



# تحضير سيراميك لخصائص التقلص الصفري من مواد محلية

رسالة تقدّم بها

أحمد موفق جواد

إلى مجلس كلية العلوم – جامعة بابل

وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير

في علوم الفيزياء

بإشراف

د. فاضل عبد رسن

د. طالب هادي قدوري

شباط ٢٠٠٧

محرم ١٤٢٨



# **Preparation of Ceramics for Zero**

**Shrinkage Properties from Locally Raw Materials**

*A Thesis By*

*Ahmed Moufaq Jawid*

***To Submitted to the Council of College of Science***

***University of Babylon***

***In Partial Fulfillment of the Requirements for***

***the Degree of Master of Science in Physics***

*Supervisor*

*Dr. Talib H. Kadouri*

*Dr. Fadhil A. Rasin*

**February ٢٠٠٧**

**Muharam ١٤٢٨**

# بسم الله الرحمن الرحيم

## قرار لجنة المناقشة

نشهد نحن أعضاء لجنة التقويم والمناقشة، أننا اطلعنا على الرسالة الموسومة بـ (تحضير سيراميك لخصائص التقلص الصفري من مواد محلية) وقد ناقشنا الطالب (أحمد موفق جواد) في محتوياتها، وفيما له علاقة بها، ووجدنا أنها جديرة لنيل درجة ماجستير في علوم الفيزياء/ مواد بتقدير (جيد جداً عالي).

### رئيس اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. عبد الواحد كاظم راجح

المرتبة العلمية: أستاذ

العنوان: كلية الهندسة / جامعة بابل

التاريخ: / / ٢٠٠٧

### عضو اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. عادل حبيب عمران

المرتبة العلمية: مدرس

العنوان: كلية العلوم / جامعة الكوفة

التاريخ: / / ٢٠٠٧

### عضو اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. فؤاد شاكر هاشم

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: كلية التربية / جامعة بابل

التاريخ: / / ٢٠٠٧

### عضو اللجنة (المشرف)

التوقيع:

الاسم: د. فاضل عبد رسن

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: كلية العلوم / جامعة بابل

التاريخ: / / ٢٠٠٧

### عضو اللجنة (المشرف)

التوقيع:

الاسم: د. طالب هادي قدوري

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: كلية العلوم / جامعة بابل

التاريخ: / / ٢٠٠٧

## مصادقة عمادة كلية العلوم

أصادق على ما جاء في قرار اللجنة أعلاه.

التوقيع:

الاسم: د. عوده مزعل ياسر

المرتبة العلمية: أستاذ

العنوان: كلية العلوم / جامعة بابل

التاريخ: ٢٠٠٧/ /

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إقرار المشرفين

نشهد أن إعداد هذه الرسالة الموسومة بـ " تحضير سيراميك لخصائص التقلص الصفري من مواد محليه" المقدمة من قبل " أحمد موفق جواد " قد جرى تحت إشرافنا في قسم الفيزياء/ كلية العلوم/ جامعة بابل، وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في علوم الفيزياء / مواد.

:التوقيع التوقيع

المشرف: د. فاضل عبد رسن      المشرف: د. طالب هادي قدوري

المرتبة العلمية: مدرس      المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: كلية العلوم/ جامعة بابل      العنوان: كلية العلوم/ جامعة بابل

التاريخ:      /      / ٢٠٠٦      التاريخ:      /      / ٢٠٠٦

توصية رئيس قسم الفيزياء

بناءً على التوصيات المتوافرة أشرح هذه الرسالة للمناقشة

:التوقيع

الاسم: د. طالب هادي قدوري

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

التاريخ:      /      / ٢٠٠٦

## Abstract

The study concerns with the ability of forming ceramic products which have very low shrinkage (Zero shrinkage), from Iraqi clays to be used in different industrial applications.

Grog are prepared by heating kaoline Duekhla at ( $1400^{\circ}\text{C}$ ) for (3hr) which was used as a matrix in the sample preparation, the binding materials are prepared from calcined kaoline mixed with the poly vinyl alcohol (PVA) at different percentage as binder. Other type of binder used is Sodium silicate.

After the preparation of Grog and selecting the appropriate ranges of the granular size and the binder materials preparation the samples was formed, the drying and burning operations was conducted.

The samples prepared in two groups; group (m) from Grog and modified kaoline at different percentage and group (n) from Grog and sodium silicate at different percentage also.

The weight, radius and the mean of the thickness for the samples was computed in three stages, they were computed after the forming of the samples, after the drying and finally after the burning to identify the amount of the shrinkage that occurs to the samples and computing the values of drying and burning shrinkage.

The results showed that the values of drying shrinkage are lower than the values of burning shrinkage. Where the best shrinkage values (minimum shrinkage) obtained for the sample (E) from group (m) which was prepered

from (87% Grog + 13% treated Kaoline) and for the sample (I) from group (n) mixture which was prepared from (77.8% Grog + 22.2% Sodium Silicate).

Mineral analysis for the samples were measured by using (XRD) to identify the phases existed in forming samples after heat treatment. The analysis shows the existed of mullite and cristoblite phases, which are responsible on the minimum the shrinkage value. Also these results are confirmed from the analyses of Ternary curve for ( $\text{Na}_x\text{O}-\text{SiO}_y-\text{Al}_z\text{O}_r$ ).

## بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ (٢) الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ (٣) مَا لِكَ يَوْمِ  
الدِّينِ (٤) إِيَّاكَ نَعْبُدُ وَإِيَّاكَ نَسْتَعِينُ (٥) اهْدِنَا الصِّرَاطَ  
الْمُسْتَقِيمَ (٦) صِرَاطَ الَّذِينَ أَنْعَمْتَ عَلَيْهِمْ غَيْرِ الْمَغْضُوبِ  
عَلَيْهِمْ وَلَا الضَّالِّينَ (٧)

صدق الله العلي العظيم

سورة الفاتحة

## الخلاصة

يشمل البحث دراسة إمكانية تصنيع منتجات سيراميكية ذات تقلص واطئ جداً (تقلص صفري) من أطيان عراقية لأهميتها في التطبيقات الصناعية المختلفة.

تم في البحث استعمال مادة الكروك المحضرة من كاؤولين دويخلة العراقي، بعد إجراء المعاملة الحرارية له بدرجة حرارة (1450 °C) ولمدة (2hr) الذي استخدم في تحضير النماذج وتم استخدام الكاؤولين المحمص بدرجات حرارية مختلفة والمعالج بمادة بولي فاينيل الكحول (PVA) بنسب مختلفة كمادة رابطة. النوع الأخر من المواد الرابطة المستعملة في تحضير النماذج السيراميكية هي سيليكات الصوديوم.

بعد تحضير المواد الأولية (الكروك) واختيار مديات الحجم الحبيبي المطلوب وتحضير المواد الرابطة تم تشكيل النماذج، ومن ثم أجري عمليات التجفيف والمعاملة الحرارية (الحرق).

حُضِرَت النماذج بمجموعتين، المجموعة (m) شكلت من الكروك و الكاؤولين المعالج بنسب مختلفة، فيما شكلت

المجموعة (n) من الكروك و سيليكات الصوديوم بنسب مختلفة.

قيس الوزن والقطر ومعدل السمك للنماذج بثلاث مراحل، بعد التشكيل وبعد التجفيف وبعد المعاملة الحرارية (الحرق) لمعرفة مقدار التقلص الحاصل للنماذج المحضرة وحساب كل من تقلص الجفاف وتقلص الحرق.

أظهرت الحسابات أن قيم تقلص الجفاف هي أوطأ من قيم تقلص الحرق. إن أفضل قيم تقلص تم الحصول عليها للنماذج

المحضرة كانت للنموذج (E) من الخلطة (m) والمكوّن من (87% كروك + 13% كاؤولين معالج) كذلك النموذج (I) من الخلطة

(n) والمكون من (77.8% كروك + 22.2% سيليكات صوديوم).

أجري التحليل المعدني للنماذج المحضرة باستعمال الأشعة السينية (XRD) لمعرفة الأطوار المتحققة في النماذج المحضرة بعد المعاملة الحرارية. وقد تبين أن وجود طوري المولاييت والكرستبولاييت في النماذج المحضرة أدى إلى خفض قيم التقلص إلى أدنى المستويات وتم تأكيد هذا الاستنتاج من خلال تحليل المخطط الثلاثي الأطوار  $(\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3)$ .

## قائمة المحتويات

رقم الصفحة	الموضوع	التسلسل
I	الخلاصة باللغة العربية	
II	قائمة المحتويات	
V	قائمة الجداول	
VII	قائمة الأشكال	
<b>الفصل الأول: مفاهيم عامة</b>		
١	مقدمة عامة	١-١
٢	الكاؤولين وخواصه	٢-١
٣	طبقة السليكا	١-٢-١
٤	طبقة الجبس	٢-٢-١
٥	تكثيف طبقات $[Si_2O_5]^+$ و $[Al(OH)_3]$	٣-٢-١
٦	الشاموت (الكروك) وخواصه	٣-١
٨	الدراسات السابقة	٤-١
١٠	هدف البحث	٥-١
<b>الفصل الثاني: المفاهيم النظرية</b>		
١١	الدونة	١-٢
١١	نظرية الدونة	١-١-٢
١٣	محتوى الرطوبة الحرج	٢-١-٢
١٤	العوامل المؤثرة في محتوى الرطوبة الحرج	٣-١-٢
١٦	التجفيف	٢-٢
١٧	آلية التجفيف	١-٢-٢
٢٤	الخصائص بعد التجفيف	٣-٢
٢٥	تقلص الجفاف الخطي	١-٣-٢
٢٦	متانة الجفاف	٢-٣-٢
٢٨	العوامل المؤثرة في متانة الجفاف	٣-٣-٢
٢٨	الحرق - التلبيد	٤-٢
٢٩	التفاعلات التي تحدث للأطيان أثناء الحرق	١-٤-٢
٣٠	آلية التلبيد	٥-٢
٣١	التلبيد بوجود الطور السائل	١-٥-٢
٣٢	التقلص الناتج من الحرق	٦-٢
٣٤	المسامية	٧-٢
٤٧	تأثير المسامية على تقلص الحرق	١-٧-٢
<b>الفصل الثالث: الجزء العملي والقياسات</b>		
٣٨	المواد الأولية	١-٣
٣٨	الشاموت (الكروك)	١-١-٣
٤٠	المواد الرابطة	٢-١-٣
٤٠	الكاؤولين	١-٢-١-٣
٤٣	بولي فاينيل الكحول	١-١-٢-١-٣
٤٣	سيليكات الصوديوم	٢-٢-١-٣
٤٤	مفاهيم التشكيل	٢-٣
٤٤	عملية التكسير والطحن	١-٢-٣
٤٥	عملية تدرج المقاس الحبيبي	٢-٢-٣
٤٩	عملية الخلط	٣-٢-٣
٤٩	عملية الكيس	٤-٢-٣
٥٠	عملية التجفيف	٥-٢-٣
٥١	عملية الحرق - التلبيد	٦-٢-٣
٥٢	تحضير النماذج	٣-٣
٥٢	تحضير الخلطة (M) (الكروك + الكاؤولين المعالج)	١-٣-٣
٥٢	تحضير المادة الرابطة (الكاؤولين المعالج)	١-١-٣-٣
٥٦	تحضير الخلطة (N) (كروك + سيليكات الصوديوم)	٢-٣-٣

رقم الصفحة	الموضوع	التسلسل
٥٩	قياسات التقلص	٤-٣
<b>الفصل الرابع: المناقشة والاستنتاجات والتوصيات</b>		
٦٨	تأثير الكروك على التقلص	١-٤
٦٩	تأثير المواد الرابطة	٢-٤
٦٩	الكأولين+بولي فاينيل الكحول	١-٢-٤
٧٠	تأثير سيليكات الصوديوم كمادة رابطة	٣-٤
٧٠	تأثير عمليات التشكيل	٤-٤
٧١	قيم التقلص المقاسة	٥-٤
٧٣	تأثير الأطوار المتحولة	٦-٤
٨٧	الاستنتاجات	٧-٤
٨٨	التوصيات	٨-٤
٨٩	المصادر	
A	الخلاصة باللغة الانكليزية	

## قائمة الجداول

رقم الصفحة	عنوان الجدول	رقم الجدول
٤٠	التحليل الكيميائي للمواد المستعملة في الخلطات النسبية المثوية	١-٣
٤١	درجة حرارة التخميص ( $^{\circ}\text{C}$ ) وعلاقتها بنسبة المضاف من [بولي فاينيل الكحول إلى كاؤولين]	٢-٣
٤٨	قياسات الغرابيل المستعملة في عملية الغربلة لمادة الكروك	٣-٣
٥٨	النسبة المثوية لخلطات المجموعة <b>m</b>	٤-٣
٥٨	النسبة المثوية لخلطات المجموعة <b>n</b>	٥-٣
٦٠	تغير قيم التقلص الخطي مع درجة حرارة التخميص للكاؤولين المضاف بنسبة (١٣%) كمادة رابطة لنماذج الخلطة <b>m</b>	٦-٣
٦٠	تغير قيم التقلص الحجمي مع درجة حرارة التخميص للكاؤولين المضاف بنسبة (١٣%) كمادة رابطة لنماذج الخلطة <b>m</b>	٧-٣
٦١	تغير قيم التقلص الخطي مع درجة حرارة التخميص للكاؤولين المضاف بنسبة (٢٣%) كمادة رابطة لنماذج الخلطة <b>m</b>	٨-٣
٦١	تغير قيم التقلص الخطي مع درجة حرارة التخميص للكاؤولين المضاف بنسبة (٢٣%) كمادة رابطة لنماذج الخلطة <b>m</b>	٩-٣
٦٢	تأثير نسبة (PVA) في المادة الرابطة على قيم التقلص الخطي لنماذج الخلطة <b>m</b>	١٠-٣
٦٢	تأثير نسبة (PVA) في المادة الرابطة على قيم التقلص الحجمي لنماذج الخلطة <b>m</b>	١١-٣
٦٣	تأثير نسبة (PVA) في المادة الرابطة على قيم التقلص الخطي لنماذج الخلطة <b>m</b>	١٢-٣
٦٣	تأثير نسبة (PVA) في المادة الرابطة على قيم التقلص الحجمي لنماذج الخلطة <b>m</b>	١٣-٣
٦٤	تغير نسبة فقدان الكتلة بعد الحرق مع قيم (الكاؤولين+PVA) المضافة كمادة رابطة لنماذج الخلطة <b>m</b>	١٤-٣
٦٥	تغير قيم التقلص الخطي مع قيم سيليكات الصوديوم المضافة كمادة رابطة لنماذج الخلطة <b>n</b>	١٥-٣
٦٦	تغير قيم التقلص الحجمي مع قيم سيليكات الصوديوم المضافة كمادة رابطة لنماذج الخلطة <b>n</b>	١٦-٣
٦٧	تغير نسبة فقدان الكتلة بعد الحرق مع قيم سيليكات الصوديوم المضافة كمادة رابطة لنماذج الخلطة <b>n</b>	١٧-٣
٦٨	كثافة أطوار السليكا عند درجة حرارة الغرفة	١-٤
٧٢	قيم التقلص للنموذجين (E) و (I)	٢-٤
٨٦	نسبة كل مكون من المكونات الخلطة <b>n</b>	٣-٤

## قائمة الأشكال

رقم الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
٤	(A) شكل الهرم الرباعي لطبقة السليكا، (B) الشكل ذو الأسطح الثمانية لطبقة الألومينا	١-١
٦	تكثيف طبقات الكاؤولين	٢-١
١٤	منحنى التجفيف للأطيان النموذجية	١-٢
١٦	معدل إزالة الماء مقابل نسبة المحتوى المائي	٢-٢
١٩	مراحل عملية التجفيف في المواد السيراميكية	٣-٢
٢٠	التقلص للأجسام اللدنة أثناء التجفيف	٤-٢
٢١	مخطط تقلص (الطين - الماء)	٥-٢
٢٢	الأنواع المختلفة من المحتوى المائي	٦-٢
٢٣	تقلص الجفاف للأطيان الطبيعية	٧-٢
٣١	آلية التليد	٨-٢
٣٦	مخطط توضيحي بأنواع المسامات	٩-٢
٣٩	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للكروك	١-٣
٤٢	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للكاؤولين الخام	٢-٣
٤٧	جهاز الهزاز والغرابيل المستعملة في البحث	٣-٣
٥١	مراحل التجفيف	٤-٣
٥٥	الفرن الكهربائي المستعمل في البحث	٥-٣
٥٥	القدمة الرقمية المستعملة في البحث	٦-٣
٥٦	نماذج الخلطة m	٧-٣
٥٧	نماذج الخلطة n	٨-٣
٦٩	تمدد في الكرسبولانيت عند المعاملة الحرارية	١-٤
٧٤	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج A من نماذج الخلطة m	٢-٤
٧٥	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج B من نماذج الخلطة m	٣-٤
٧٦	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج C من نماذج الخلطة m	٤-٤
٧٧	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج D من نماذج الخلطة m	٥-٤
٧٨	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج E من نماذج الخلطة m	٦-٤
٧٩	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج F من نماذج الخلطة m	٧-٤
٨١	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج G من نماذج الخلطة n	٨-٤
٨٢	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج H من نماذج الخلطة n	٩-٤
٨٣	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج I من نماذج الخلطة n	١٠-٤
٨٤	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج J من نماذج الخلطة n	١١-٤
٨٥	مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج K من نماذج الخلطة n	١٢-٤
٨٦	المخطط الطوري لنظام $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ وبيان أهم الأطوار الظاهرة فيه	١٣-٤

# الفصل الأول

## مفاهيم عامة

### General Concepts

#### General Introduction

#### ١-١ مقدمة عامة

عرفت المواد السيراميكية بأنها مواد تتألف من عناصر معدنية ولا معدنية، وتتحمل درجات حرارية عالية في تصنيعها و/ أو استعمالها [١, ٢, ٣].

يغطي مفهوم السيراميك (ceramics) مدى واسعاً من المواد مثلًا، الطابوق (brick)، الكونكريت (Concrete)، الطين (Clay)، السيراميك الصناعي (Industrial ceramic) [الذي يتضمن الأكاسيد (Oxides)، الكاربيدات (Carbides)، النتريدات (Nitrides)]، المواد الحرارية، الزجاج (Glass) [٤].

تُحدّد خواص السيراميك من خلال مكوناته وتركيبه المجهرى الذي ينتج خلال عمليات التصنيع، إذ اعتمد عدد من الخصائص كمعيار لكفاءة أداء الجسم السيراميكى في التطبيق الصناعى المعد له، ومنها المقاومة العالية للحرارة والمواسفات الميكانيكية الفائقة والمواسفات الكهربائية والاستقرارية الكيميائية، تلك الخصائص ارتبطت بصورة كبيرة بطريقة التصنيع التي لا يمكن الاستغناء عنها للحصول على الخواص المطلوبة فضلاً عن طبيعة المادة المستعملة [٥, ٦].

تستعمل المواد السيراميكية في مجال التطبيقات الالكترونية الخاصة وذلك في صناعة المتسعات السيراميكية أحادية ومتعددة الطبقات (Unilayer And Multilayer Ceramic Capacitors) وكذلك الدوائر التكاملية السيراميكية متعددة الطبقات (Multilayer Ceramic Integrated Circuit) وأشربة التوصيل الالكترونية (Electronic Tapes) التي تستعمل في تطبيقات الاتصالات الالكترونية المتقدمة واستعمالات شبكة الإنترنت. كما دخل في الاستعمالات الطبية من خلال السيراميك البايولوجي (Bioceramics) [٧, ٨].

تتطلب التكنولوجيا المتقدمة جداً السيطرة على أبعاد النموذج وبشكل دقيق. وقد أطلق على هذه التكنولوجيا "تكنولوجيا التقلص الصفري" (Zero Shrinkage Technology) [٩, ١٠, ١١].

