Trans. J. Brit.. Ceram. Soc. Vol. ٧٩. No. ٥. ١٩٨٠. PP. ١٣٤-١٣٨.
- [٥٨] "Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity and Apparent Specific Gravity of Fired White Ware Products" "ASTM" Standards, C ٣٧٣-٨٨. ١٩٨٨
- [٥٩] David K. Felbeck. Antony G. Atkins "Strength and Fracture of Engineering Solids". ٢nd ed. Prentice Hall. Inc. ١٩٩٦.
- [٦٠]. "Standard Test Method for Compressive (Crushing) Strength of Fired White Vol. ٠٨.٠١, C٧٧٣-٨٨-١٩٨٨.
- [٦١] "Standard Test Method for Flexural Properties of Ceramic White Ware Materials " "ASTM" Standrads, C ٦٧٤-٨٨.١٩٨٨ .
- [٦٢] "Standard Test Method for Environmental Resistance of Aerospace Transparencies". "ASTM" Standards, Vol. ٠٨.٠١. F ٥٢٠-٧٧. ١٩٨٣.
- [٦٣] "Standard Test Method for A.C Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Carstant) of soild Electrical Insutating Materials" "ASTM" Standards, Vol ١٠-٠٢, D١٥٠-٨٧-١٩٨٧ .
- [٦٤] D. R. Dinger .Inter Ceram. Vol. ٤٤, No. ٦, (٣٩١-٣٩٨). ١٩٩٥.

- [٦٥] C.S. Prasad. Inter Ceram. Vol. ٤٦, No. ٣, (١٥٤-١٥٨). ١٩٩٧.
- [٦٦] M. Flomizaki. Inter Ceram. Vol. ٤٤, No. ٤, (٢٢٣-٢٢٨). ١٩٩٥.
- [٦٧] C.A. Sikalidis .Inter Ceram. Vol. ٤٦, No. ٤, (٢٢٧-٢٣٠). ١٩٩٧.
- [٦٨] Ilmash T. Mazdiyasni, K.S. "Mechanical Properties of Mullite", J. Am. Ceram. Soc. Vol. ٦٦, No. ١٠. ١٩٨٣. PP. ٦٩٩-٧٠٣.
- [٦٩] K.N. Maiti. J. Brit. Ceram. (٨٩), (٢٤ - ٢٧). ١٩٩٠.
- [٧٠] Hill G.H. Morse, C.T. The Effect of Porosity on Electric Strength of Alumina". Dielectric Mat, Measure and APP. IEE, No. ٦٧. July ١٩٧٠.

[٧١] Charles A- Harper , " Hand book of Ceramics Glasses and Diamonds " , McGraw-Hill Companies Inc. ٢٠٠١

[٧٢] ناهض حسون علوش . دراسة (ZnFe_٧O_٤) على الخواص الكهربائية للمجموعة
تأثير

اضافة المركب (Zn_xNi_{١-x-y}Guy Fe_٧O_٤) رسالة ماجستير – كلية العلوم –
الجامعة المستنصرية. ٢٠٠٥

[٧٣] احمد فالح حسن العمر " دراسة امكانية استثمار خامات الكاولين والسيلكا العراقية في
انتاج مواد سيراميكية مقاومة للتآكل " . رسالة ماجستير ، هندسة الانتاج للمعادن –
الجامعة التكنولوجية .

[٧٤] شهاب احمد زيدان " تحضير العوازل الكهربائية من الكاولين العراقي
" رسالة ماجستير ، كلية التربية ، جامعة بغداد .

TABLE 3 *d*-spacings, intensities, and *hkl* of common sedimentary minerals.
(Continued)

15			16			17			18			19			20			21		
Gibbsite			Phillipite			Hemlandite			Cristobalite, Low			Aragonite			Calcite			Dolomite		
<i>d</i> (Å)	I	<i>hkl</i>	<i>d</i> (Å)	I	<i>hkl</i>	<i>d</i> (Å)	I	<i>hkl</i>	<i>d</i> (Å)	I	<i>hkl</i>	<i>d</i> (Å)	I	<i>hkl</i>	<i>d</i> (Å)	I	<i>hkl</i>	<i>d</i> (Å)	I	<i>hkl</i>
4.85	100		7.64	100		8.90	100		4.04	100	101	4.21	2	110	3.86	12	102	4.03	3	101
4.37	40		6.91	100		7.94	20		3.14	12	111	3.40	100	111	3.04	100	104	3.69	5	102
4.31	20		6.34	20		6.80	10		2.85	14	102	3.27	52	021	2.85	3	006	2.89	100	104
3.35	6		5.24	50		6.63	10		2.49	18	200	2.87	4	002	2.50	14	110	2.67	10	006
3.31	10		4.91	50		5.92	10		2.47	6	112	2.73	9	121	2.29	18	113	2.54	8	105
3.18	7		4.56	20		5.56	10		2.34	<1	201	2.70	46	012	2.10	18	202	2.41	10	110
3.10	4		4.25	70		5.24	10		2.12	4	211	2.48	33	200	1.927	5	204	2.19	30	113

Fig. 3. d spacings, intensities, and hkl of common set.

d(A)	I	hkl	vulgar	P	A	C	S								
								1	2	3	4	5			
4.76	35	100	6.66	10	110	6.39	20	001	6.87	<10	200	14.2	80	001	5
3.34	100	101	6.52	20	020	5.64	2	111	5.61	80	211	7.12	100	002	4
2.46	12	110	5.87	20	111	5.59	2	111	4.86	40	220	4.75	80	003	3
2.28	12	102	4.25	60	201	4.01	16	201	3.67	20	312	3.56	60	004	2
2.24	6	111	3.94	20	111	3.66	8	111	3.43	100	400	2.85	40	005	1
2.13	9	200	3.87	10	200	3.78	25	111	2.93	80	317	2.58	30	002	1
1.980	6	101	3.79	100	100	3.68	20	130	2.80	20	412	2.55	50	001	1
1.817	17	112	3.70	131	3.66	16	130	2.69	50	810	2.55	50	201	132	
1.801	<1	003	3.56	20	211	3.51	10	112	2.51	50	511	2.44	40	132	
1.692	3	100	3.46	68	112	3.41	10	112	2.51	50	440	2.44	40	103	
1.659	3	100	3.33	100	220	3.48	2	221	2.43	30	440	2.44	40	103	
1.608	<1	210	3.28	70	202	3.80	8	112	2.33	40	432	2.38	20	133	
1.541	15	211	3.26	50	040	3.20	100	002	2.33	40	432	2.27	30	102	
1.453	3	113	3.22	90	002	3.15	10	220	2.17	<10	620	2.27	30	102	
			3.00	60	131	2.96	10	131	2.17	<10	541	2.04	20	007	
			2.93	20	222	2.93	16	022	2.01	10	631	2.04	20	007	
			2.91	40	041	2.87	8	131	1.94	<10	541	2.01	40	135	
			2.84	2	132	2.84	2	132	1.94	<10	541	2.01	40	135	
			2.79	2	022	2.79	2	022	1.94	<10	541	2.01	40	135	
			2.64	8	242	2.64	8	242	1.96	50	640	1.96	50	206	
			2.56	8	242	2.56	8	242	1.96	50	640	1.96	50	206	
			2.54	2	212	2.54	2	212	1.87	40	711	1.83	30	205	
			2.51	2	112	2.51	2	112	1.83	<10	642	1.72	10	136	
			2.50	6	221	2.50	6	221	1.83	<10	642	1.72	10	136	
			2.46	6	221	2.46	6	221	1.74	60	651	1.67	10	137	
			2.44	4	241	2.44	4	241	1.72	30	800	1.57	20	208	
			2.43	2	151	2.43	2	151	1.72	30	800	1.57	20	208	
			2.41	2	240	2.41	2	240	1.69	40	811	1.54	60	198	
			2.39	4	310	2.39	4	310	1.69	40	811	1.54	60	198	
			2.32	4	311	2.32	4	311	1.66	10	820	1.50	20	192	
			2.28	2	113	2.28	2	113	1.66	10	820	1.50	20	192	
			2.19	4	042	2.19	4	042	1.62	20	822	1.49	10	0010	
			2.13	8	060	2.13	8	060	1.62	20	822	1.49	10	0010	
			2.12	6	151	2.12	6	151	1.60	20	743	1.48	20	191	
			2.09	2	241	2.09	2	241	1.60	20	743	1.48	20	191	
			2.04	2	241	2.04	2	241	1.60	20	743	1.48	20	191	
			2.00	2	203	2.00	2	203	1.58	30	744	1.48	20	191	
			1.980	4	061	1.980	4	061	1.58	30	744	1.48	20	191	
			1.977	2	421	1.977	2	421	1.58	30	744	1.48	20	191	
			1.890	8	222	1.890	8	222	1.48	20	191	1.48	20	191	
			1.855			1.855			1.48	20	191	1.48	20	191	