#### ٢-١ الكاؤولين وخواصه

### The Kaoline and Their properties

إن اسم كاؤولين (Kaoline) يعود إلى الكلمة الصينية "Kao-linage" التي تعني الجبال المرتفعة، وهي الموقع الذي عثر بها على أطيان صينية بيضاء. تتكون بشكل رئيس من معدن الكاؤولين، الذي هو عبارة عن سيليكات الألمنيوم المائية (hydrated aluminum silicate)، وصيغته الكيميائية  $(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$  [٤, ١٢].

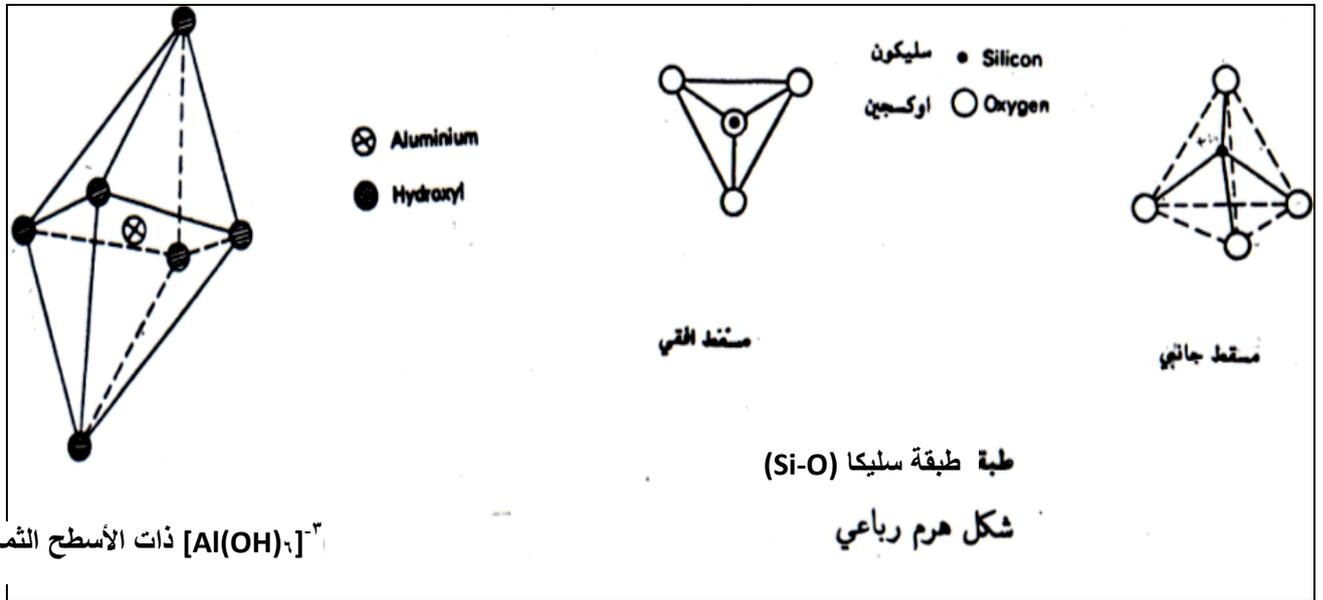
يتوقف تركيب معادن الكاؤولين على اتحاد أو تكثف تركيب طبقتين تعرف الأولى بطبقة السليكا (Silica layer) وتتكون من ذرات السليكون والأكسجين، وتعرف الثانية بطبقة الجبس (gibbsite layer) وتتكون من ذرات الألمنيوم ومجموعات الهيدروكسيل [١٣]. والكاؤولين مادة متبلورة، بلوراتها ذات أشكال سداسية مسطحة صغيرة جداً، إن حجم الدقائق يتوزع من (أجزاء من مايكرون إلى ١.٥ مايكرون). إن هذا الاتحاد بين صغر الحجم وشكلها الصفائحي يعطي الكاؤولين خواص فريدة. إذ يمتاز

بنعومة حبيباته ولونه الأبيض وله درجة انصهار (°C 1770) في حالته النقية وفي حالة وجود شوائب فإن درجة انصهاره بحدود (°C 1545) [13, 14]. إن خاصية اللدونة للكاؤولين سببها التركيب البلوري له إذ يرتبط سطح بلورة الكاؤولين بأواصر هيدروجين الماء، لهذا عند إضافة الماء إلى الطين، تنزلق صفائح البلورات بعضها على بعضها الآخر بسهولة [4]. وللكاؤولين علاقة بالمتانة الخضراء (Green Strength) (المتانة قبل الحرق) والمتانة بعد الحرق للجسم السيراميكي إذ يقل كلاهما (قبل الحرق وبعد الحرق) عندما تقل نسبة الكاؤولين. كذلك إن نسبة التقلص عند الحرق تقل بشكل خطي عندما تقل نسبة الكاؤولين المستعمل في صناعة الجسم السيراميكي [15].

## The silica layer

### ١-٢-١ طبقة السليكا

تحاط كل ذرة سليكون بأربع ذرات أوكسجين حيث تقع ذرات الأوكسجين على أركان هرم رباعي منتظم وكما موضح في الشكل (A-١-١). إذ تقع ذرات الأوكسجين الثلاث المكونة لقاعدته المثلثة الشكل أسفل مستوى ذرة السليكون الموجودة في مركز الهرم الرباعي بينما تتواجد فوقها ذرة الأوكسجين المكونة لقمة الهرم الرباعي، تحمل ذرة السليكون أربعة تكافؤات موجبة بينما تحمل كل ذرة أوكسجين تكافؤين سالبين لذلك يحمل الهرم الرباعي أربع شحنات سالبة  $(SiO_4)^{4-}$  وتتواجد الأهرام الرباعية في بعض السيليكات (الاورثوسيليكات) (Orthosilicat) بأشكال فردية إذ تتعادل شحناتها بالايونات الموجبة التي تتحدد معها، وفي تراكيب أخرى تحدد الأهرام الرباعية فيما بينها في مشاركة ذرات الأوكسجين ومكون سلاسل أو رقائق إذ تشترك ثلاث من الذرات الأربع في كل هرم في تراكيب العناصر الطينية مع أهرام رباعية أخرى معطية لوحاً مستمراً. يمتد هذا اللوح بشكل غير محدود في الاتجاهين [a, b] (في مستوى الورقة) وعليه فتلاصق ذرات الأوكسجين الأربع في كل هرم رباعي متكافئة كهربائياً باستقبال تكافؤ واحد من كل من ذرتي السليكون التي تتحد بها وترتبط ذرة الأوكسجين الرابعة في كل هرم رباعي (الموجودة في قمم الأهرام الرباعية) بذرة سليكون واحدة فقط وعليه إنها تحتوي على تكافؤ واحد غير مشبع. ويحتوي كل هرم رباعي على ذرة سليكون وذرة أوكسجين ذات تكافؤ حر، وثلاث ذرات أوكسجين أخرى ذات تكافؤات غير خالية (مشبعة) إذ تشترك مناصفة مع الأهرام الرباعية المجاورة. وعلى هذا فإن الصيغة الأساسية لتركيب اللوح هي  $(Si_2O_5)^{2-}$  [3, 14].



شكل (A-١-١): شكل الهرم الرباعي لطبقة السليكا، (B) الشكل ذو الأسطح الثمانية لطبقة الألومينا [١٤]

## The gibbsite layer

### ٢-٢-١ طبقة الجبس

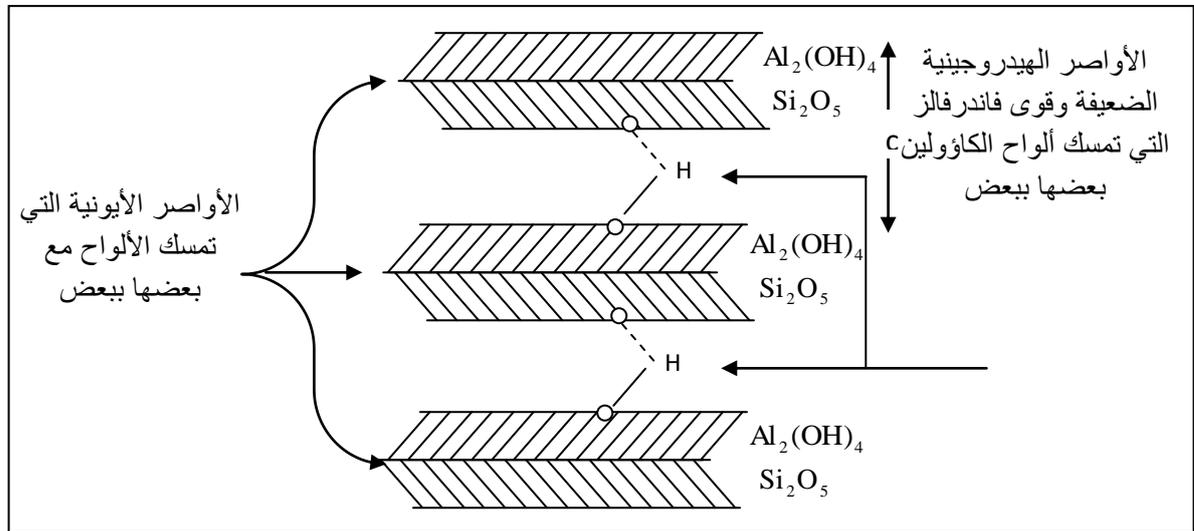
ترتبط طبقة السليكا الهرمية الرباعية في معادن الكاولين مع طبقة هيدروكسيد الألمنيوم  $[Al(OH)_3]$  خلال ذرات الأوكسجين ذات التكافؤات الخالية وتسمى عندئذ طبقة الجبس يتكون الهيكل البنائي الأساسي لها من ذرة ألومنيوم محاطة بست مجموعات هيدروكسيل تقع في أركان مثنى منتظم كما في الشكل (B-1-1) وعلى ذلك يشار غالباً لطبقة الجبس بالطبقة ذات الأسطح الثمانية.

يحتوي كل مثنى على ذرة ألومنيوم واحدة وتشارك بالنصف في ست مجموعات هيدروكسيل أي إن الصيغة الأساسية هي  $[Al(OH)_3]$  ويلاحظ أن نصف مجموعات الهيدروكسيل فوق مستوى ذرات الألمنيوم والنصف الآخر أسفله كما إن المسطح الثماني للجبس له القدرة على تمدد غير نهائي في الاتجاهين [a, b] (في مستوى الورقة) هذه المثلثات المرتبطة تشكل شكلاً سداسياً مكرراً يشبه الموجود في طبقة الهرم الرباعي [١٤].

### ٣-٢-١ تكثيف طبقات $[Si_2O_5]^{2-}$ و $[Al(OH)_3]$

تتشابه أبعاد الحلقات السداسية في ألواح السليكا والجبس إلى حد بعيد، ويمكن أن يتكاثف الاثنان معاً ويحدث ذلك باختزال مجموعة الهيدروكسيل في التركيب البنائي للجبس ويحل محلها تكافؤات ذرات الأوكسجين الحرة في لوح السليكا، ولأن مجموعات الهيدروكسيل تشارك في التركيب البنائي للجبس في نصف تكافؤ من كل ذرة من ذرتي الألمنيوم المتصلة بها وذرات الأوكسجين الحرة في التركيب البنائي للسليكا تمتلك تكافؤ واحد خالياً، فمن الضروري أن تتحد مع ذرتي ألومنيوم وتشارك في نصف تكافؤ من كل ذرة كما حدث في حالة الهيدروكسيل.

يؤدي ذلك إلى تعادل كهربائي  $[Si_2O_5]^{2-}; [Al_2(OH)_4]^{+2}$  والصيغة البنائية لعنصر الكاولين  $[Al_2(OH)_4; Si_2O_5]$  وهي الأكثر انتشاراً بالرغم من كتابتها بطريقة أقل دقة مثل  $[Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O]$  ومن الملاحظ وجود  $[2H_2O]$  في هذه الصيغة الأخيرة في التركيب البنائي للكاولين كمجموعات هيدروكسيل وليس كجزئيات ماء كما في الشكل (٢-١) الذي يوضح تراكم طبقات معدن الكاولين.



شكل (٢-١) يوضح تكثيف طبقات الكاولين [١٤]

إن الصيغة البنائية  $[Al_2(OH)_4; Si_2O_5]$  هي نفسها لكل أعضاء مجموعة معادن الكاولين وتختلف فقط في الطريقة التي تتراكم بها الأزواج من الطبقات كل واحدة على قمة الطبقة الأخرى لتكوين البلورة إذ تقع الذرات المتطابقة مباشرة بعضها فوق بعض في معدن الكاولين المسمى بالناكرات (Nacrate) بينما تحدث بعض الازاحات في معادن الديكيت (Daket) و الكاولينيت (Kaolinite) أي إن الذرات المتطابقة في كل لوح كاولين لا تكون مباشرة بعضها فوق بعض ولكن مُزاحة إلى حد معين [١٤].

### ٣-١ الشاموت (الكروك) وخواصه

# Chamotte (Grog) and their Properties

هو مادة حرارية طينية ناتجة من حرق أطيان الكاؤولين بين  $1350^{\circ}\text{C}$ - $1450^{\circ}\text{C}$  وبالتالي تفقد هذه الأطيان ماء تبلورها وتتحوّل مكوناتها إلى أطوار وفقاً لطبيعة مكونات ونسبة الشوائب ودرجة حرارة الحرق وله الصيغة الكيميائية [16]  $[\text{3Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2]$ . محتوى الشاموت (الكروك) من المولايث أكثر من [72٪] ودرجة مقاومته للحرارة عالية جداً لذلك يعتبر الشاموت من الحرارية الأكثر استخداماً ضمن المواد الحرارية الأولية [17, 18].

يسمى الشاموت تسميات أخرى روسية هي (كروك Grog) أو (kaolin chamotte) أو (Molo chite)، ونظراً لكون الشاموت ناتجاً من حرق مواد خام لذلك فهو يتواجد بنسبة كبيرة في الاجسام السيراميكية المحروقة ويكون سلسلة طويلة من البلورات الأبرية المتشابكة التي تعطي صفات خاصة لهذه المادة. يمتلك الشاموت صفات حرارية جيدة جعلته مفضل في كثير من الصناعات السيراميكية والحرارية ومنها [19] :

١- المتانة الميكانيكية في درجات الحرارة العالية.

٢- التمدد الحراري المتجانس.

٣- عند وجوده في الجسم فانه يكسبه مقاومة جيدة للصدمات الحرارية .

٤- له مقاومة ضغط كبيرة و بدرجات حرارية عالية.

٥- درجة انصهاره عالية تقترب من ( $1900^{\circ}\text{C}$ ) .

إن أهم صفة للشاموت هو مقدار التحوّل الحاصل للكاؤولين الى بلورات المولايث الخشنة ذلك المعدن الذي يقاوم التغيير الحراري المفاجئ [17] .

ان معامل التمدد الحراري الواطئ للمولايث هو عامل مهم للاداء المفضل للشاموت في التطبيقات التي تتعرض الى تغييرات سريعة في درجة الحرارة . ان المراحل التي تمر بها الكاؤولينات (المادة الخام) الى ان تتحوّل الى الشاموت يمكن ايجازها بالاتي:-

١- في درجة حرارة  $100^{\circ}\text{C}$ - $200^{\circ}\text{C}$  تؤدي الى ازالة الرطوبة الباقية بعد التجفيف.

٢- في درجة حرارة  $400^{\circ}\text{C}$ - $600^{\circ}\text{C}$  ويتحوّل الكاؤولين الى ميتاكاؤولين ويؤدي الى ضعف قوة الأواصر في المعدن الطيني مع حصول تقلص في الحجم حوالي (9, 13٪) وهناك فقدان في الوزن حوالي (4, 14٪) بسبب فقدان ماء التبلور.

٣- في درجة حرارة  $980^{\circ}\text{C}$  يتكون طور السبينال (Spinal) مع انفصال كمية من السليكا .

٤- في درجة  $1050^{\circ}\text{C}$ - $1100^{\circ}\text{C}$  يتحوّل السبينال الى المولايث مع انفصال اكبر للسليكا

٥- في درجة  $1200^{\circ}\text{C}$ - $1450^{\circ}\text{C}$  تتكون كميات اكبر من المولايث مع تحوّل السليكا الى الكريستوبلايت وهو الطور المستقر لها [20] .

والمخطط الآتي يبين التغييرات الكيميائية التي تطرأ على الكاؤولينات عند التسخين: [21]



## ٥-١ هدف البحث

- ١- يهدف البحث إلى تحضير أجسام سيراميكية ذي تقلص واطئ من مواد محلية عراقية ودراسة تأثير عوامل تشكيل مكونات المواد الأساس من حيث الحجم الحبيبي والتكتل الحبيبي والمعاملة الحرارية للتكتلات الحبيبية.
- ٢- دراسة تأثير المواد والأطيان الرابطة وتراكيزها على قيم تقلص الأجسام السيراميكية.
- ٣- دراسة الأطوار الداخلة ضمن هذه الأجسام السيراميكية وتأثير تحولاتها.
- ٤- تحديد الأطوار التي تتحكم بفاعلية التقلص الواطئ للأجسام السيراميكية.

## الفصل الثاني

### المفاهيم النظرية

### *Theoretical Concepts*

#### ١-٢ اللدونة

إن احد المعايير الأساسية التي تتحكم في خصائص تشكيل الجسم السيراميكي هي اللدونة، إذ تعرّف المادة اللدنة بأنها المادة التي يمكن تشويهها بشكل مستمر تحت تأثير الإجهادات المسلطة وتحافظ على شكلها عندما تزال الإجهادات. تفهم طبيعة سلوك وخصائص تشكيل الأجسام السيراميكية من خلال نظام "صلب- سائل" إذ إن محتوى الماء يكون معيار محددات اللدونة لتلك الأطيان التي تمتلك الخاصية اللدانية، وفق مقياس عامل اللدونة "plastic index"، فإن حساب الإجهادات تقل عندما يزداد محتوى الماء، إن عجينة الطين ذات محتوى الماء الكثير تكون مطيلة (Ductile) وتتشوه بشكل كبير بدون تشقق. بينما عجينة الطين ذات المحتوى المائي القليل تكون هشّة (Brittle) وتتشقق تحت تشوه قليل جداً. لذلك يعتقد أن الأطيان ذات محتوى مائي مثالي أو قياسي تكون سهلة التشكيل [٢٨، ٢٩].

#### Theory of Plasticity

#### ١-١-٢ نظرية اللدونة

يقصد ضمن هذه لمفهوم حول خاصية اللدانية للطين بوجود الماء وفق معايير اللدانية "Plasticity index" لما لهذه المفاهيم من أهمية تشكيل الأجسام السيراميكية المعقدة وكذلك عن فاعلية التجفيف ومرآحها. إن الماء على سطح الطين يتكون من طبيعتين، الماء المقيد أو المرتبط (Water Bound) على شكل أغشية حول الدقائق الطينية مكونة مساحة سطحية كبيرة تستطيع الإمتزاز. والماء الحر (Free Water) الكمية الزائدة عن المطلوب سوف تشكل طبقات من الأغشية المرتبطة [٢٩، ٣٠]. كما أن سمك أغشية الماء، تعتمد على كثافة الشحنة السطحية وعلى وجود الأيونات الموجبة القابلة للاستبدال، ومن المهم أيضاً، المساحة السطحية المتاحة للجسيمات. إن تواجد الماء في المواد يكون بنوعين مختلفين:

١- الماء الميكانيكي: هو الماء أو الرطوبة الموجودة على السطح أو بين دقائق المادة. إذا تركت المادة في مكان جاف ستفقد ماءها الميكانيكي وإذا تركت المادة في مكان رطب سوف تأخذ الماء الميكانيكي. لحساب الماء الميكانيكي توزن العينة ومن ثم توضع في المجفف عند درجة حرارة (١١٠°C) حتى يصبح وزنها ثابتاً. الفرق بين وزن العينة الأصلي ووزنها بعد التجفيف يمثل وزن الماء الميكانيكي الذي احتوته العينة.