Note: The ~0.03 line distinguishes plate-like from K' field spin ball specific iden. of P4000K plate-like specimens difficult.

TABLE 3. *d*-spacings, intensities, and *hkl* of common sedimentary minerals. (Continued)

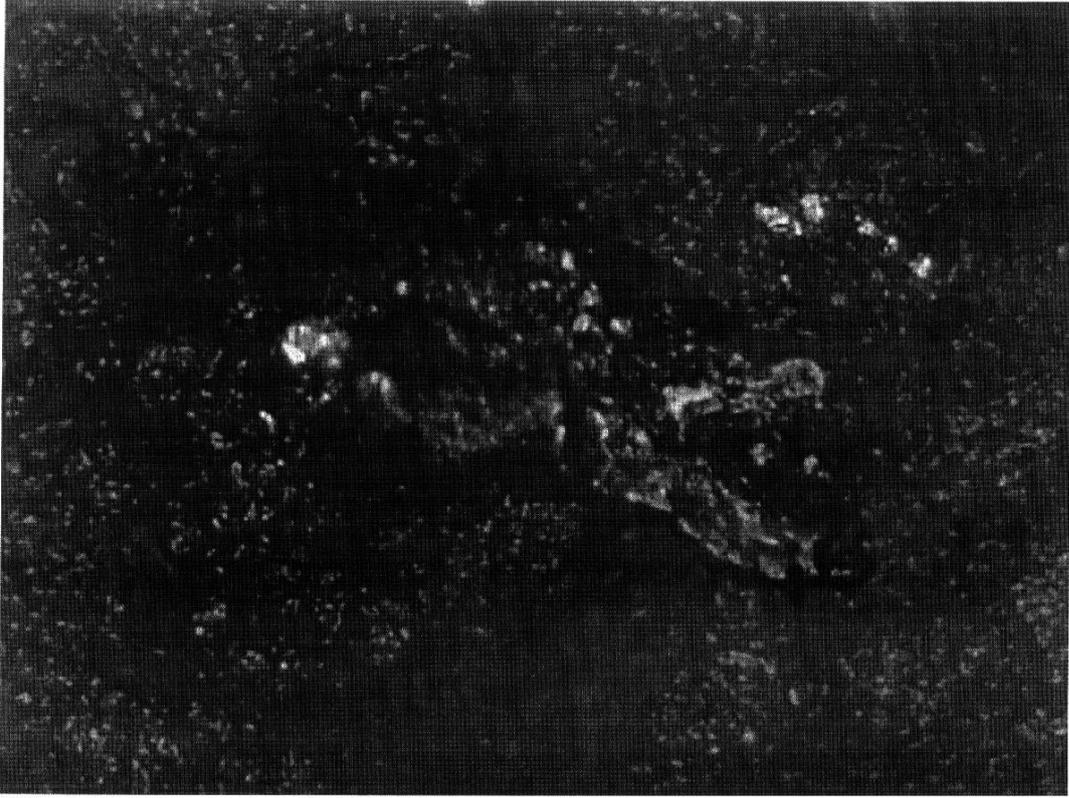
8	9	10	11	12	13	14
Verhulst	Monoclinic vs. b.c.	Glauconite, Viel. Ordered	Talc	Kaolinite	Hemite	Goethite
<i>d</i> (Å) <i>hkl</i>	<i>d</i> (Å) <i>hkl</i>	<i>d</i> (Å) <i>hkl</i>	<i>d</i> (Å) <i>hkl</i>	<i>d</i> (Å) <i>hkl</i>	<i>d</i> (Å) <i>hkl</i>	<i>d</i> (Å) <i>hkl</i>
144 VVS 002	~15 100 001	10.1 100 001	9.3 48 002	7.16 100* 001	3.67 35 102	4.98 15 030
120 VW 004	4.98 10 002	4.98 10 002	4.58 64 003	4.46 40 020	2.69 100 104	4.18 100 110
179 VW 006	~3 100 005	4.53 80 020	4.35 20 111	4.11 5 113	4.36 50 110	2.51 75 110
150 S 022	4.61 100 111	4.12 10 021	3.13 40 004	4.13 20 111	3.07 3 202	2.58 8 021
159 M 008	02 3.63 40 112	2.62 32 130	3.85 40 021	3.74 20 021	1.692 45 116	2.49 15 040
287 M 0010	2.56 80 113	1.33 60 002	2.49 100 204	3.57 100* 002	1.635 2 121	2.45 25 111
266 MW 300	2.22 30 122	3.09 40 112	2.22 14 206	3.17 40 111	1.597 15 108	2.35 10 111
360 M 004	1.692 60 115	2.67 10 003	2.10 8 204	3.14 30 112	1.484 20 214	2.19 20 140
255 MW 007	1.492 100 006	2.40 60 201	1.95 3 208	2.75 30 022	1.546 6 208	1.920 6 111
330 NS 004	1.289 60 110	2.26 20 217	1.72 11 113	2.53 40 101	1.310 10 118	1.770 2 111
217 VYW 208	1.138 208 005	2.21 10 041	1.60 2 0012	2.38 60 003	1.080 10 112	1.606 9 110
131 VW 138	with montmorillonite and interlayer cation popu-	2.15 20 202	1.53 64 132	2.29 80 131	1.809 10 111	1.564 15 110
201 VW 208	Most peaks are broad.	1.817 5 224	1.46 2 131	2.20 20 132	1.715 10 112	1.467 4 111
183 VYW 2010	suggesting mixed-layer stages.	1.66 308 310	1.27 3 0010	1.89 20 222	1.453 10 001	
146 W 2.014	Ethylene glycol solution must be used to certain iden-	1.511 60 060	1.495 10 310	1.939 40 132		
137 VYW 21018	tification.	1.307 10 200	1.307 10 200	1.891 10 131		
337 NS 330	The method of Brunton (1955) is sug-	1.258 10 420	1.839 40 202	1.619 60 133		
331 331	gested. It is over physical heated to 60°C in a diox. chamber.	1.859 20 114	1.781 40 003	1.584 40 134		
308 VYW 333		1.662 70 133	1.685 20 241	1.542 50B 134		
336 336		1.489 80 331	1.489 80 331			