٢-الماء التركيبي: هو الماء الداخل في تركيب الجزيئة (المرتبط من تكامل أجزاء الجزيئة). كما في هيدروكسيد الألمنيوم  $(Al_2O_3 \cdot 3H_2O)$  أو ماء التبلور كما في البوراكس  $(Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O)$ . وبصورة عامة الماء التركيبي ثابت لكل مادة جزيئية [٣١].

في حالة زيادة محتوى الماء في الكتلة اللدنة فإن دقائق الطين ستكون بشكل منفرد بعضها عن بعضها الآخر وسيقل تماسك الكتلة الطينية، لذلك سيكون لها ميل كبير للتشوه عند تعرضها لاجهادات صغيرة جداً. تقليل محتوى الماء يجعل الدقائق تقترب سويةً لهذا ستزداد الصلابة. إن محتوى الماء الكبير ينتج كتلة شديدة الرطوبة ولها قيمة خضوع واطئة التي تناسب بسرعة بينما المحتوى القليل من الماء ينتج كتلة متبينة لها قيمة خضوع عالية مع مقاومة عالية للجريان والانسحاب.

ولتحديد المحتوى المائي (كمية الماء الموجود في الطين) هنالك حدان وهما:

أ. الحد الأعلى لللدونة: وهو مقدار الماء الكافي ليحوّل الطين إلى طين منزلق.

ب. الحد الأدنى لللدونة: المحتوى المائي الذي يكون كافٍ لجعل الطين لدن أي أن الماء كافٍ ليكوّن الأغشية التي تحيط بالدقائق. وهذا العامل يعتمد على المساحة السطحية للطين، أي يعتمد على شكل وحجم الدقائق الطينية [٢٩].

إن النسبة المئوية للرطوبة تحسب على أساس وزن العينة الجاف كما يلي:

وزن العينة الأصلي (غرام) – وزن العينة الجاف (غرام) = ( ) غرام من الرطوبة.....(١)

النسبة المئوية للرطوبة = ( غرام من الرطوبة / الوزن الجاف )  $\times 100$ .....(٢)

يتوزع ماء اللدونة ما بين حدود واسعة يكون عالياً للأطيان اللدنة وذات الحجم الحبيبي الدقيق وواطئ الأطيان الرملية غير اللدنة. ويحسب ماء اللدونة بحسب القانون [٣١]:

$$B = \frac{W_p - W_d}{W_d} \times 100 \quad (٣)$$

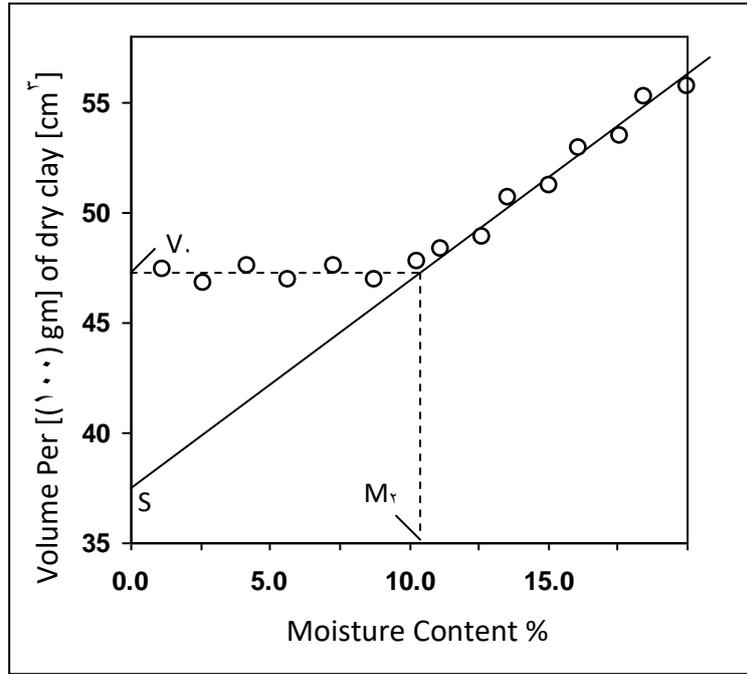
إذ إن B النسبة المئوية لماء اللدونة،  $W_p$  وزن العينة عند الحالة اللدنة،  $W_d$  وزن العينة عند الحالة الجافة.

## ٢-١-٢ محتوى الرطوبة الحرج (C.M.C) Critical Moisture Content

عند البدء بالتجفيف يتبخر الماء من السطوح الخارجية أولاً، دقائق الطين تنسحب بشكل متزايد متجمعة بعضها مع بعض بواسطة قوى الشد السطحي، وأخيراً دقائق الطين سوف تصل إلى حالة تماس متبادل وتشكل تجمعاتاً ذا رص رخو. هذه الحالة تحدث لمرة واحدة إذ أنه من غير الممكن ترص الدقائق بتقارب أكثر من ذلك ولهذا السبب لا يحدث تقلص بعد هذه المرحلة من التجفيف.

إن محتوى الرطوبة في هذه المرحلة يشير إلى محتوى الرطوبة الحرج. نحصل على أعلى تجفيف من خلال أعلى فقدان للماء بواسطة تبخيره من مسامات الجسم. إذ إن الماء سيُسحب إلى السطح بواسطة التجاذب الشعري، لذلك التجمع الأولي لدقائق الطين سيبقى ثابتاً (الرص الرخو) ويدخل الهواء ليحل محل الماء في المسامات التي خرج منها الماء لنحصل أخيراً على جسم ذو مسامية عالية.

عند قياس الحجم ومحتوى الرطوبة بشكل دوري خلال التجفيف وعند رسم مخطط يكون فيه الحجم المقاس مقابل محتوى الرطوبة، كما في الشكل (٢-١)، فإنه يمثل خطين مستقيمين يتقاطعان عند نقطة تتطابق مع محتوى الرطوبة الحرج [٢٩].



شكل (٢-١) منحنى التجفيف للأطيان النموذجية [٢٩]

### ٣-١-٢ العوامل المؤثرة في محتوى الرطوبة الحرج

#### Factors Affecting The (C.M.C)

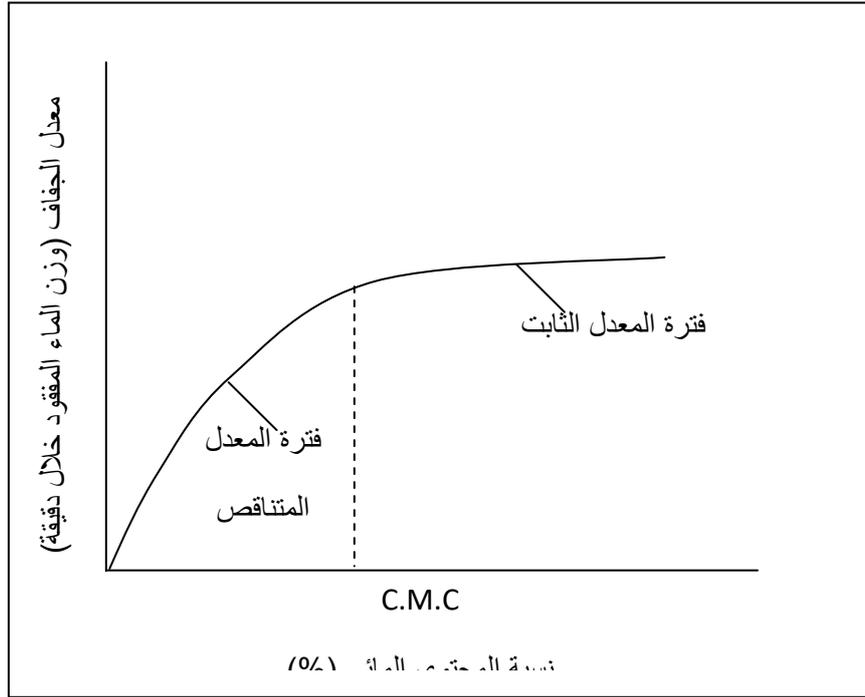
الأنظمة المتكثلة بشكل عام كتل رخوة الرص ذات كثافة قليلة لذلك الطين الطبيعي الذي يكون متلبداً بشكل اعتيادي ذا رص رخو ويعطي بالمقارنة محتوى كبير للرطوبة الحرجة. على عكس الطين غير المتكثرت (المشتت) ينتج نظام متماسك الرص مع محتوى واطئ للرطوبة الحرجة. التقلص الكلي (من الرطب إلى الجاف) للطين يحسب بوساطة الفرق بين محتوى الرطوبة الأولي ومحتوى الرطوبة الحرج. لهذا يكون ارتباطاً بسبب محتوى الرطوبة الأولي ثابت الترتيب عملياً ويتلاءم مع عملية التشكيل المنفرد.

من أجل تعديل جوهر في تقلص الجفاف للطين فإنه يتطلب زيادة محتوى الرطوبة الحرج وكذلك تقليل محتوى الرطوبة الأولي، وهذا يتم بوساطة إضافة المشتتات، التي تكون غير مستقرة ومفككة عند بدء التجفيف. وهناك عامل آخر يؤثر في محتوى الرطوبة الحرج هو نسبة وحجم توزيع المواد غير اللدنة مثل الكوارتز والكروك التي يمكن إضافتها إلى الطين إذ أن هذه المواد ستقلل من التقلص الكلي وتسرع التجفيف [٢٩].

إن قيمة محتوى الرطوبة الحرج مهمة مادام التجفيف عند المحتوى الأكبر من القيمة الحرجة يتضمن تقلص وخطورة التشويه أو الكسر محتملة، لذلك يجب أن يجري التجفيف نزولاً إلى المحتوى المائي الحرج ببطء حتى يتم التجفيف بانتظام وتساوي.

عند الوصول إلى النقطة الحرجة (المحتوى المائي الحرج) يمكن أن يتم التجفيف بسرعة من دون أن يخشى على المادة من الكسر وعندما يكون المحتوى المائي أعلى من المحتوى المائي الحرج يبقى معدل فقدان الماء ثابتاً تحت الظروف الثابتة. إن عملية التجفيف تعني ببساطة تبخر الماء من السطح الذي يعوض بالماء النازح من الداخل نحو السطح، تعرف هذه الفترة بفترة المعدل الثابت. وإذا اجتازت نقطة المحتوى المائي الحرج فلن تبقى طبقة الماء مستمرة حول الدقائق وعندئذ يجب أن ينفذ الماء الداخلي إلى السطح قبل أن يزال وعندئذ يقل معدل إزالة الماء كلما كان المحتوى المائي أقل من المحتوى الحرج ويستمر المعدل في الانخفاض حتى تتم عملية الجفاف وتعرف الفترة الكائنة بين المحتوى المائي الحرج والجفاف التام بفترة المعدل المتناقص، يوضح الشكل (٢-٢) فترة المعدل الثابت وفترة المعدل المتناقص بيانياً بوساطة رسم معدل إزالة الماء مقابل نسبة المحتوى المائي. وعندما

يكون المنتج المشكل جاف أو أن محتواه المائي اقل من المحتوى المائي الحرج فالتجفيف إما أن يكون غير ضروري أو يمكن إجراؤه بسرعة وأمان لان إزالة الماء لا يصاحبه أي تقلص [١٤].



شكل (٢-٢) معدل إزالة الماء مقابل نسبة المحتوى المائي [١٤]

## Drying

## ٢-٢ التجفيف

وهي خطوة رئيسية في العمليات التي تستعمل التشكيل المائي اللدن والصب الانزلاقي. التجفيف هو عملية هندسية يجب أن تسرع لتكون اقتصادية، وفي بعض الأحيان يجب أن لا تكون سريعة جداً لأن المنتج سيتضرر بتشققات والتواءات كنتيجة لتغير الحجم. لتصميم عملية تجفيف كفوءة يتطلب معرفة توزيع السوائل داخل المنتج وكذلك نشاط حركة السوائل. مع هذه المعرفة من الممكن التنبؤ بأبعاد مختلفة وخواص متغيرة وبدقة أفضل [٣٢].

التجفيف هي واحدة من المراحل المهمة في تصنيع المنتجات الطينية، إذ لا تكون إزالة الماء بسرعة معقولة ضرورياً فقط، وإنما يجب أن يتم بطريقة لا تكوّن إجهادات كبيرة كافية تتسبب في الالتواء والتشققات [٣٣].

## Mechanism of Drying

## ١-٢-٢ آلية التجفيف

الماء المتواجد في نظام (طين - ماء) من الممكن أن يقسم على الأنواع المتميزة الآتية:

- ١- ماء الإمتزاز Adsorbed water
- ٢- ماء التقلص أو ماء بين الطبقات أو الدقائق (Shrinkage or interparticle) water
- ٣- الماء المسامي Pore water
- ٤- ماء الشبكة البلورية Crystal lattice water
- ٥- ماء الهدرجة Water of Hydration

هو الماء الذي يحمل على السطح بواسطة القوى الفيزيائية كقوة تجاذب فاندرفالز. على الرغم من أن ماء الإمتزاز هو فقط جزيئات قليلة السمك في الغالب، كميتها تكون ذات أهمية في المنتجات السيراميكية المشكلة من دقائق ذات حجم غروي. يمكن إزالة الماء الشبيكي والماء الممتز من المادة بزيادة درجة الحرارة. إذ أن التغير الحجمي الذي يرافق إزالة الماء الممتز أو الماء الشبيكي يكون ذا أهمية كبيرة على العملية الإنتاجية والتماثل للمنتج [٣٢].

الطين له قابلية على امتزاز طبقة ماء تتكون من جزيئة واحدة أو أكثر في السمك فضلاً عن الماء المتجمع في القنوات الشعرية الصغيرة. الكمية الكلية من الماء الممتز يعتمد على الضغط الجزيئي لبخار الماء، لذلك يكون الطين الجاف ماصاً للرطوبة وتدرجياً يصبح في حالة اتزان مع المحيط، لذلك يمكن أن تتمثل شروط الاتزان بضغط بخار محتوى الرطوبة لدرجة حرارة ثابتة.

إن ترتيب أوامر سطح المادة الصلبة لا يشبه ترتيب الأواصر الداخلية فبموجب قواعد باولي، تتشبع بواسطة تكافؤ الذرات المتصلة بها على السطح. هنالك الكثير من الأواصر غير المشبعة ولها القابلية على امتزاز ايونات وجزيئات في أكثر أو أقل من طبقة مستمرة. ايونات أحادية أو ثنائية في الغالب امتزت على سطح المعادن الطينية وهذه من الممكن أن تتحد بشكل متعاقب مع عدة جزيئات ماء. فضلاً عن جزيئات الماء التي من الممكن أن تمتز بشكل مباشر على سطح المعادن الطينية. عندما يسخن الطين ستكون الطاقة الحرارية كافية لإزالة الماء، لأن معظم الماء يكون ارتباطه ضعيف فعند زيادة درجة الحرارة فإنه سيفقد الكثير من الماء.

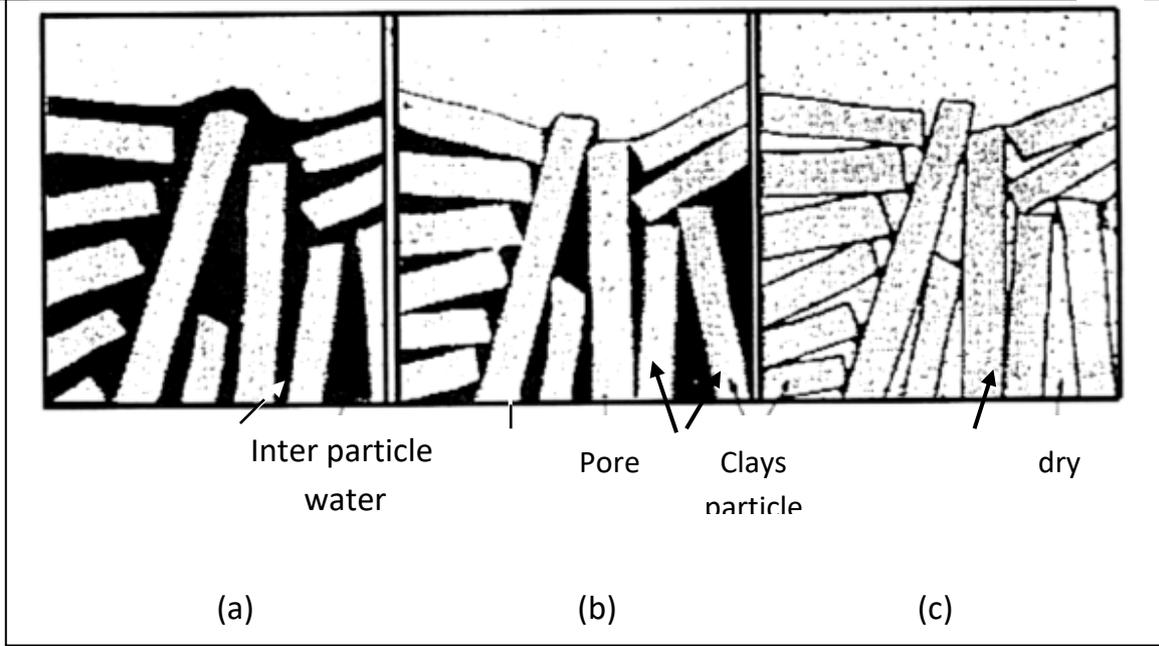
في حالة الكاؤولين يكون الإمتزاز على السطوح الخارجية، إذ أن هناك ثلاث طبقات معدنية يمكن أن تمتز الماء، لهذا ستمتلك أقصى كبر من السطوح المؤثرة. يمكن استبدال الماء الممتز على الكاؤولين بعد إزالته بواسطة التعرض إلى محيط مشبع و بعبارة أخرى فإن العملية تكون عكسية [٣٣].

## ٢- ماء النقل أو ماء بين الطبقات أو الدقائق (Shrinkage or interparticle) water

هو الماء الذي يفصل بين الدقائق الطينية ضمن المسافات الحقيقية في الكتلة اللدنة. إذا اعتبرنا مثل هذه الطبقات موجودة وقد أزيلت خلال التجفيف ستسبب النقل. من الممكن حساب سمك طبقة واحدة بواسطة الطريقة التي وصفها نورتن (Norton) وجونسون (Johnson) [٣٣]. عند كبس كتلة لدنة من الكاؤولين في اسطوانة ينفذ منها مكبس إلى أن نحصل على سمك متساوٍ بواسطة عبور الماء فوق الكميات المتساوية لنحصل على مكبوسة (Disk) ثم تقاس بعناية وتجفف لحسب النقل الخطي. ومن معرفة حجم الدقائق وكذلك معرفة معدل عدد الشرائح لوحدة الطول، يمكن حساب سمك الشريحة الواحدة من خلال العلاقة التالية:

سمك الشريحة (مايكرون) = النقل الخطي / معدل عدد الشرائح لوحدة الطول.

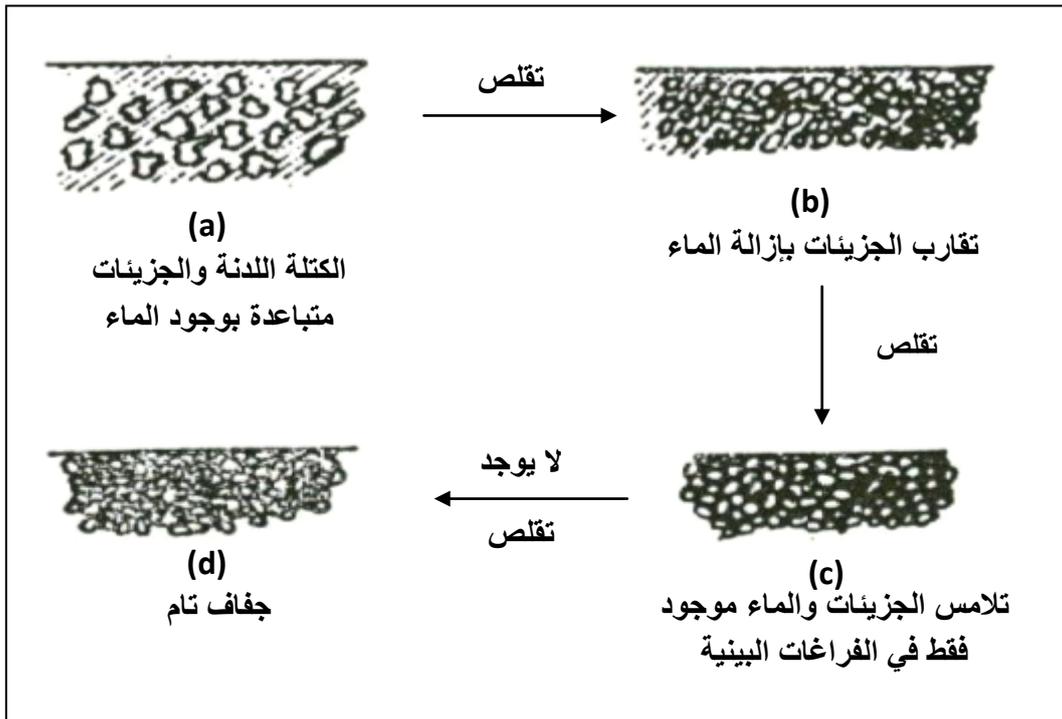
شكل (٢-٣) يوضح موقع ماء بين الطبقات في حالة التشكيل اللدن للأجسام السيراميكية.



شكل (٣-٢) مراحل عملية التجفيف في المواد السيراميكية [٣٢]

(a) موقع ماء بين الدقائق، (b) موقع الماء المسامي، (c) حالة الجفاف

عند إزالة الماء تتحرك دقائق الطبقات متجمعة مع بعضها بعضاً بوساطة الفعل الشعري والتقلص للمنتجات المشكّلة سيظهر بسرعة بسبب إزالة ماء بين الطبقات ولا يظهر عند إزالة الماء المسامي كذلك أثناء هذه المرحلة من التجفيف التقلص الحجمي يساوي مباشرة حجم الماء المزال بين الدقائق شكل (٣-٢) يوضح التقلص للأجسام اللدنة أثناء التجفيف [٣٢].



شكل (٤-٢) النقل للأجسام اللدنة أثناء التجفيف [١٤]

### Pore Water

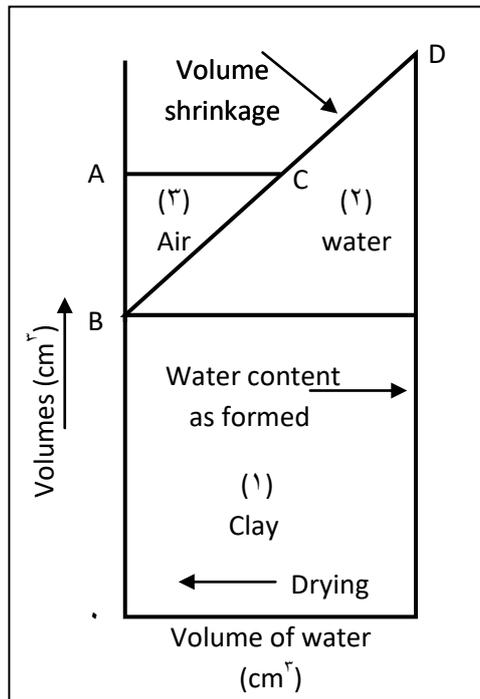
### ٣- الماء المسامي

هو الماء المتبقي في الفراغات بين الدقائق بعدما أزيلت شرائح الماء. يتنوع من (١٠-٢٦)% على أساس الوزن الجاف للطين. أن أهمية هذا الماء تتضح من خلال الشكل (٢-٥)، والذي يمثل مخطط تقلص الطين والماء.

الجهة اليسرى من المخطط تمثل الطين الجاف. الخط (٠A) يمثل حجم الأقصى للطين الجاف (Bulk Volume). (٠B) يمثل الحجم الحقيقي للطين. (AB) الحجم المسامي.

المكونات الثلاث للنظام هي: الطين - الماء - الهواء. والتي تظهر في المجالات. حيث،

١- الطين ٢- الماء ٣- الهواء.



شكل (٥-٢) مخطط تقلص (الطين - الماء) [٣٣]

نبدأ بكتلة لدنة من الطين والماء (Clay - Water) عند النقطة (D) التجفيف يسير على طول الخط (DC) إذ أن غشاء الماء قد فقد ولكن بدون دخول الهواء إلى النظام عند النقطة (٠) الدقائق تلامست ولا يحدث تقلص إضافي، لذلك معظم الحجم يتبع الخط الأفقي (CA) وكذلك الهواء يدخل الكتلة بدلاً من الماء المفقود. إذا اتبع معظم الحجم (CB) فإن دقائق الطين ستكون معاً تماماً وبشكل كامل مثل طابوق الجدار لتعطي مسامية صفرية عند الجفاف. الماء المسامي فقد كلياً لكون الماء الممتز على السطح قد فقد ولعدم وجود ضيق في المسامات وبموجب الخاصية الشعرية فإن الماء المسامي يزال أثناء التجفيف [٣٣].

عرفت الجمعية الأمريكية للسيراميك الماء المسامي بأنه جزء من ماء اللدونة الذي نحصل عليه من النقطة التي يتوقف عندها النقل حتى تصل قطعة الطين تقريباً إلى الوزن الثابت عند درجة حرارة (١٠٠°C). وماء النقل بأنه جزء من ماء اللدونة الذي نحصل عليه من أعلى نقطة عند توقف النقل. لذلك [٣١]:

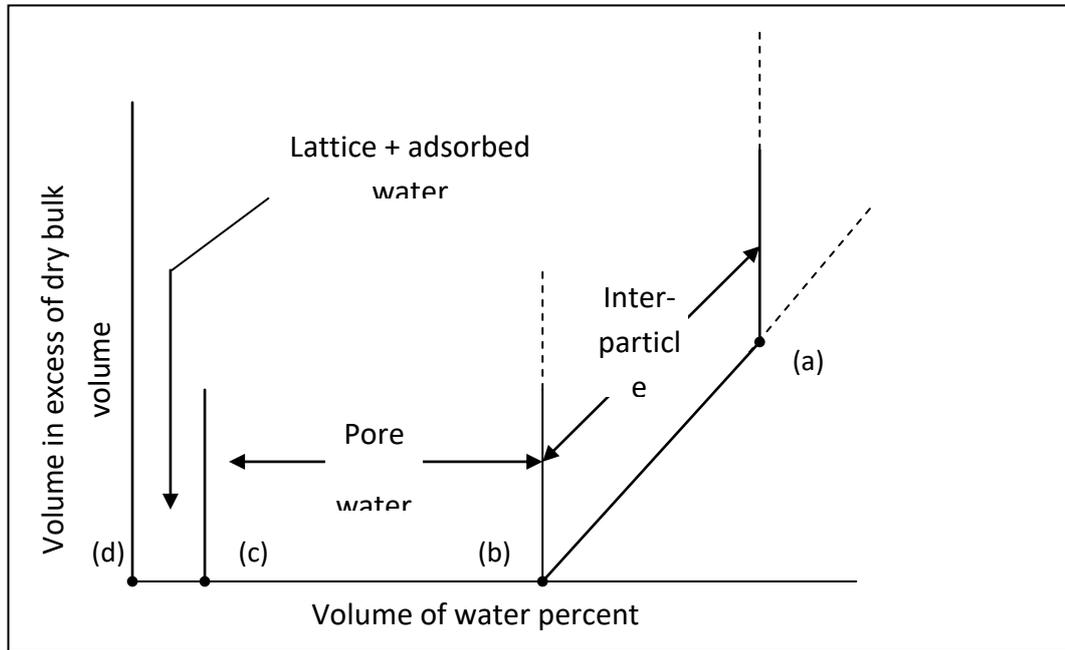
ماء اللدونة - ماء النقل = الماء المسامي.

$$R = \frac{V_p - V_d}{V_d} \times 100 \quad (\text{٤})$$

$$M = B - R \quad (\text{٥})$$

إذ أن: R = النسبة المئوية لماء التقلص،  $V_p$  = الحجم اللدن (سم<sup>٣</sup>)،  $V_d$  = الحجم الجاف (سم<sup>٣</sup>)،  
 $W_d$  = وزن العينة الجاف (غم)، M = النسبة المئوية للماء المسامي، B = النسبة المئوية لماء اللدونة وتم احتسابها حسب العلاقة  
 (٣).

عموما تحوي المنتجات اللدنة التشكيل كلا النوعين [ الماء المسامي والماء بين الطبقات ] وهذا صحيح دائما في سيراميك الصب الانزلاقي. أما السيراميك المصنع بالضغط فإنه يحتوي على ماء بين الطبقات قليل جداً ولهذا السبب لا يظهر تقلص كبير، شكل (٢-٦) الذي يوضح الأنواع المختلفة من المحتوى المائي [٣٢].

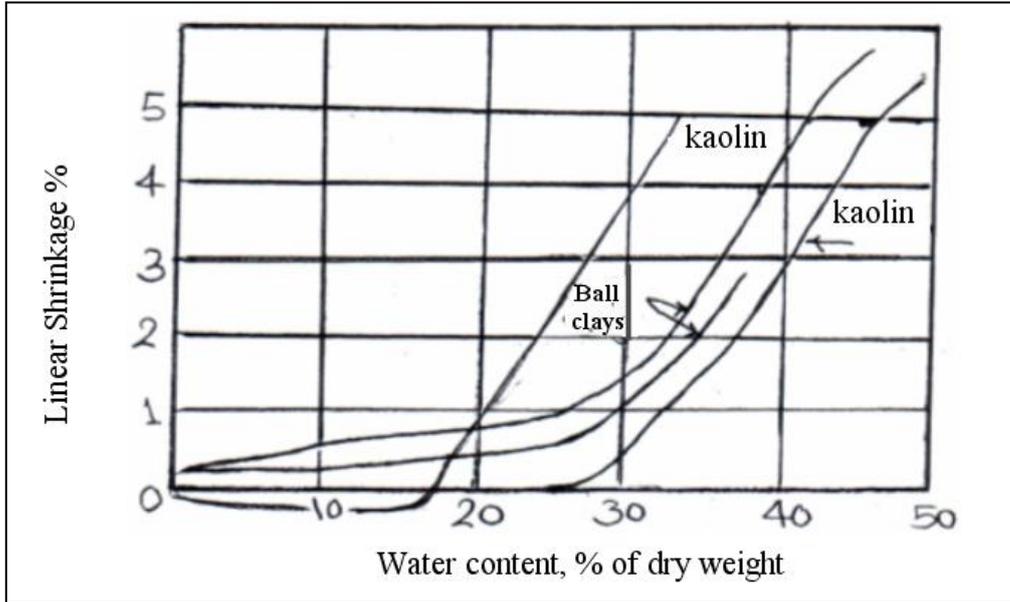


شكل (٦-٢) الأنواع المختلفة من المحتوى المائي [٣٢]

٤- ماء الشبكة البلورية  
 آخر من يطرد خلال عملية التجفيف، ماء الشبكة البلورية وماء الإمتزاز متشابهان، إذ أن كل منهما يمتلك أبعاد جزيئية فقط على العكس من شرائح ماء بين الطبقات، كذلك يمتلك كل منهما طاقة حرة واطئة بالنسبة لماء بين الطبقات أو الماء المسامي كنتيجة لجذب الماء للدقائق نفسها بسبب دخول الماء الشبكي التركيبي البلوري عند نقاط محددة [٣٣].

هذه الجزيئات لا تكون في مواقع عشوائية ووجودها يتضح عند حساب حيود الأشعة السينية. يجب أن لا يخلط بين الماء الشبكي وما يسمى بماء الهدرجة والذي يتكون خلال انفصال البلورات ولا يكون موجوداً في كل الأطوار [٣٢].

يعطي الطين الطبيعي منحنيات تقلص شكل (٧-٢) التي تتفاوت بتردد شرائح الماء وخصائص الرص للدقائق. توضح بعض الأطين وبشكل خاص الطين الكروي (Ball Clay) تقلص ثانوي للأجزاء كنسبة مئوية لأخر ماء مزال. وهذا من غير شك بسبب إزالة ماء الشبكة بكميات صغيرة [٣٣].



٢)

شكل (٧-٢)  
تقلص  
الجفاف  
للأطين  
الطبيعية

[٣٣]

الشكل (٧-٢) حالة التمدد لبعض الأطين في نهاية دورة التجفيف، ولكن ممكن أن يعود إلى التحرر من الإجهادات عند نهاية الأنابيب الشعرية عند آخر أنابيب شعرية التي أصبحت فارغة. وهذا يجعل الأجسام السيراميكية تمتلك تقلصاً جافاً قليلاً، بالمقارنة مع الطين لوحده. كما أن اندماج الأجزاء الخشنة غير لدنة نسبياً يقلل من تردد شرائح الماء وينتج مسامية أقل عند الجفاف [٣١].

#### Water of Hydration

#### ٥- ماء الهدرجة

يمكن أن تزداد كمية ماء الهدرجة في بعض المواد كنتيجة للتفكك الحراري خلال الحرق الأولي.

عندما يسخن الكاؤولين تقريباً أعلى من (٤٥٠°C) فإن التركيب البلوري يتغير بإزالة مجموعة الهيدروكسيل (OH-Group) ويتكون تركيب ميتاكاؤولين (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·٢SiO<sub>2</sub>).

إن فقدان مجموعة الهيدروكسيل يترك فجوات في التركيب، تلك الفجوات تُغلق تدريجياً بواسطة إعادة ترتيب الذرات في وحدة الخلية هناك (OH<sup>-</sup>) التي ستتغير إلى



الـ (O<sup>--</sup>) الباقية ستمتلك طاقة الربط نفسها كما في (OH<sup>-</sup>) وتكون تماماً داخل التركيب [٣٣].

## ٣-٢ الخصائص بعد التجفيف Properties After Drying

بعض المواد السيراميكية تستعمل في حالة الجفاف أي بشرط عدم الحرق، لذلك الخاصية الأساسية التي يجب أن تعتمد للمنتج المجفف هي المتانة الميكانيكية. هذا يعني المتانة الرطبة (Green Strength) المتانة المطلوبة للاستعمال قبل الحرق.

متانة الجفاف تتضح بشكل كبير مع طبيعة المنتجات السيراميكية. فالمواد السيراميكية المغناطيسية والفيرومغناطيسية المصنعة بالضغط عادة تكون متانة الجفاف ضعيفة جداً، بسبب إهمال معيار اللدونة المعتمدة في الطين تلك المنتجات السيراميكية تكون صغيرة بشكل اعتيادي لذلك يتطلب إجراء معالجة وبعناية لكي تمنع إجهادات التمزق. هذه المنتجات لا يتم تجفيفها بصورة تامة قبل دخولها إلى الفرن وذلك بسبب تغيراتها الحجمية خلال التجفيف تكون غير مهمة على عكس المنتجات السيراميكية المجففة المحتوية على نسبة عالية من الأطنان مع سعة كبيرة لقاعدة التبادلات تمتلك متانة جفاف كبيرة جداً [٣٢].

## Liner Dry Shrinkage

## ٢-٣-١ تقلص الجفاف الخطي

أن تقلص الجفاف الخطي للأطنان من الممكن أن يتنوع من (٠٪) للأطنان [الخشنة، الرملية، غير اللدنة] إلى (١٥٪) للأطنان العالية اللدونة وذات الحبيبات الناعمة. تقلص الجفاف وهو خاصية مهمة، الزيادة المفرطة بالتقلص تسبب تشققات الجفاف والحرق والالتواء والتشوه للعينة. من المهم أن يعرف مدى تقلص الجفاف والحرق من أجل عمل السماح المطلوب في صناعة الأجسام الرطبة وكذلك شكل و حجم العينة النهائي. يمكن أن يحسب تقلص الجفاف بواسطة قياس إما التقلص الخطي أو التقلص الحجمي في الحالة الرطبة وبالتالي في الحالة الجافة المتصلبة. الفرق بين القيمتين هو التقلص الجاف [٣٢].

يعرف التقلص الذي يحدث للجسم أو للطين عند جفافه من القوام التشكيلي اللدن العادي بالتقلص الرطب إلى الجفاف للمادة ويعبر عنه عادة بنسبة مئوية إما بالطول الرطب الأصلي أو بالطول النهائي الجاف أي إنه:

$$[(\text{الطول الرطب} - \text{الطول الجاف}) / (\text{الطول الرطب})] \times 100 \dots\dots\dots (٦)$$

$$\text{أو } [(\text{الطول الرطب} - \text{الطول الجاف}) / (\text{الطول الجاف})] \times 100 \dots\dots\dots (٧)$$

يعتمد معدل التجفيف على نوع المادة فضلاً عن ذلك على شكل المنتج. كلما ازدادت مساحة السطح بالنسبة إلى حجم المنتج كلما زاد معدل التجفيف [١٤].

ويتم حساب التقلص الحجمي من القانون [٣٢]:

$$\dots\dots\dots (٨) \quad b = \frac{V_p - V_d}{V_d} \times 100$$

$b =$  التقلص الحجمي % (النسبة المئوية)،  $V_p =$  الحجم اللدن،  $V_d =$  الحجم الجاف.

وكذلك يحسب التقلص الخطي من حساب التقلص الحجمي % (النسبة المئوية).

$$\dots\dots\dots (٩) \quad a = -1 + \left( \sqrt{1 + \frac{b}{100}} \right) \times 100$$

إذ أن (a) النسبة المئوية للتقلص الخطي.

وكذلك يمكن حساب كل من التقلص الحجمي والخطي على أساس الحجم اللدن كما يلي:

$$\text{Volume drying shrinkage (plastic basic)} \dots\dots\dots (١٠) \quad b_p = \frac{V_p - V_d}{V_p} \times 100$$

$$\text{Linear drying shrinkage (plastic basic)} \dots\dots\dots (١١) \quad a_p = 1 - \left( \sqrt{1 - \frac{b}{100}} \right) \times 100$$

ويمكن حساب نسبة التقلص الخطي مباشرة من القانون [٥٤]:

$$\text{نسبة التقلص الخطي} = \frac{(\text{الطول اللدن} - \text{الطول الجاف})}{\text{الطول اللدن}} \times 100 \dots\dots\dots (12)$$

X : الطول اللدن (الأساس الجسم اللدن). أو

X : الطول الجاف (الأساس الجسم الجاف).

## Dry Strength

## ٢-٣-٢ متانة الجفاف

نعني بمتانة الجفاف تلك المتانة التي تكتسبها المادة بعد التشكيل والتجفيف قبل عملية الحرق ومن المهم جداً أن تكون هذه المتانة بدرجة كافية لتمكن المادة المصنوعة من أن تكون بشكلها النهائي، وجعلها مهيأة للحرق بدون كسر. وتعتمد أدنى متانة جفاف مسموح بها في الجسم على شكل وسمك المادة المصنوع منها ومدى ما تحتاجه من معالجة في الحالة الجافة.

اللدونة العالية و متانة الجفاف المرتفعة ترتبطان عادة أحدهما بالأخرى وهكذا كلما زاد المحتوى الطيني للمادة ونعم حجم دقائق الطين كلما أمكن الحصول على متانة أعلى للمنتجات الجافة. تعزى متانة الجفاف العالية مثلها مثل اللدونة للنعومة والشكل المسطح لدقائق الطين عند الجفاف ليكون هناك مساحة تلامس سطحية واسعة بين الدقائق وكلما صغر حجم الدقائق واتخذت الشكل المسطح زادت هذه المساحة وزادت متانة الجفاف.