4-0359 MINOR CORRECTION

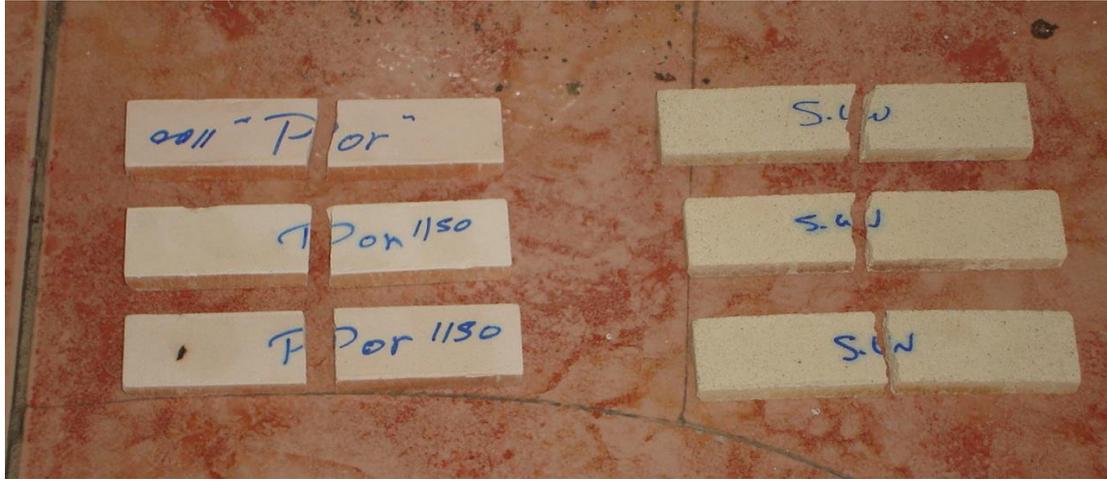
<i>d</i>	4.15	2.75	1.64	4.15	SiO ₂ (at 500°C)	SiO ₂
<i>I</i> / <i>I</i> ₁	100	60	100	100	Silica Di Oxide	BETA (HIGH) QUANTALITE
Rad. No	A 0.100	Filter Zn	Coll.	<i>d</i> Å	<i>I</i> / <i>I</i> ₁	<i>hkl</i>
Dis.	Cut off	d corr. abs.?		4.15	100	111
Ref.	SAATCH AND POKORNY, V. KRIST. 21, 381 (1932)			2.75	60	011
				1.64	100	002
				4.15	100	111
Sys. Origin	S.G. T ⁴ - P ₂ 3			2.75	60	011
at 7.18	A C			1.64	100	002

d	2.89	3.43	4.11	5.00	$Al_2O_3 + SiO_2$ *	Mullite (Mullite)	★	
1/h	100	95	60	50				Aluminum Silicate
Rad. CuK α	A 1.5405	Filter Ni	Dia.		d Å	hkl	d Å	hkl
Cut off	I/I, Diffractometer				5.39	50	1.7125	6
Ref.	National Bureau of Standards (U.S.) Monograph 25				2.774	8	1.7001	14
	Sec. 3 (1964)				2.428	95	1.6940	10
Sys.	Orthorhombic	S.G.	Pbam (55)		2.290	100	1.5999	20
a ₀	7.5456	b ₀	7.6898	c ₀	2.886	70	1.5780	12
c	#	γ	Z	3/4 Dx 3.177	2.691	40	1.5644	2
Ref.	Ibid.				2.542	50	1.5401	2
ε _a	1.637	n _{wB}	1.641	γ	2.428	14	1.5242	35
rv	D	mp		Color Colorless	2.395	<2	1.5067	<2
Ref.	Ibid.				2.308	4	1.4811	<2
					2.292	70	1.4731	<2
					2.006	60	1.4605	8
					2.121	25	1.4421	18
					2.106	8	1.4240	4
					1.969	2	1.4046	8
					1.923	2	1.3932	<2
					1.887	8	1.3494	4
					1.863	<2	1.3462	6
					1.841	10	1.3356	12
					1.7864	<2	1.3100	14
							Plus 24 lines to 1.0005	

Sample was prepared at NBS by C. Robbins. Spec. anal.: 0.61 to 0.1% Fe, and 0.001 to 0.01% each of Ca, Cr, Mg, Mn, Ni, Ti, and Zr. Pattern was made at 25°C. Chem. anal. showed 61.6 Al₂O₃, 38 (mole. %) SiO₂



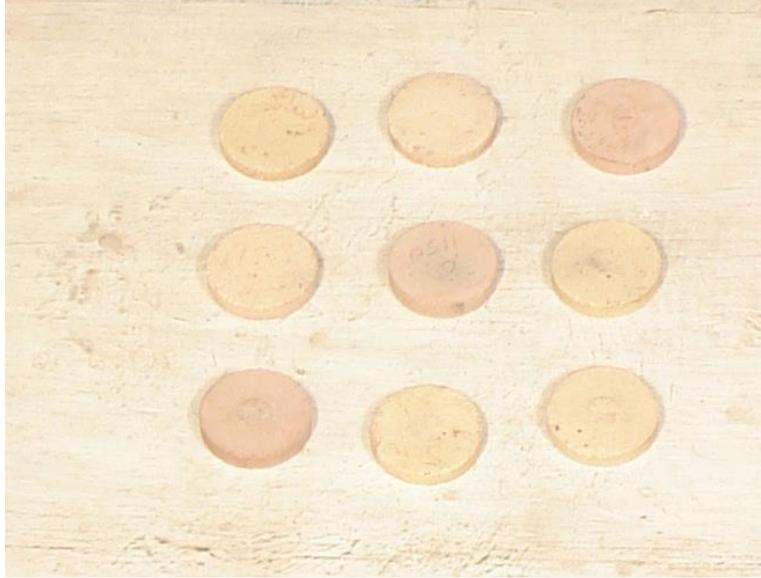
عينة فحص من مادة سيراميكية وقد حصل فيها أنهيار العازل (Break Down)



مجموعة من عينات الخزف الحجري والخزف الصيني بعد اجراء فحص مقاومة الانحناء



مجموعة من عينات الخزف الحجري والخزف الصيني بعد تحضيرها لاجراء فحص
مقاومة الانضغاط



مجموعة من عينات الخزف الحجري والخزف الصيني بعد اجراء اختبار الصدمة الحرارية



مجموعة من عينات الخزف الحجري والخزف الصيني بعد اجراء اختبار متانة العزل الكهربائي

الجدول (١-٤) يوضح العلاقة بين المسامية – درجة حرارة الحرق

للخزف الحجري

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	المسامية % Porosity		
	▲ a	■ b	● c
١٠٥٠ °C	١٨	١٩	٢٠
١١٥٠ °C	١٦	١٧	١٨
١٢٥٠ °C	١٥	١٦	١٧

الجدول (٢-٤) يوضح العلاقة بين امتصاصية الماء – درجة حرارة الحرق

للخزف الحجري

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	امتصاصية الماء % Porosity		
	▲ a	■ b	● c
١٠٥٠ °C	٩.٧	١٠.٨	١٢
١١٥٠ °C	٨.٣	٩.٥	٩.٩
١٢٥٠ °C	٨.١	٩.٣	١٠.٣

الجدول (٣-٤) يوضح العلاقة بين امتصاصية المسامية – درجة حرارة الحرق للخزف الصيني

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	المسامية % Porosity		
	▲ A	■ B	● C

١١٠٠ °C	٢٤	٢٢	٢١
١١٥٠ °C	٢٤	٢٠	١٩
١٢٠٠ °C	٢١	١٦	١٣

الجدول (٤-٤) يوضح العلاقة بين امتصاصية الماء - درجة حرارة الحرق

للخزف الصيني

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	Water Absorpts % امتصاصية الماء		
	▲ A	■ B	● C
١١٠٠ °C	١٥.٣	١٢.٨	١١.٦
١١٥٠ °C	١٥	١١.٦	١١
١٢٠٠ °C	١٣.٤	١٠.٣	٧.٩

الجدول (٥-٤) يوضح العلاقة بين مقاومة الانضغاط- درجة حرارة الحرق للخزف الحجري

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	مقاومة الانضغاط Compressive Strength		
	▲ a	■ b	● c
١٠٥٠ °C	١٨.٠٩	٢٠.٨٩	٢٨.٦٦
١١٥٠ °C	٢٣.٥٠	٢٧.٩٦	٣٢.٨٧
١٢٥٠ °C	٤٢.٠٣	٤٣.٩٥	٤٨.٦٦

الجدول (٦-٤) يوضح العلاقة بين مقاومة الانضغاط- درجة حرارة الحرق للخزف الصيني

درجة حرارة الحرق	مقاومة الانضغاط Compressive Strength
------------------	--------------------------------------

Firing Temp °C	▲ A	■ B	● C
1100 °C	77.39	72.61	71.33
1150 °C	82.36	77.39	77.26
1200 °C	122.74	110.76	88.85

الجدول (٧ - ٤) يوضح العلاقة بين معامل الانحناء - درجة حرارة الحرق للخزف الحجري

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	معامل الانحناء Modulus of rupture MPa		
	▲ a	■ b	● c
1050 °C	3	3.6	4.8
1150 °C	7.2	7.8	8.4
1250 °C	11.4	12	12.6