إذا كان المنتج مصمماً أو مصنوعاً بطريقة بحيث تتكون فيه إجهادات أثناء التصنيع أو إذا جف بصورة سريعة بحيث تظهر الإجهادات عند التقلص فعندئذ قد يحدث كسر حتى تحت حمل صغير جداً، أما إذا كانت الإجهادات كبيرة جداً فعندئذ يحدث الكسر أثناء التجفيف دون التعرض إلى أي جهد خارجي وإذا بقي المنتج سالمًا حتى وقت الحرق فعندها يمكن أن ينكسر أثناء الحرق. تأخذ دقائق الطين نسفاً اعتبارياً في الحالة اللدنة ولكن عند تسليط قوة عليها فإن الدقائق تميل إلى صف نفسها بحيث يكون محورها الطولي مواز لاتجاه القوة.

عند تجفيف الكتلة اللدنة تتلامس أوجه عديدة مستوية من الدقائق فتكبر مساحة سطح التلامس ومن ثم تزداد متانة الجفاف. وهكذا كلما ازدادت القوة المستعملة في التصنيع اللدن زاد اصطفاف الدقائق وزادت متانة الجفاف [١٤].

من المعروف إن الأجسام الطينية عندما تجف نهائياً تمتلك متانة كبيرة حتى قبل الحرق وهذه المتانة يمكن المحافظة عليها إلى درجة حرارة تحلل الطين لذا من الواضح عدم اعتمادها على الماء الممتاز. مع ذلك لا يكون الطين لدناً ولا يظهر متانة عندما يخلط مع سوائل غير قطبية مثل النفط والأثير لذلك من المحتمل أن الإمتزاز القوي وبقاء أغشية السائل يكون أساسياً من أجل نشوء المتانة واللدونة.

مثل هذه الأغشية تتشكل فقط بوساطة السوائل القطبية. وكذلك من الممكن أن تُجهز مجموعة الهيدروكسيل بأواصر (OH) التي يجب أن تكون موجودة، إن السوائل مثل الأسيتون لا تعمل على ظهور اللدونة خلال التجفيف، تلك الأغشية المستقرة ستتقلص. قوة الشد السطحي يمكن أن تسحب دقائق الطين لتتقرب بعضها لبعض لتعطي أكبر مساحة تماس. عندما تكون آخر طبقة من جزيئات الماء قد أزيلت، ستتوقف قوى التنافر الالكتروستاتيكية والقوى التي تعمل هي فقط القوى قصيرة المدى من نوع قوى فاندرفالز التي من المحتمل أن تكون مسؤولة عن متانة الجفاف [٢٩].

## ٢-٣-٣ العوامل المؤثرة في متانة الجفاف

## Factors Affecting Dry Strength

الأطيان التي تستعمل في عمليات التشكيل اللدنة هي متكثلة ولكن عند إضافة مواد مشتتة "Dispersant" فإن الدقائق لا تبقى كتجمعات حرة لمدة طويلة ولكن تبقى منفردة على شكل حبيبات إلى أن يكون النظام قد حصل جفاف تام بعدها ستتجمع بشكل كثيف جداً مع زيادة مساحة التماس لهذا السبب يكون الجسم المشكل ذو متانة أكبر. المواد غير اللدنة مثل الرمل والصوان تقلل متانة الجفاف وبشكل واضح عندما تضاف إلى الطين وفي الحقيقة يُعد الرمل ذي الحجم الحبيبي المعلوم الذي يضاف إلى الطين قبل أن يفقد تماسكه مقياساً لقدرة الربط أو اللدونة التي يتمتع بها الطين [٢٩].

## ٤-٢ الحرق - التلييد

## Firing- Sintering

الحرق هي مرحلة مهمة في إنتاج معظم المنتجات السيراميكية. الغرض منها هو تلييد الدقائق في كتلة متماسكة بوساطة التلييد، عملية التلييد تعمل تغيرات مهمة في المنتج السيراميكي كما يلي:

١- تقليل المساحة السطحية الكلية.

٢- تقليل حجم الجسم.

٣- زيادة المتانة.

بالرغم من أن بعض عمليات التلييد لا تنتج تغيرات طورية ولكن الشائع أن يصادف حدوث تغيرات مثل تكوين الطور السائل. تغيرات الأبعاد التي تحدث خلال الحرق لها الأهمية نفسها لتلك التغيرات التي تحدث خلال التجفيف لأن التقلص في الغالب يحدث نتيجة تليد المادة أو المواد خلال الحرق. عملية الحرق بشكل عام تؤثر بعلاقات كبيرة جداً في السيطرة على الخواص بالمقارنة مع المعاملات الحرارية الأخرى [٣٢].

## ١-٤-٢ التفاعلات التي تحدث للأطيان أثناء الحرق

### Reaction Occurring on Firing

تُوضّح التفاعلات التي تحدث أثناء الحرق للأجسام السيراميكية النموذجية المحتوية على الطين والسليكا والمواد المساعدة على الصهر بشكل عام كما يلي:

١. تصاعد أي كمية من الرطوبة الباقية في المنتج بعد تجفيفه، أي رطوبة ممتصة من الجو الخارجي على سطح النموذج عند درجة حرارة (١٠٠°C).

٢. تبدأ المعادن الطينية في التحلل عند درجة حرارة (٤٥٠-٥٠٠°C) تقريباً إذ تخرج مجموعات الهيدروكسيل الموجودة في تركيب الطين على شكل ماء ويعرف هذا بإزالة الهيدروكسيل [إزالة جزيئات الماء] .



إن هذا التفاعل يضعف الجسم لان الميبتاكاؤلين المتكون ليس له قوة ترابط مثل الطين وبعد إتمام التفاعل سيبرد الجسم ثم يضاف له الماء فتتكون بعض اللدونة وقد لا تتكون، أي إن انهيار تركيب الطين بهذا التفاعل يفقده قدرته على أن يكون لدناً عند خلطه مع الماء.

٣-تحترق المادة العضوية الموجودة بالجسم عند أي درجة حرارة بين (٣٠٠-٧٠٠°C) أو حتى أعلى منها وتعتمد درجة الحرارة وسهولة الإزالة على نوع المادة العضوية الموجودة ومعدل التسخين.

بعض التحولات الطورية وخاصة تحولات ألفا- بيتا كوارتز عند (٥٧٣°C) وإذ أن هذا التغير يتضمن تمدداً لذلك يجب أن ينخفض معدل ارتفاع درجة الحرارة بالقرب من حرارة التحول للأجسام المحتوية على الكوارتز. وذلك لأن الزيادة السريعة في درجة الحرارة تؤدي إلى تشققات في هذه الأجسام [١٤] .

## Sintering Mechanism

## ٥-٢ آلية التلييد

خلال التلييد، الدقائق تتجمع متقاربة من بعضها والمسامية نفل، القوة النشطة ستقل من طاقة السطح الكلية بسبب اتصال ونمو الحبيبات، الذرات في الحبيبات الصغيرة انتقلت إلى الكبيرة والمسامات تستبدل بالمادة الصلبة. انتقال الكتلة هذا يتميز إلى أربع أشكال ولكن آلية الالتقاء تتوضح بالشكل (٢-٨):

١- التلييد يمكن أن ينشأ بوساطة اللزوجة أو الانسياب اللدن.

٢- الانتشار يمكن أن يحدث ليس فقط على طول الحدود الحبيبية بين الدقائق المتماسكة ولكن داخل الحبيبات نفسها.

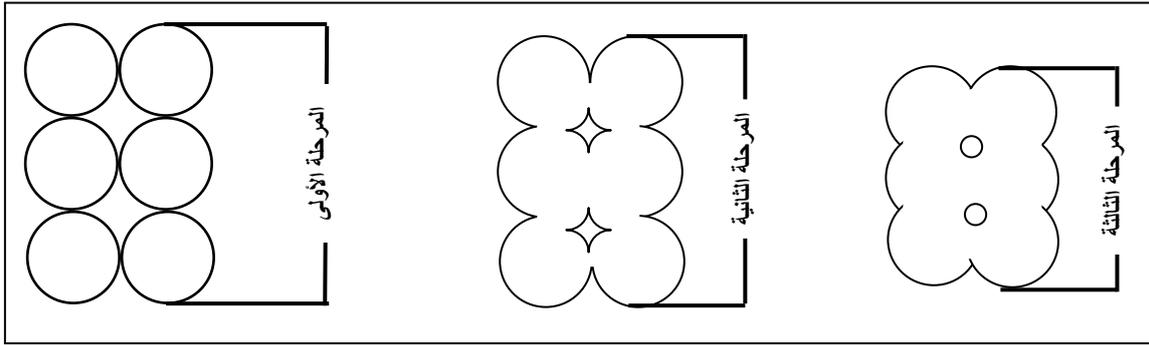
٣- مواد متطايرة كبيرة تبخرت من السطوح المحدبة تتكثف على السطوح المقعرة بسبب اختلاف الضغط البخاري.

٤- طاقة السطح الصلب في السائل تكون أكبر على السطوح المحدبة بالمقارنة بالسطوح المقعرة لهذا السبب تليد الطور السائل نتيجة للاختزال الحاصل بطاقة السطح.

جميع الآليات المذكورة أعلاه يمكن أن تكون سائدة في مواد معينة. الآليات الباقية يمكن أن تكون موجودة ولكن ضمن زمن ونطاق ضيق.

٥- الانسياب اللزج يكون سائداً في تليد الدقائق الزجاجية.

٦- درجات الحرارة المرتفعة تزيد بشكل واضح نسبة التليد بسبب نسبة الانسياب التي تشبه اللزوجة وهي لوغاريتمية تتعلق بمعكوس درجة الحرارة. عملية الكبس الساخن يمكن اعتبارها بالمقارنة انسياب اللزج بمعنى تكتل الدقائق حرارياً. قوى السطح هنا تلحق بالقوى الخارجية المطبقة [٣٢].



شكل (٢-٨) يوضح آلية التليد [٣٢]

## ٢-٥-١ التليد بوجود الطور السائل Liquid Phase Sintering

إن تكثيف المواد السيراميكية بدون وجود الطور السائل عملية صعبة بسبب القابلية الانتشارية الواطئة في الحالة الصلبة ومن أجل التغلب على هذه الصعوبة في عملية التليد تضاف بعض المركبات التي تساعد على تكوين طور سائل في أثناء عملية التكتيف، ويشار إلى هذه العملية بالتليد بوجود الطور السائل (L.P.S.) (Liquid Phase Sintering) ولهذه التقنية أهمية كبيرة بسبب سرعة الوصول إلى مرحلة التكتيف التام، ولذلك استعملت بشكل واسع في تصنيع السيراميك، إذ أن الطور السائل المتكون يربط المكونات الصلبة وعليه تحدث حركة دقائق المسحوق في المكبوسة وبالتالي اكتمال مرحلة التكتيف بواسطة الضغط الشعري (Capillary Pressure) [٣٤].

أشار [Kingery] [٣٥]، إلى حدوث التكتيف (Densification) بوجود الطور السائل خلال ثلاثة مراحل متميزة، المرحلة الأولى ويشار لها بمرحلة إعادة ترتيب دقائق المسحوق في المكبوسة، إذ يبذل السائل المتكون ضغطاً شعرياً فيقل الاحتكاك بين الدقائق ويعد السائل المتكون وسطاً ملائماً للمرحلة الثانية التي تمثل مرحلة الذوبان وإعادة الترسيب (Solution and Reprecipitation)، وقد تتداخل هذه مع مرحلة إعادة الترتيب، وتختزل المسلمات في المرحلة الأخيرة.

وقد يتكون الطور السائل بنسبة قليلة بحيث يربط الحبيبات مكوناً طبقة رقيقة من الطور السائل (Liquid Film) تحيط بالحبيبات الصلبة، كما في إضافة نسبة قليلة من الكاؤولين إلى أوكسيد المغنيسيوم أو تليد الألومينا التي تحتوي على نسبة قليلة من سيليكات الأتربة القلوية (alkaline earth silicate) كمادة رابطة [٣]. ومن الممكن أن يتكون الطور السائل في أثناء عملية التليد بدون وجود إضافات كما في تليد الأجسام السيراميكية المكونة من نسب من السيليكا والألومينا عند درجة حرارة  $1660^{\circ}\text{C}$ ، إذ أن سلوك التليد (معدل التكتيف) يعتمد بشكل مباشر على نسبة الطور السائل، إذ أن الجسم السيراميكي المتكون من (٧٣%) ألومينا ذا معدل تكتيف أكبر من الجسم السيراميكي المتكون من (٧٥%) ألومينا، إذ أن الجسم الأول بعد التليد يتكون من المولاييت مع طبقة رقيقة من الطور الزجاجي (Glass Films) على امتداد الحدود الحبيبية مما دل على تكون نسبة قليلة من الطور السائل في أثناء التليد في حين لم يستدل على وجود طور زجاجي في الجسم السيراميكي الثاني. إن الطبقة الرقيقة من الطور السائل تزيد معامل

الانتشار عبر الحدود الحبيبية دون ظهور مرحلة إعادة الترسيب في حين أدت النسبة الكبيرة من الطور السائل إلى حدوث مرحلة إعادة الترسيب مما أدى إلى حدوث تكثيف أكبر [٣٦].

## ٦-٢ التقلص الناتج من الحرق Burning Shrinkage

عند حرق الأجسام الطينية ستعاني تقلص إضافي يعرف بتقلص الحرق ويشبه تقلص الجفاف من حيث التنوع ما بين حدود واسعة ويعتمد على العديد من العوامل مثل:

- ١- نوع الطين الموجود.
- ٢- درجة نعومة الطين.
- ٣- كمية المواد العضوية في الطين.
- ٤- طريقة تصنيع الجسم.
- ٥- درجة حرارة الحرق.

بصورة عامة الأطنان اللدنة تمتلك تقلص أكبر من الأطنان غير اللدنة في كل من التجفيف والحرق. كذلك وجود المواد العضوية في الأطنان يرافق زيادة تقلص الحرق. إن تقلص الأطنان يزداد عند ازدياد درجة الحرارة ضمن حدود معينة. عند زيادة درجة الحرارة سوف يحدث الانصهار والتفكك إذ تنتوع الأطنان بشكل واسع في سلوكها عند الحرق. أكبر تقلص حرق يحصل لأطنان عند درجة حرارة واطنة بالمقارنة بالأطنان الأخرى التي تتطلب حرارة أكثر ارتفاعاً قد ينضح نوع من الطين عند درجة حرارة عالية يكون له تقلص واطنى بالنسبة لنوع آخر ينضح عند درجة حرارة واطنة.

تقلص الحرق هو خاصية مهمة للأطنان إذ زيادته يحدث تشويه والتواء وتشققات في الجسم، على أية حال، من المهم ملاحظة تقلص الحرق من أجل السيطرة على حجم المنتج النهائي ليس عند استعمال الأطنان فقط ولكن عند استعمال الأجسام الحاوية على الطين. إن حساب تقلص الحرق (النسبة المئوية لتقلص الحرق) يكون على أساس الحجم الجاف والطول الجاف وبحسب الصيغة:

$$\text{نسبة (تقلص الحرق الخطي)} = \frac{\text{طول النموذج بعد التجفيف} - \text{طول النموذج بعد الحرق}}{\text{طول النموذج بعد التجفيف}} \times 100 \dots\dots\dots (١٣)$$

$$\text{نسبة (تقلص الحرق الحجمي)} = \frac{\text{حجم النموذج بعد التجفيف} - \text{حجم النموذج بعد الحرق}}{\text{حجم النموذج بعد التجفيف}} \times 100 \dots\dots\dots (١٤)$$

$$\text{نسبة (تقلص الحرق الخطي)} = 1 - \sqrt[3]{\frac{\text{نسبة تقلص الحرق الحجمي}}{100}} \times 100 \dots\dots\dots (١٥)$$

إن سلوك الطين عند الحرق يتضمن تغيرات كبيرة في المسامية والحجم واللون والمتانة والامتصاص والمتانة الميكانيكية والجاذبية النوعية الحقيقية والظاهرية [٣١]. كمية تقلص الحرق الناتج تعتمد على كل من الزمن ودرجة الحرارة إذ [الزمن الأطول عند درجة حرارة واطنة يكافئ الزمن الأقصر عند درجة حرارة مرتفعة] كمية التقلص كذلك تتغير مع المسامية الأولية. إن حدوث تقلص غير متساوٍ للجسم السيراميكي خلال الحرق يمكن أن يعزى إلى عدة أسباب منها:

- ١- التوزيع غير المتساوي للحرارة داخل المنتج.
- ٢- زمن بقاء المادة عند درجة حرارة التلييد يتنوع بشكل ملحوظ من نقطة إلى نقطة أخرى هذا يعني (المقطع الأسماك يختلف عن المقطع الأخف).

- ٣- هنالك دقائق تنفصل خلال التشكيل مسببة اختلافاً في حجم الدقائق أو عدم التركيب.
- ٤- تقلص عدم التماثل (عدم تشابه الخواص في جميع الاتجاهات) نتيجة اختلاف توجيه الدقائق.
- ٥- انسياب يحدث بسبب الإجهادات التي تسببها الجاذبية خلال فترة ارتفاع الحرارة عند الحرق.
- ٦- هنالك احتكاك بين قاعدة الفرن والقطعة المتقلصة.

الاهتمام والدقة في طريقة التشكيل والتجفيف والحرق يمكن أن تجنب التغيير في الأبعاد. أحياناً هنالك تمدد بالحجم خلال الحرق. واحدة من هذه الحالات تسهم في ذلك التمدد:

- أ- التغيير بالطور من الطور الأكتف إلى الطور الأقل كثافة.
  - ب- الغازات التي تنشأ بعد التزجج الأولي.
- وفي النهاية سيحدث الانتفاخ [٣٢].

## ٧-٢ المسامية Porosity

تعرف المسامات بأنها فراغات ولها قياس وشكل وترتيب معين اعتماداً على الكثير من الظروف، وغالباً ما يكون هنالك اتصال أو تشابك بين الاكثرية منها في الشكل (٢-٩) [٣٧]، يمكن أن تصنف المسامات إلى عدة أنواع:

- ١- المسامات المغلقة أو المحكمة (Closer and Sealed Pores) والتي تمثل بالحرف (a).
- ٢- المسامات المفتوحة (Open Pores) والتي قد تكون متصلة أو منفصلة وكلاهما له تأثير كبير على خواص الأجسام السيراميكية، والمسامات المفتوحة تصنف إلى عدة أنواع :
  - أ-المسامات القنواتية المتصلة بالمسامات المعزولة
  - ب-المسامات غير النافذة (Blind-Alley Pores) التي تمثل بالحرف (c).
  - ت-المسامات العقدية (Loop Pores) التي تمثل بالحرف (d).
  - ث-المسامات الحبيبية أو التجويفية المرتبطة ببعضها برقاب ضيقة (Pocket Pores Some With Narrow Neck) التي تمثل بالحرف (e).

ج-المسامات الدقيقة (Micro Pores) التي تكون صغيرة جداً لا تُملأ بالماء أو أي سائل في أي حالة ، التي تُمَثَل بالحرف (f) [٣٨] .

هنالك نوع آخر من المسامات يسمى بالمسامات المستمرة (Continuous Pores) التي تمتد بمسار معقد من احد الاوجة الخارجية للجسم إلى الوجه الآخر [٣]. والشكل (٢-٩) يوضح مخططاً لأنواع المسامات المذكورة في أعلاه [٣٨].

إن الجسم السيراميكي قبل عملية الحرق يكون ذا مسامية عالية وان أغلبيتها تكون على شكل مسامات مفتوحة، ولكن في المراحل الأولى من عملية الحرق يختزل قسم منها ويتحول إلى مسامات مغلقة وبهذا تزداد النسبة المئوية للمسامات المغلقة إلا أنها سرعان ما تقل مع تقدم عملية التلييد [٣].