الجدول (٨-٤) يوضح العلاقة بين معامل الانحناء - درجة حرارة الحرق للخزف الصيني

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	معامل الانحناء Modulus of rupture MPa		
	▲ A	■ B	● C
1100 °C	12	11.4	10.2
1150 °C	13.2	12	11.4
1200 °C	16.8	15	15

الجدول (٩-٤) يوضح العلاقة بين متانة العزل - درجة حرارة الحرق للخزف الحجري

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	Dielectric Strength KV/mm		
	▲ a	■ b	● c
١٠٥٠ °C	٧.٤	٧	٦.٢
١١٥٠ °C	٧.٦	٧.٣	٦.٥
١٢٥٠ °C	٩.٦	٨.٩	٨.٥

الجدول (١٠-٤) يوضح العلاقة بين متانة العزل - درجة حرارة الحرق للخزف الصيني

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	Dielectric Strength KV/mm		
	▲ A	■ B	● C
١١٠٠ °C	٩.٢	٩.٩	١٠.٥
١١٥٠ °C	٩.٩	١٠.٥	١٠.٩
١٢٠٠ °C	١١.٦	١٢.٤	١٣.٢

الجدول (١١-٤) يوضح العلاقة بين ثابت العزل ϵ - درجة حرارة الحرق للخزف الحجري عند تردد ١٠٠Hz

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	Dielectric Constant ϵ		
	▲ a	■ b	● c
١٠٥٠ °C	٣.٧٥	٤.٢٥	٥
١١٥٠ °C	٣.٢٥	٣.٧٥	٤.٢٥
١٢٥٠ °C	٢.٥٥	٣	٣.٥

الجدول (١٢-٤) يوضح العلاقة بين ثابت العزل ϵ - درجة حرارة الحرق للخزف الصيني عند تردد ١٠٠Hz

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	Dielectric Constant ϵ		
	▲ A	■ B	● C
١١٠٠ °C	٥	٤.١	٣.٥٥
١١٥٠ °C	٤	٣.٤	٣
١٢٠٠ °C	٣.٤	٢.٨	٢.٦

الجدول (١٣-٤) يوضح العلاقة بين عامل الفقد $\delta - t$ " درجة حرارة الحرق للخزف الحجري عند تردد ١٠٠Hz

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	Loss Factor		
	▲ a	■ b	● c
١٠٥٠ °C	٠.٥	٠.٦	٠.٨
١١٥٠ °C	٠.٢٨	٠.٣٨	٠.٥
١٢٥٠ °C	٠.١٨	٠.٢٥	٠.٣٢

الجدول (١٤-٤) يوضح العلاقة بين عامل الفقد $\delta - t$ " درجة حرارة الحرق للخزف الصيني عند تردد ١٠٠Hz

درجة حرارة الحرق Firing Temp °C	Loss Factor		
	▲ A	■ B	● C
١١٠٠ °C	٠.٦	٠.٧	٠.٨
١١٥٠ °C	٠.٤	٠.٤٨	٠.٦
١٢٠٠ °C	٠.١٥	٠.٢٥	٠.٣٥

الجدول (١-٣) يوضح النتائج التي أظهرها مخطط صور الأشعة السينية للكاؤولين

2θ	I/I.	d(A ^o)	(hkl)	Phases
١٢.٢	٢٥٦٨	٧.٢١٣	٠٠١	Koalinite
٢٠.٢	١٥٢٩	٤.٣٨٩	١١٠	Koalinite
٢١.١	١٤٣١	٤.١٩١	١١١	Koalinite
٢٢.٩	١٠١٩	٣.٨٧٨	٠٢١	Koalinite
٢٤.٩	١٩٨٠	٣.٥٦٥	٠٠٢	Koalinite
٢٦.٦	١٥٠٩	٣.٣٤٥	١١١	Koalinite
٢٨.٢	٧٦٤	٣.١٥٠	١١٢	Koalinite
٣٨.٣	١١٥٦	٢.٣٤٤	١٠٢	Quartz
٥٠.٢	٤٩٠	١.٨١٤	١١٤	Koalinite
٥٥.٢	٦٤٧	١.٦٦٠	٢٠٤	Koalinite

الجدول (٢-٣) يوضح نتائج تحليل الأشعة السينية الى الكروك

2θ	I/I.	d(A ^o)	(hkl)	Phases
١٦.٢	١٤٣١	٥.٤٣٤	١١٠	Mullite
٢٠.٧	١١٧٦	٤.٢٧٤	١٠٠	Quartz
٢١.٦	٢٩٦٠	٤.٠٩٧	١٠١	Cristobalite
٢٣.٤	١٠٠٠	٣.٧٨١	٠٢١	Koalinite
٢٦.٤	٢٥٠٩	٣.٣٦٣	٢١٠	Mullite
٣٠.٨	٩٤١	٢.٨٩٣	١٠٢	Cristobalite
٣٣.١	١٠٥٨	٢.٦٩٨	٢٢٠	Mullite
٣٥.٣	١١٥٦	٢.٥٣٩	١١٢	Koalinite
٣٦.٨	٦٨٦	٢.٤٣٤	٢١١	Cristobalite
٣٩.٣	٧٤٥	٢.٢٨٥	١٠٢	Quartz
٤٢.٥	٧٦٤	٢.١٢٣	٢٣٠	Mullite
٤٤.٥	٥٨٨	٢.٠٣٢	٢٠٢	Cristobalite
٤٧.٨	٥٦٨	١.٨٩٦	٢١٢	Cristobalite
٤٩.٢	٥٨٨	١.٨٤٨	٣١١	Mullite
٥٠.١	٦٠٧	١.٨١٦	١١٢	Quartz
٥٣.٨	٦٠٧	١.٧٠١	٠٠٤	Cristobalite
٥٦.٤	٥٤٩	١.٦٢٧	٣٠١	Cristobalite

الجدول (٣-٣) يوضح النتائج التي أظهرها مخطط حيود الأشعة السينية للسليكا

2θ	I/I.	d(A ^o)	(hkl)	Phases
٢٦.٤	٥٠٠٠	٣.٣٦١	١٠١	α - Quartz
٣٦.٤	٩٨٠	٢.٤٦٠	١١٠	α - Quartz
٣٩.٢	١٠٠٠	٢.٢٨٥	١٠٢	α - Quartz
٤٠.٢	٦٦٦	٢.٢٣٨	١١١	α - Quartz

٤٢.٤	٧٤٥	٢.١٩٦	٢٠٠	$\alpha - Quartz$
٤٥.٦	٦٠٧	١.٩٨٣	٢٠١	$\alpha - Quartz$
٥٠.٢	١٢٧٤	١.٨١٤	١١٢	$\alpha - Quartz$
٥٤.٩	٥٨٨	١.٦٦٩	١٠٣	$\alpha - Quartz$

الجدول (٤-٣) يوضح النتائج التي اظهرها مخطط حيود الاشعة السينية للتلسبار

$2\theta^\circ$	I/I.	d(A')	(hkl)	Phases
١٣.٤	١٣٥٢	٦.٥٧٣	١١٠	Orthoclase
٢٠.٨	١٨٠٣	٤.٢٤٨	٢٠١	Orthoclase
٢٣.٥	٨٢٣	٣.٧٦٨	١٣٠	Orthoclase
٢٥.٤	٨٦٢	٣.٤٩٨	٢٢١	Orthoclase
٢٦.٥	٥٠٠٠	٣.٣٥١	٢٢٠	Orthoclase
٢٧.٣	٢٥٢٩	٣.٢٥٥	٠٤٠	Orthoclase
٢٩.٦	٧٠٥	٣.٠١١	١٣١	Orthoclase
٣٠.٧	٧٢٥	٢.٩٠٢	٠٤١	Orthoclase
٣٤.٨	٥٤٩	٢.٥٦٨	٢٤١	Orthoclase
٣٩.٣	٧٠٥	٢.٢٨٦	١١٣	Orthoclase
٤٢.٣	٨٠٣	٢.١٣٢	٠٦٠	Orthoclase
٤٥.٧	٦٤٧	١.٩٨٢	٠٦١	Orthoclase