تعد أكثر الطرق شيوعاً لوصف المسامية هي المسامية الظاهرية (Apparent Porosity) التي يقصد بها نسبة احتواء الجسم السيراميكي من المسامات المفتوحة إلى الحجم الكلي للجسم السيراميكي، وغالباً ما ترافق امتصاص كمية من الماء وذلك لان كمية الماء الممتص تمثل حجم المسامات المفتوحة التي يملؤها الماء.

وهناك مفهوم آخر للمسامية يعرف بالمسامية الحقيقية (True Porosity) وهي النسبة بين الحجم الكلي للفجوات لنوعي المسامات المفتوحة والمغلقة إلى حجم المادة الكلي ، ويمكن تحديد المسامية باستعمال العلاقات التالية [٣]:

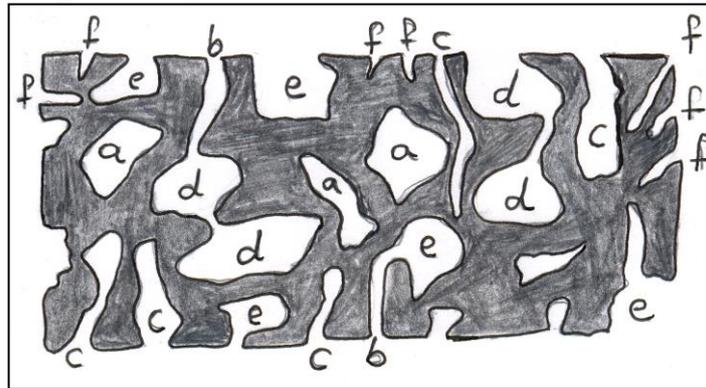
$$\dots\dots\dots(١٦) A.P\% = \left( \frac{W_s - W_d}{W_s - W_i} \right) \times 100$$

$$\dots\dots\dots(١٧) T.P\% = \left( 1 - \frac{\rho}{S.G} \right) \times 100$$

إذ:  $W_s$  يمثل وزن النموذج مشبع بالماء (gm)،  $W_d$  يمثل وزن النموذج جاف (gm)،  
 $W_i$  يمثل وزن النموذج مغمور بالماء (gm)،  $\rho$  تمثل الكثافة الوزن النوعي الظاهري ( $gm/cm^3$ )، (S.G.) تمثل الوزن النوعي  
الحقيقي ( $gm/cm^3$ ).

هناك عدة عوامل تؤثر في المسامية هي [٣٧]:

- ١- المقاس الحبيبي وشكل الحبيبات.
- ٢- التدرج الحبيبي وطريقة التشكيل.
- ٣- ضغط التشكيل وكمية المادة الرابطة.
- ٤- درجة حرارة الحرق وزمن الإنضاج.



شكل (٩-٢) مخطط توضيحي بأنواع المسامات [٣٧]

## ١-٧-٢ تأثير المسامية على تقلص الحرق

### Porosity Effects on Fired Shrinkage

إذا احتوى الجسم السيراميكي المجفف على مسامية (مسامية حقيقية True Porosity) عالية و قد أزيلت المسامية بشكل كامل خلال عملية الحرق ، تقلص الحرق الناتج سيكون كبيراً.

تعتمد المسامية على توزيع الحجم الحبيبي للدقائق (Particle Size Distribution) وذلك من خلال أفضل رص للدقائق للحصول على جسم سيراميكي كثيف الرص و ذي مسامية منخفضة.

في الأنظمة المشتتة (Deflocculated Systems) تتطابق المسامية مع أوطاً قيمة محسوبة للمسامية الحقيقية، لهذا السبب تعديل توزيع الحجم الحبيبي يُنتج أفضل رص للدقائق، المسامية ستقل وبالنتيجة تقلص الجفاف سيقل وتقلص الحرق سيقل أيضاً. أما الأنظمة المتكتلة (Flocculated Systems) أو المتكتلة بشكل جزئي (Partial-Flocculated) لا تعتمد على توزيع الحجم الحبيبي للدقائق في تقليل قيمة المسامية لذلك يتم السيطرة على المسامية في الحالات الرطبة والجافة (Green and Dry States) بواسطة تكتل النظام، ستكون المسامية عالية لذلك ستكون قيمة تقلص الجفاف وتقلص الحرق مرتفعة [٣٩].

# الفصل الثالث

## الجزء العملي والقياسات

### *Practical Part & Measurements*

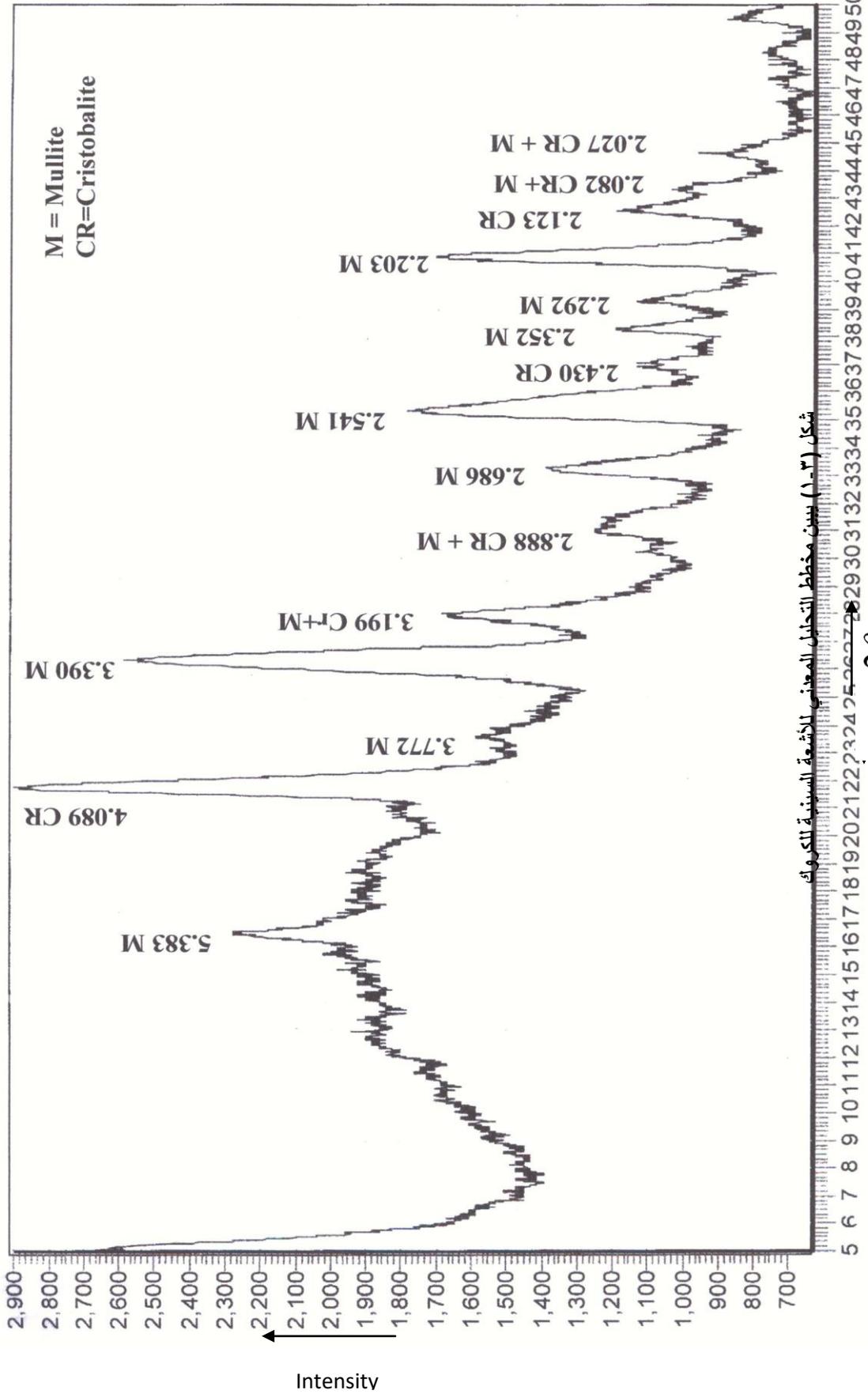
#### Primary Materials

#### ١-٣ المواد الأولية

#### Chamotte (Grog)

#### ١-١-٣ الشاموت (الكروك)

تم تحضير الشاموت (الكروك) من الكاؤولين دويخله وبذلك يحرق لدرجة حرارة  $1400^{\circ}\text{C}$  لمدة ساعتين، حيث تعتمد خاصية الثبات وعدم الانحلال بدرجات الحرارة العالية ومقاومة الصدمة الحرارية والميكانيكية لمثل هذه التطبيقات [١٧, ٢٠]، تم إجراء التحليل الكيماوي للشاموت لمعرفة تركيبية ونسبة الأكاسيد المكونة له، وكما موضح بالجدول (١-٣)، وكذلك تم إجراء التحليل المعدني للشاموت، الشكل (١-٣) الذي يوضح العلاقة بين ضعف زاوية الحيود ( $2\theta$ ) على المحور السيني والشدة على المحور الصادي، وذلك لتحديد التركيب المعدني له بواسطة جهاز حيود الأشعة السينية (XRD).



شكل (١-٣) بين مخطط التحليل المعرفي للأشعة السينية الكروك

جدول (١-٣) بين التحليل الكيميائي للمواد المستعملة في الخلطات ونسبها المئوية (%)

الكروك	الكاولين	الأكاسيد
٥٣.٩٥	٤٨	SiO <sub>٢</sub>
٢.٤٦	١.٣٧	CaO
٤٠.٤٩	٣٥.٨٩	Al <sub>٢</sub> O <sub>٣</sub>
١.٢١	٠.٩٥	Fe <sub>٢</sub> O <sub>٣</sub>
٠.٩٥	٠.٣١	MgO
٠.٨	٠.٥٧	SO
٠.١٤	١٣	L.o.I.
٩٩.٩٣%	١٠٠.٠٩%	المجموع

Loss on Ignition (L.o.I.) المواد التي تنفذ بالحرق

## Binding Materials

## ٣-١-٢ المواد الرابطة

### Kaoline

### ٣-١-٢-١ الكاولين

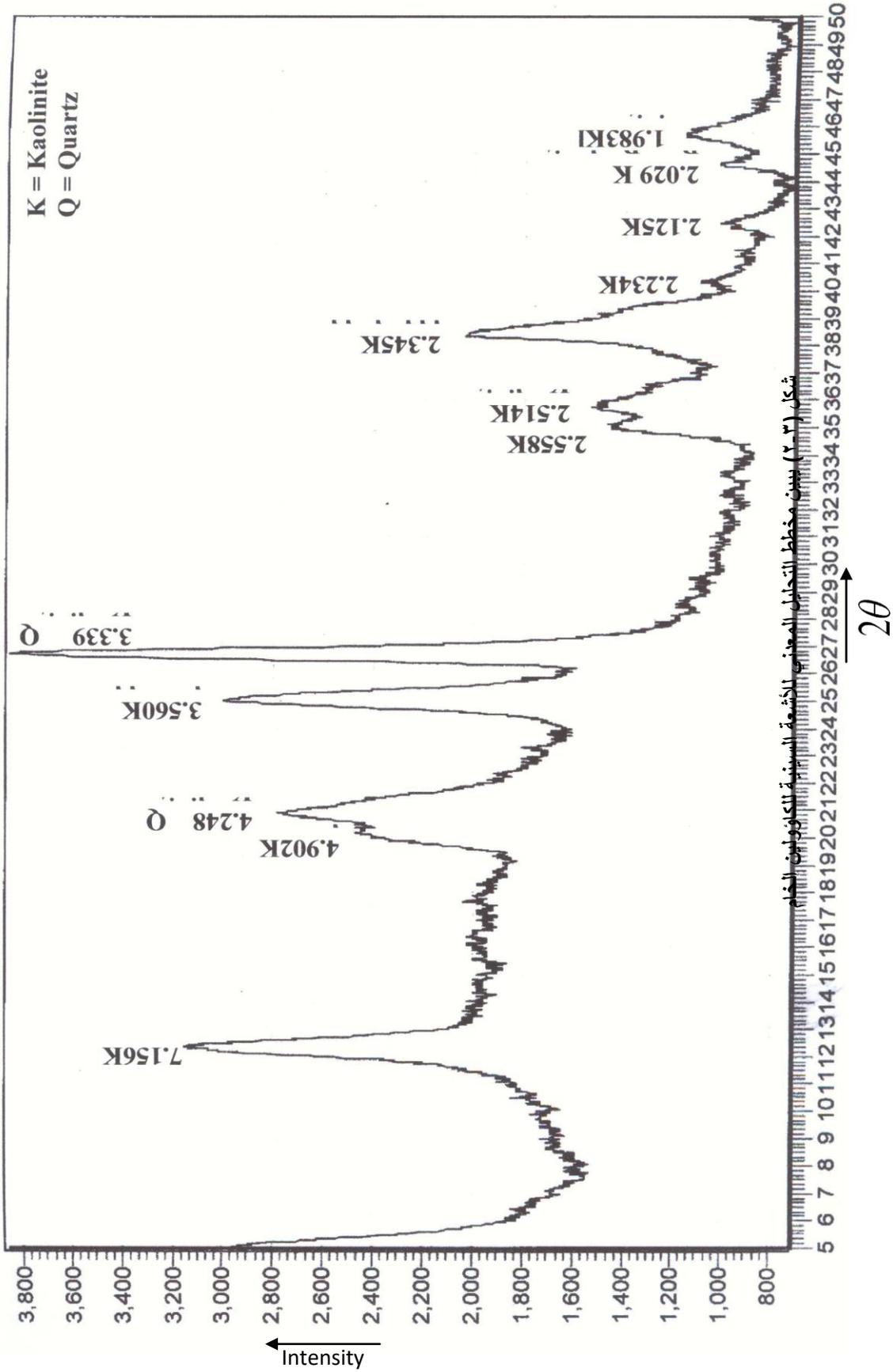
لقد تم استعمال كاولين دويخله في البحث وتم إجراء التحليل الكيميائي له لمعرفة نسبة كل أكسيد من أكاسيده، كذلك تم إجراء التحليل المعدني له الشكل (٢-٣)، وذلك لتحديد التركيب المعدني له وتم ذلك باستعمال حيود الأشعة السينية (XRD).

إن الكاولين المستعمل في البحث كمادة رابطة مكوّن من ثلاث مجموعات بالاعتماد على درجة حرارة التحميص ونسبة الـ [ بولي فايثيل الكحول (P.V.A.) ] المضاف إليه وكما في جدول (٢-٣) الذي يوضح درجة حرارة التحميص (°C) وعلاقتها بنسبة المضاف من (P.V.A.) إلى الكاولين.

جدول (٢-٣) يوضح درجة حرارة التخميص (°C) وعلاقتها بنسبة المضاف من

[بولي فاينيل الكحول إلى كاؤولين] (gm)

درجة حرارة التخميص (°C)	كاؤولين + بولي فاينيل الكحول (P.V.A.)	كاؤولين + بولي فاينيل الكحول
٣٠٠	(٠.٥٢+٩٩.٤٨)gm	(١.٩٦+٩٨.٠٤) gm
٤٠٠	(٠.٥٢+٩٩.٤٨)gm	-



شکل (۲) پهن‌بندگی اشعه ایکس برای نمونه کاوآلین و کوارتز

### ١-١-٢-١-٣ بولي فايثيل الكحول

### Poly Vinyl Alcohol

بولي فايثيل الكحول من البوليمرات الخطية التي تستطيع الذوبان في الماء وتكون معقدات مع المعادن الطينية إذ تمتلك هذه البوليمرات عدداً هائلاً من المجاميع القطبية على امتداد سلسلتها تستطيع الذوبان في الماء وهي المجاميع الفعالة نفسها التي تدخل التفاعل مع سطوح المعدن الطيني [٤٠, ٤١].

### ٢-٢-١-٣ سيليكات الصوديوم

### Sodium Silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub>)

إن المادة الرابطة الثانية المستعملة في البحث هي سيليكات الصوديوم وهي عبارة عن محلول قاعدي ذي كثافة (١.٥ gm/ cm<sup>3</sup>) ونسبة مولارية (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) بحدود (٢/١). تم استعمال سيليكات الصوديوم كمادة رابطة في البحث من أجل الحصول على قوة ربط وتقليل نسبة الماء المستعمل. إذ تم استعمالها بنسب وزنية gm (١, ١.٥, ٢, ٢.٥, ٣).

إن عمل هذه المادة المشتتة اللاعضوية هو زيادة لزوجة المحلول مما يساعد على تقليل نسبة المادة الصلبة إلى الماء. إن إعداد المحاليل الثقيلة يراعى فيه اختيار المادة المشتتة المناسبة لنوع الخلطة التي يتم إعدادها للحصول على المواصفات النهائية للقطعة المنتجة [٤٣].

إن سيليكات الصوديوم تمثل مُشْتَتاً قوياً جداً، يظهر تأثيره عند إضافة كمية صغيرة جداً حتى عندما تكون كمية الصوديوم الموجودة غير كافية لاستبدالات أيونات الطين. لذلك من الممكن لهذا النوع من المُشْتَتَات أن تُمْتَرَّ على سطح الطين وتزيد من المواقع المستبدلة للطين وتزيد كثافة الشحنة أيضاً [٤٤].

## ٢-٣ مفاهيم التشكيل

## Formation Concepts

### ١-٢-٣ عملية التكسير والطحن

### Crushing and Milling Process

تعرف عملية الطحن بأنها تقليل الحجم الحبيبي بواسطة قوى ميكانيكية لها دور أساسي في عمل مسحوق متجانس [٤٥]، إن لمدة الطحن تأثيراً على الحجم الحبيبي الذي ينعكس على قيمة المساحة السطحية، فعندما يغدو المسحوق ناعماً تقابله زيادة قيمة المساحة السطحية للمسحوق [٤٦]. وتأتي عملية الطحن بعد عملية التكسير (Crushing Process).

هنالك العديد من وسائل الطحن فمنها على سبيل المثال الطحن بالقضبان (rad mill)، الطحن بالكرات (ball mill)، والساحنة القرصية، والطحن بالمطرقة وغيرها من الوسائل. إن عملية الطحن بالكرات هي الأكثر استعمالاً لسهولة العمل بها.

طاحونة الكرات هي عبارة عن حاوية اسطوانية الشكل تدور بشكل أفقي بواسطة اسطوانتين، والاسطوانتين تدوران بواسطة محرك كهربائي، وتكون الحاوية ذات بنية متميزة وتصنع من مواد سيراميكية وتبطن بالكرات أو مؤلفة من أوكسيد الألمنيوم النقي أو أجسام سيراميكية ذات محتوى عالٍ من الألومينا يصل لأكثر من (٨٥٪) وإن كرات الألومينا ذات فعالية جيدة للطحن بسبب كثافتها العالية إذ أن وزنها النوعي (٣.٦ - ٣.٣) فتولد صدمة قوية، وهذا يؤدي إلى تقليل الوقت اللازم للطحن وبالتالي زيادة نتاج الطحن بشكل كبير. علاوة على أن كرات الألومينا تكون ذات مقاومة عالية للاحتكاك وذات صلادة كافية وهي أيضاً نقية تمنع التلوث وطويلة العمر [٤٧، ٤٨].

هنالك عوامل كثيرة تؤثر بشكل مباشر في عملية الطحن وهي:

١. نوع بطانة الحاوية.
٢. نوع الكرات وحجمها.
٣. سرعة الطحن.
٤. حجم الحبيبات للمادة المراد طحنها.
٥. تركيب وصلادة المادة المراد طحنها.

كذلك من العوامل المهمة التي يجب الأخذ بها عند الطحن هي مدة الطحن للوصول إلى الحجم الحبيبي المطلوب [٤٨]. تم استعمال طاحونة كرات في البحث من أجل إجراء عملية طحن مادة الكروك وتطلب ذلك إجراء أربع عمليات طحن ويزمن مقداره (٤ hr) لكل عملية من أجل الوصول إلى الحجم الحبيبي المطلوب، تمت عملية الطحن في مختبر المواد المتقدم في قسم الفيزياء كلية العلوم جامعة بابل.

### ٢-٢-٣ عملية تدرج المقاس الحبيبي Grain Size Distribution Process

إن الحجم الحبيبي للمساحيق له تأثير كبير في تحديد خواص المنتجات السيراميكية لأنه يؤثر في المساحة السطحية للتلامس بين الحبيبات التي تعد عاملاً مهماً في التفاعلات الكيميائية وعملية التليد. فوجود الحبيبات الصغيرة و الحبيبات الكبيرة التي تملأ الفراغات سيعطي جسماً مكبوساً ذا كثافة عالية ومسامية قليل .

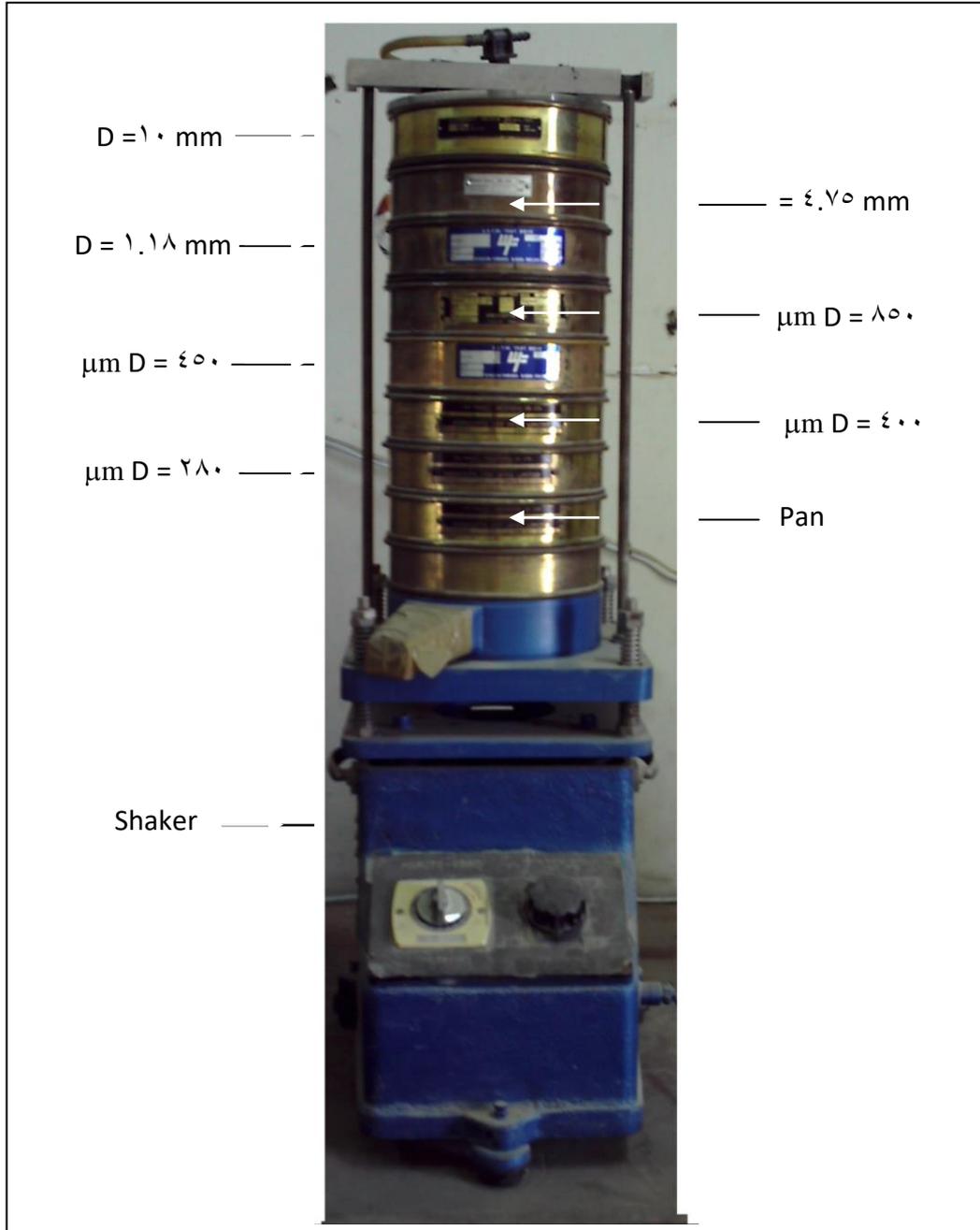
ومن التقنيات المستعملة لتحديد الحجم الحبيبي تقنية الغربلة (Sieving) وتعد هذه الطريقة هي الأكثر شيوعاً لقياس التدرج الحبيبي للحبيبات الجافة. ويعرف قياس حجم الغرابل بأنه عبارة عن فتحات مربعة دقيقة يمكن أن تمر من خلالها الحبيبات. ومن تدرج الأحجام الحبيبية للحبيبات يُعرّف حجم الحبيبية بأنه حجم الفتحة الصغيرة التي يمكن للحبيبة أن تمر من خلالها وحجم الفتحة التالية التي لا يمكن للحبيبية المرور من خلالها.

صممت الغرابيل بواسطة أعداد الميش (mesh numbers) وحجوم فتحاتها (Opening Size)، فمثلاً غربيل عدد الميش له (٢٠٠ mesh) هذا يعني أن له (٢٠٠ سلك لكل انج) ويعرف بفتحة مقداره (75µm). كذلك غربيل عدد الميش له (١٠٠ mesh) هذا يعني (١٠٠ سلك لكل انج) وفتحته مقداره (150µm). ومن الأمثلة يتضح أن عدد الميش الأصغر يقابل حجم الفتحة الأكبر، لذلك يتم تعريف الغرابيل من خلال عدد الميش وحجم فتحاتها معاً (Both mesh numbers and opening size) [٤٩، ٥٠].

تطلب إجراء عملية الغربلة في البحث استعمال عدد من الغرابيل متنوعة القياس والاستعانة بجهاز هزاز (Shaker) شكل (٣-٣)، من أجل الحصول على المقاسات الحبيبية المطلوبة لمادة الكروك التي استعملت بطيف واسع من التدرجات الحبيبية.

إن مادة الكروك استعملت بثلاث تدرجات أساسية من الحجم الحبيبي وهي [٢٤, ٢٣]

١. الكروك الخشن mesh (Coarse Grog) (٤-١٦).
٢. كروك الوسط mesh (Medium Grog) (٢٠-٣٦).
٣. كروك ناعم mesh (Fine Grog) (٤٠-٦٠).



شكل (٣-٣) جهاز الهزاز والغرابيل المستعملة في البحث

أجريت عملية الغزيلة في قسم الجيولوجي كلية العلوم جامعة بغداد للوصول إلى التدرجات الحبيبية اللازمة لأغراض البحث وتتطلب الاستعانة بعدد كبير من الغرابيل ذات القياسات المختلفة كما موضح في الجدول (٣-٣).

جدول (٣-٣) قياسات الغرابيل المستعملة في عملية الغزيلة لمادة الكروك

قياس الغرابيل		المرحلة
بدلالة وحدات mm and $\mu\text{m}$	بدلالة وحدات mesh size	
(١٠) mm	أصغر من ٤	المرحلة الأولى
(٤.٧٥ – ٥) mm	٤	
(١.١٢ – ١.١٨) mm*	١٦	
$\mu\text{m}$ (٨٥٠ – ٩٠٠)	٢٠	المرحلة الثانية
** $\mu\text{m}$ (٤٢٥ – ٤٥٠)	٣٦	
$\mu\text{m}$ (٣٥٥ – ٤٠٠)	٤٥	المرحلة الثالثة
*** $\mu\text{m}$ (٢٥٠ – ٢٨٠)	٦٠	

\* المرحلة الأولى (الكروك الخشن (C.G.) وهي الحبيبات ذات المقاس الحبيبي  $[(10)mm < D < (1.12)mm]$  ونسبتها ٥٠٪.  
 \*\* المرحلة الثانية (الكروك الوسط (M.G.) وهي الحبيبات ذات المقاس الحبيبي  $[(425)\mu\text{m} < D < (850)\mu\text{m}]$  ونسبتها ١٠٪.  
 \*\*\* المرحلة الثالثة (الكروك الناعم (F.G.) وهي الحبيبات ذات المقاس الحبيبي  $[(250)\mu\text{m} < D < (355)\mu\text{m}]$  ونسبتها ٤٠٪.

كما تم إجراء عملية الغزيلة لمادة الكاؤولين التي استعملت كمادة رابطة باستعمال غربيل حجم فتحته  $(D = 50)\mu\text{m}$

### ٣-٢-٣ عملية الخلط

### Mixing Process

عملية الخلط هي عبارة عن خلط المواد الخام المختلفة بنسب ودرجة نعومة معينة وإنتاج خليط يحتوي على نسبة من الماء أو القوام المطلوب. ويعد الخلط مرحلة مهمة من مراحل التصنيع وذلك لكي تتجانس المواد الخشنة والناعمة بشكل جيد وينسب معينة لتتحد معطيات الجسم كالخواص الفيزيائية والميكانيكية الضرورية [٥١].

هنالك العديد من طرائق الخلط ومنها الخلط الجاف (Dry Mixing) والخلط البلاستيكي (Plastic Mixing) والخلط الانزلاقي (Slip Mixing) فضلاً عن الخلط الرطب (Wet Mixing). إن ميكانيكية الخلط أو المزج تتأثر بعدة عوامل مثل شكل وعاء المزج وحجمه علاوة على الخواص الفيزيائية للجسيمات الصلبة والظروف العملية [٥٢]. تم استعمال عملية الخلط الرطب في تحضير نماذج البحث. أجريت عملية الخلط في مختبر المواد المتقدم في قسم الفيزياء في الكلية.

### ٣-٢-٤ عملية الكبس

### Compaction Process

تعد عملية الكبس من العمليات المهمة في تشكيل الأجسام السيراميكية والحرارية وتصنيعها وسبب ذلك هو الحصول على مكبوسات ذات كثافة أعلى. إذ أنه كلما زادت قيمة الضغط المسلط على النموذج ضمن حدود المرونة لذلك النموذج زادت كثافته إذا ما تمت السيطرة على الحجم الحبيبي للمسحوق المختار لتشكيل النموذج ويعود ذلك إلى رص الحبيبات المكونة للنموذج [١٤].

توجد عدة طرائق لكبس النماذج أهمها:

١. الطريقة اللدنة (Plastic Method).
٢. طريقة شبه الجافة (Semidry Method).
٣. طريقة الكبس الجاف (Dry Method).
٤. طريقة الصب الانزلاقي (Slip Cast Method).

وتختلف هذه الطرائق عن بعضها بمقدار نسب المادة الرابطة ومقدار الماء المضاف [٥٣]. أُسْتُعْمِلَتِ الطريقة شبه الجافة في تحضير النماذج للعينات المحضرة في البحث، أُجريت عملية كبس النماذج في المنطقة الصناعية في محافظة بابل باستعمال مكبس هيدروليكي.

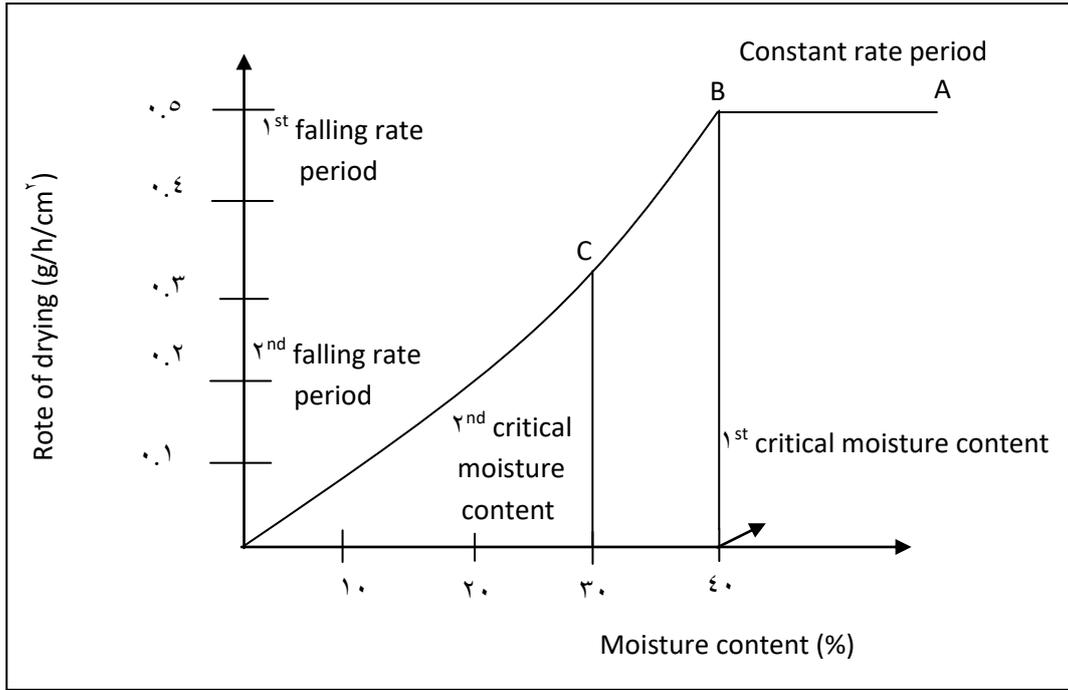
### ٣-٢-٥ عملية التجفيف

### Drying Process

تعرف عملية التجفيف بأنها عملية إزالة الماء من المواد الحبيبية بالتبخير، وتحدث عملية التجفيف ضمن مرحلتين، المرحلة الأولى يتم فيها فقدان الماء الموجود في المسامات المسمى بماء المسامات (Pores Water) فينتقل الماء من خلال المسامات إلى سطح الحبيبات ليحل محل الماء الذي يتبخر من السطح وتتسم هذه المرحلة بعدم حدوث تشوهات الانكماش فيها ويحل الهواء في النهاية محل الماء الموجود في المسامات الشعرية. أما في الثانية ففيها يفقد الماء المشكل للطبقة العازلة بين دقائق الطين المسمى بماء التقلص إذ تنتهي عملية التقلص في النماذج بانتهاء هذا الماء [٤٩]. والشكل (٣-٤) يوضح تصرف التجفيف الذي يمثل معدل التجفيف بالنسبة إلى المحتوى الرطبي [٥٤].

في هذا الشكل ثلاث فترات يمكن تمييزها: **المرحلة الأولى:** وهي فترة المعدل الثابت (Constant-rate Period) الذي يكون معدل التبخر فيه غير معتمد على المحتوى الرطوبي وهي الفترة التي عمل بها في تجفيف النماذج المحضرة الخاصة بالبحث، **والمرحلة الثانية:** هي فترة المعدل - المنخفض الأولى (First Falling-rate Period) الذي يكون معدل التجفيف فيه دالة خطية بالنسبة للمحتوى الرطوبي في هذا البحث لم يتم الحصول على هذه المنطقة لأنها خارج نطاق العمل في البحث، أما **المرحلة الثالثة:** فهي فترة

المعدل - المنخفض الثانية (Second Falling-rate Period) الذي يمثل خطأً بيانياً بين معدل التجفيف والمحتوى الرطوبي وهي أيضاً خارج نطاق العمل في البحث. إن بدايات فترة المعدل الثابت وفترة المعدل - المنخفض الأولى يعبر عنها بالمحتوى الرطوبي الحرج الأول والثاني على الترتيب [٥٤]، أُجريت عملية التجفيف للنماذج المحضرة في قسم علوم الحياة كلية العلوم جامعة بابل.



شكل (٤-٣) يوضح مراحل التجفيف [٥٤]

### Firing - Sintering Process

### ٦-٢-٣ عملية الحرق - التلبيد

وهي تعريض الأجسام السيراميكية إلى درجات حرارة عالية لمدة معينة إذ تعمل على تغيير النموذج الهش القوام والمشكل من خليط من [الكروك + الكروك + سيليكات الصوديوم] بنسب خلط متنوعة إلى نموذج قوي وثابت. إذ أن لعملية الحرق تأثيراً كبيراً على خواص الجسم السيراميكي المنتج [٥٥]. لقد تم اختبار درجتي الحرارة (١٤٠٠ °C, ١٣٥٠) على التوالي لغرض حرق النماذج السيراميكية [٥١]. وتمت عملية الحرق في مختبر المواد والزجاج في كلية العلوم للبنات جامعة بغداد باستعمال فرن كهربائي مبرمج وبمدة حرق مقدارها [٢hr] عند الدرجة الحرارية (المختارة).

## Sample Preparation

## ٣-٣ تحضير النماذج

### ٣-٣-١ تحضير الخلطة (m) (الكروك + الكاؤولين المعالج)

#### Preparation Group(m) [Grog +Modified Kaoline]

##### ٣-٣-١-١ تحضير المادة الرابطة (الكاؤولين المعالج)

##### Preparation of Binding Material(Modified Kaoline)

##### Preparation of Calcined Kaoline

##### أولاً: تحضير الكاؤولين المحمص

استعمل كاؤولين دويخلة مطحون وبحجم حبيبي  $(D < 50)\mu\text{m}$  حيث تم غسله ومزجه بالماء المقطر بمقدار أربعة أضعاف حجم الكاؤولين المستعمل (٢٤hr) في حوض وزنه (١kg) ثم يختزل الطافي ويضاف ماء بنفس الكمية من جديد ويمزج ويترك لمدة (٢٤hr) أخرى وتعاد العملية سبع مرات تسمى هذه عملية التخمير وبعد العملية السابعة يترك.

نحصل على كاؤولين صلب إذ يتم تقسيمه إلى أجزاء صغيرة وتوضع في المجفف (Drier) نوع (F.G. BOE & CO- ٩٠ Laboratory-Equipment- Hamburg) الموضح في الشكل (٥-٣) بدرجة (٥٠°C) لمدة (٢٤hr) ثم ترفع بدرجة حرارة المجفف (Drier) إلى (١٠٠°C) لمدة (٢٤hr) ثانية إلى أن يصبح جافاً (تسمى هذه عملية التجفيف) ثم يطحن باستعمال تقنية الطحن بالكرات لمدة (٧hr) ثم يرسل إلى المجفف بدرجة (١٠٠°C) لمدة (٢hr). بعدها تجرى عملية النخل للكاؤولين بحجم حبيبي  $(D < 50)\mu\text{m}$  تم تحضير مجموعتان منه تميمصها إلى درجتين حراريتين مختلفتين (٤٠٠, ٣٠٠°C) في الفرن الكهربائي نوع (Namber Therm) مصنوع في ألمانيا الغربية ويزمن (٢hr) [٥٦].

##### Solution Preparation P.V.A.

##### ثانياً- تحضير محلول بولي فاينيل الكحول

يحضر محلول بولي فاينيل الكحول المائي بإضافة ٠.٥gm منه إلى الماء المقطر (١٠٠ ml) ويمزج جيداً باستعمال خلاط مغناطيسي وبدرجة حرارة (٨٠°C) وبعد المزج لمدة (٣٠ min) تضاف قطرات من HCl للحصول على دالة الأس الهيدروجيني بمقدار  $\text{PH} = ٤ - ٥$  [٥٧, ٥٦].

##### Preparation of Modified Kaoline

##### ثالثاً- تحضير الكاؤولين المعالج

لتحضير الكاؤولين المعالج نضيف الكاؤولين المحمص سابقاً بشكل تدريجي إلى محلول بولي فاينيل الكحول ويمزجان بوساطة الخلاط المغناطيسي (Magnetic Stirrer) ويستمر المزج إلى أن يبدو الخليط رانقاً وذا لزوجة عالية (High Viscosity Slurry) ثم يجفف ويطحن ويمرر عبر منخل ذي مقاس حبيبي  $(D < 50)\mu\text{m}$ . وتعاد الطريقة لكافة المجاميع الأخرى. إن هذه المادة تسمى بالكاؤولين المعالج (Kaoline Modified) [٥٧]. أما نسبة الخلط للكاؤولين المعالج فقد اعتمدت على معيارية براءة الاختراع الأمريكية [٥٨].

##### رابعاً- تحضير نماذج الخلطة (m)

تم تحضير الخلطة (m) في مختبر المواد المتقدم في قسم الفيزياء كلية العلوم جامعة بابل، إذ تم وضع مادتي الكروك والكاؤولين كلاً على حدة لتحديد المقاس الحبيبي (Grain Size) وتم استعمال طريقة الغربلة (Sieving)، إذ تم اختبار الغرابيل القياسية المناسبة لإجراء عملية الغربلة للكروك التي تتنوع قياسها إذ تبدأ من [١٠)mm) وصولاً إلى  $(280)\mu\text{m}$ ] الموضحة في الجدول (٣-٣)، أما بالنسبة للكاؤولين فقد تم استعمال غربيل ذي حجم فتحة  $(D = 50)\mu\text{m}$  من أجل الحصول على المقاس

الحبيبي المناسب. لقد تم وضع الغرابيل في جهاز هزاز من نوع (Shaker)، شكل (٣-٣)، تم إعادة عملية الغزيلة لعدة مرات من أجل الحصول على الكمية المطلوبة من مادتي الكروك والكاؤولين .

تم وزن مكونات الخلطة المبينة مقاديرها في الجدول (٤-٣) بميزان نوع (Mettler) ذي قدرة تحسس عالية، بعد عملية الوزن توضع الخلطة في وعاء زجاجي مقاوم للحرارة. حيث يوضع الوعاء الزجاجي على جهاز الخلاط المغناطيسي (Magnetic Stirrer) نوع (Gallenkamp Magnetic Stirrer Hot Plate ٤٠٠)، ثم يضاف الماء المقطر إلى الخلطة تدريجياً إذ يتم تثبيت درجة حرارة الجهاز على (٤٠°C) وأوطأ مستوى دوران (خلط) (Speed)، تستمر عملية الخلط حتى يتم الحصول على قوام متجانس مع أقل كمية من الماء في الخلط ثم يرفع الوعاء الزجاجي لتفريغ الخلطة في القالب المعدني، المخصص لكبس العينات ويوضع القالب في المكبس الهيدروليكي من أجل كبس العينات ويضغط مقداره (٩٤٣MPa) ويزمن مقداره (٥ min)، وبعد الكبس تترك العينات لمدة (١ h) في الهواء لتجف بشكل طبيعي وبعدها يتم قياس [الوزن والقطر ومعدل السمك] للعينات ويتم ذلك بواسطة الميزان الحساس المذكور و القدمة الرقمية (Digital Caliper) ذات دقة مقدارها ( $\pm 0.02$ ) والموضحة بالشكل (٣-٦)، وبالتالي توضع العينات في المجفف الكهربائي (Drier) من نوع (Gallenkamp) لمدة (٤٨hr) إذ يتم تثبيت درجة حرارة المجفف عند درجة حرارة (٥٠°C) لمدة (٢٤hr) وبعدها ترفع درجة حرارة المجفف إلى درجة (١٠٠°C) لمدة (٢٤hr) الثانية، وبعد إنهاء عملية التجفيف يتم قياس (الوزن والقطر ومعدل السمك) للعينات للمرة الثانية ومن ثم تحرق العينات في فرن كهربائي مبرمج من نوع (Naberthem) بمعدل ارتفاع درجة الحرارة مقداره (٣°C/min) من درجة حرارة الغرفة إلى درجة (٤٠٠°C) وبعدها يتم زيادة معدل ارتفاع درجة الحرارة إلى (١٠°C/min) من درجة حرارة (٤٠٠°C) إلى (١٣٥٠°C)، وعند وصول العينات إلى درجة الحرارة المطلوبة تترك في الفرن لمدة (٢hr) وبعدها ينطفئ الفرن وتترك العينات فيه لمدة (٢٤hr) ثم يتم إخراجها وقياس (الوزن والقطر ومعدل السمك) للمرة الأخيرة، والشكل (٣-٧) يوضح النماذج المحضرة من الخلطة m.



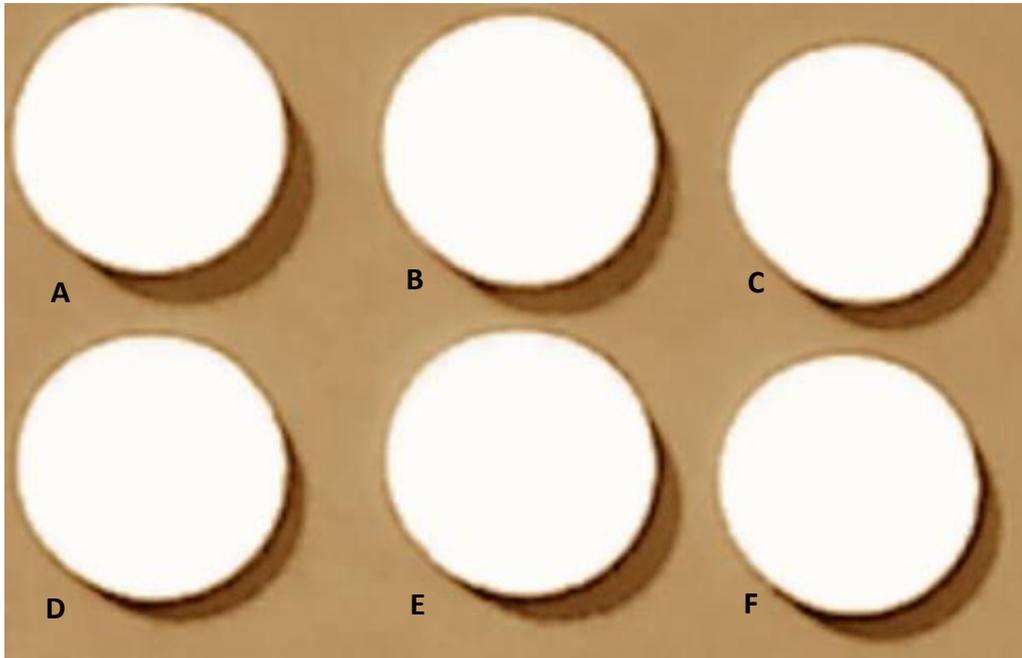
شكل (٣-٥) المجفف الكهربائي المستعمل في البحث



المقياس الرقمي في القدمة



شكل (٦-٣) القدمة الرقمية (ذات دقة  $(\pm 0.02)$ ) المستعملة في البحث

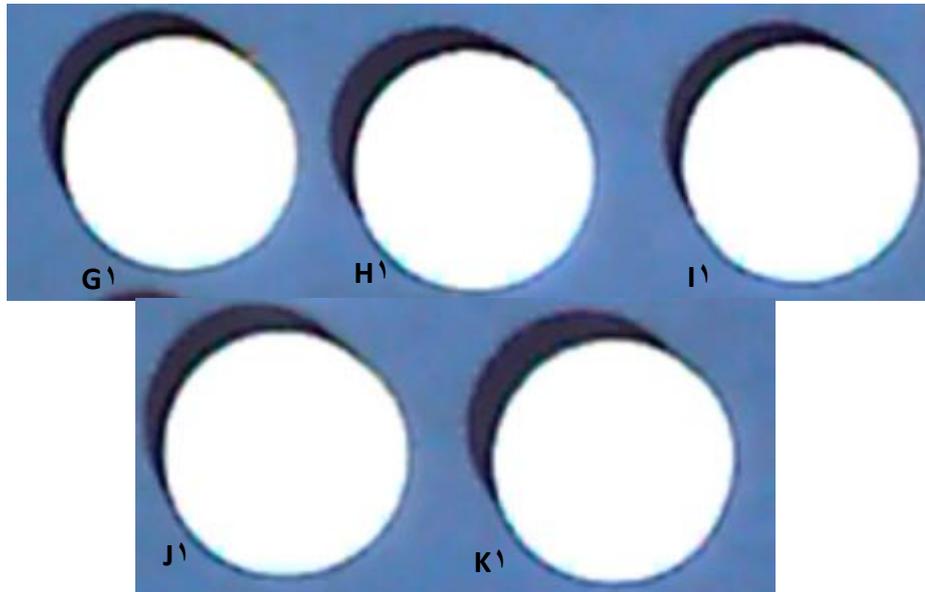


شكل (٧-٣) نماذج الخلطة m

٢-٣-٣ تحضير الخلطة (n) (كروك+سيليكات الصوديوم)

Preparation Matrix(n) (Grog +Sodium silicate)

بعد خلط المقاسات الحبيبية المختلفة للكروك كما وصف في الخلطة (m) يوضع الخليط في وعاء زجاجي. وتم إضافة سيليكات الصوديوم بحسب النسب الموضحة في الجدول (٥-٣) إلى خليط الكروك وتحريك الخليط يدوياً بواسطة القضيب الزجاجي ولمدة (٢ min) وبعدها وضع الخليط في الخلاط المغناطيسي (Magnetic Stirrer) عند درجة حرارة (٤٠°C) وأوطأ مستوى دوران إلى أن يتم الحصول على قوام متجانس ومن ثم يوضع الخليط في قالب المعدني الذي يوضع في المكبس الهيدروليكي من أجل إجراء عملية كبس العينات وبعد الانتهاء من الكبس تترك العينات لمدة (٣hr) في الهواء لتجف بشكل طبيعي وبالتالي يتم قياس (الوزن والقطر ومعدل السمك) بالأجهزة المستعملة للخلطة (m) نفسها وبعدها يتم وضع العينات في مجفف كهربائي ولمدة (٤٨hr) إذ يتم تثبيت درجة حرارة المجفف عند درجة حرارة (٥٠°C) لمدة (٢٤hr) وبعدها ترفع درجة الحرارة إلى (١٠٠°C) لمدة (٢٤hr) الثانية، بعد إتمام عملية التجفيف يتم قياس (الوزن والقطر ومعدل السمك) للعينات وبعدها تحرق العينات في الفرن الكهربائي ذاته المستعمل في حرق عينات الخلطة (m) إذ تحرق العينات من درجة حرارة الغرفة إلى درجة حرارة (٤٠٠°C) بمعدل ارتفاع (٣°C/min) وبعدها أي من (٤٠٠°C) إلى (١٤٠٠°C) بمعدل ارتفاع (١٠°C/min) وزمن بقاء قدره (٢hr) وبعدها ينطفئ الفرن وتترك العينات لمدة (٢٤hr) في الفرن وبعدها تُخرَج. ويتم قياس (الوزن والقطر ومعدل السمك) للمرة الأخيرة، والشكل (٨-٣) يوضح بعض النماذج المحضرة من الخلطة n.



شكل (٨-٣) نماذج الخلطة n

جدول رقم (٤-٣) النسبة المئوية لخلطات المجموعة m

المادة الرابطة (الكاولين المعالج)				نسبة الكروك %	اسم النموذج
نسبة المضاف من % [P.V.A.]	درجة حرارة التخميص للكاولين °C	نسبة الكاولين %	نسبة المادة الرابطة % (الكاولين الخام)		
٠.٥٢	٤٠٠	٩٩.٤٨	١٣	٨٧	A
٠.٥٢	٤٠٠	٩٩.٤٨	٢٣	٧٧	B
٠.٥٢	٣٠٠	٩٩.٤٨	١٣	٨٧	C
٠.٥٢	٣٠٠	٩٩.٤٨	٢٣	٧٧	D
١.٩٦	٣٠٠	٩٨.٠٤	١٣	٨٧	E
١.٩٦	٣٠٠	٩٨.٠٤	٢٣	٧٧	F

جدول رقم (٥-٣) النسبة المئوية لخلطات المجموعة n

نسبة المادة الرابطة % "سيليكات الصوديوم"	نسبة الكروك %	اسم النموذج
١٢.٥	٨٧.٥	G
١٧.٦	٨٢.٤	H
٢٢.٢	٧٧.٨	I
٢٦.٣	٧٣.٧	J
٣٠	٧٠	K

### ٤-٣ قياسات التقلص

تم إجراء عمليات القياس للنماذج المحضرة لكل من الخلطة  $m$  و  $n$  على التوالي، إذ تم قياس القطر والسمك باستعمال القدمة الرقمية ذات الدقة ( $\pm 0.02$ ) كما تم قياس الوزن باستعمال ميزان حساس أن عمليات القياس التي أجريت هي بعد عملية الكبس (بعد ترك العينات في الجو الاعتيادي) وبعد التجفيف وبعد الحرق كما أن النتائج المتحققة سيتم عرضها بالجدول التالية:

## الفصل الرابع

### المناقشة والاستنتاجات والتوصيات

### *Discussion, Conclusions & Recommendations*

#### ٤-١ تأثير الكروك في التقلص Effect of Grog on Shrinkage

تم استعمال مادة الكروك في البحث ولمقاسات حبيبية متنوعة لما لمادة الكروك من خصائص يمكن عرضها في المناقشة وكما يلي، إن مادة الكروك تتمتع بحالة الاستقرار الحراري الذي يؤدي إلى التقليل من تقلص الحرق الناتج من المعاملة الحرارية، كما أن الأطوار المسؤولة عن الثبات الحراري للكروك هي تحقق طور المولايت والكرستوبلايت (شكل ٤-١) التي تعد أطواراً مستقرة حرارياً تصل درجة انصهار المولايت حوالي ( $1850^{\circ}\text{C}$ ) [٥٩].

أما طور الكرسوبلايت فهو تحول من الكوارتز خلال طور التريديمايت وصولاً إليه، ومن مقارنة كثافة الطور (جدول ٤-١).

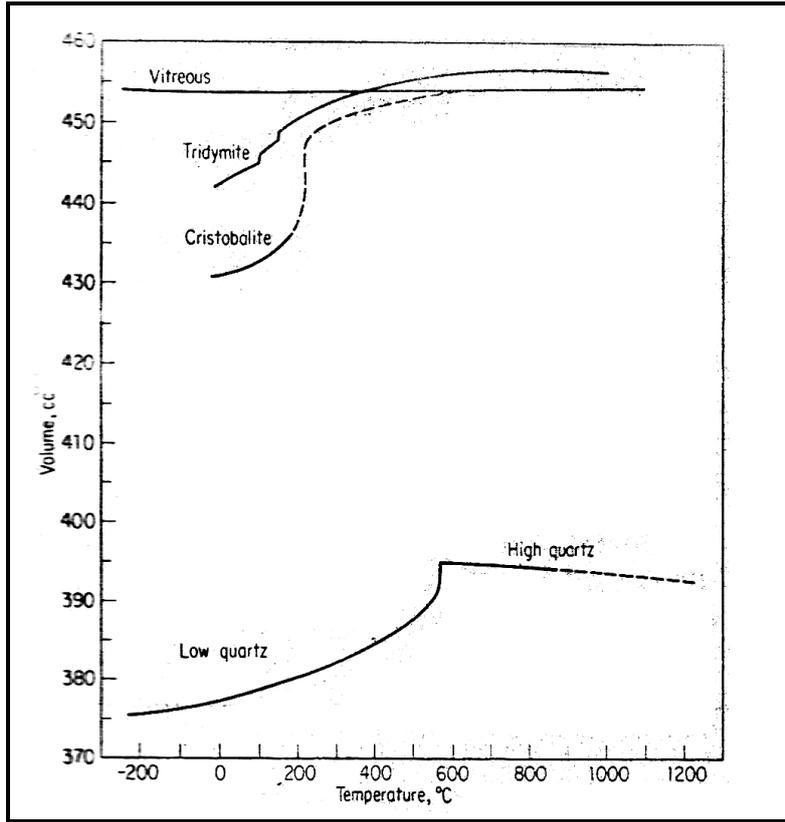
(٤).

جدول (٤-١) يوضح كثافة أطوار السليكا عند درجة حرارة الغرفة [١٨]

Form	Density (gm/cm <sup>3</sup> )
Quartz	٢.٦٥-٢.٦٦
Tridymite	٢.٢٦-٢.٣٢
Cristobalite	٢.٢٧-٢.٣٢

يمكن الاستنتاج أن كثافة الكرسوبلايت تنخفض لوحدة الكتلة نفسها وهذا يعني تمدد المكون الذي يساعد في تقليل

التقلص.



الشكل (٤-١) يوضح تمدد في الكريستوباليت عند المعاملة الحرارية [١٨]

## ٢-٤ تأثير المواد الرابطة Effect of Banding Materials

**Kaoline + (P.V.A)**

١-٢-٤ الكاؤولين + بولي فاينيل الكحول

تم تحضير الكاؤولين المعالجن كاؤولين دويخلة (مقاس حبيبي  $D <$ ) وخلق مع محلول بولي فاينيل الكحول (جدول -٤) كمادة رابطة بين حبيبات الكروك المشكل منها النموذج وذلك بهدف دراسة تأثير مضاف المادة البوليمرية على كفاءة ترابط حبيبات الكاؤولين مع بعضها (خلال عملية التشكيل) التي تساعد على تماسك حبيبات الكروك خلال عملية الحرق).

للحد من النقل الحاصل في الكاؤولين نتيجة المعاملة الحرارية تم إجراء عمليات التحميص للتخلص من المواد العضوية والمواد المتبخرة للتخلص من تأثيرها في النقل ودرجات حرارية أقل من درجة حرارة التحول إلى طور ميتا كاؤولين (Meta-Kaoline) ثم تمت معالجة الكاؤولين المستعمل كمادة رابطة في تحضير النماذج بإضافة مادة بولي فاينيل الكحول (P.V.A) كمادة معالجة للكاؤولين المستعمل.

## ٣-٤ تأثير سيليكات الصوديوم كمادة رابطة

### Effect of Sodium Silicate

تستعمل سيليكات الصوديوم كمادة رابطة في المنتجات السيراميكية والحرارية بسبب لزوجتها العالية كما أنها تعمل كعامل مشنت في الأنظمة السيراميكية. إن لسيليكات الصوديوم تأثيرات أخرى في المنتجات السيراميكية إذ تعمل على زيادة متانة الجفاف وزيادة كثافة رص الدقائق بشكل كبير وإعطاء سطح المنتج نعومة عالية.

إن وجود سيليكات الصوديوم أثناء المعاملة الحرارية سيؤدي إلى ملئ الفجوات المتكونة في الجسم السيراميكي خلال عملية الحرق وإعاقة حركتها وبالتالي تعيق تكوّن الفجوات الكبيرة في الجسم السيراميكي أي إنها تعيق عملية التقلص الحاصلة لأن أحد مصادر التقلص في الجسم السيراميكي هو حركة الفجوات وتكوين الفجوات الكبيرة وهذا يتفق مع ما توصل إليه في تحضير سيليكات الصوديوم وتأثيره عليها [٦١].

## ٤-٤ تأثير عمليات التشكيل Effect of Formation Process

لعمليات التشكيل دور أساسي في السيطرة على التقلص والحصول على جسم سيراميكي متجانس وذو رص كبير وقيمة واطنة للمسامية بالنتيجة ذي تقلص واطئ. يتم تحقيق تلك الخصائص من خلال التحكم بالمقاس الحبيبي (الحجم الحبيبي) وبالتالي توزيع الحجم الحبيبي بشكل يضمن الحصول على تجانس كبير وقيمة واطنة للمسامية. ولتحسين عامل الرص ولتقليل المسامية يتطلب أن يكون توزيع الحجم الحبيبي يغطي أوسع مدى ممكن من الأحجام الحبيبية. عند استعمال حبيبات خشنة (Coarse) أحادية التشيت (Monodisper) نحصل على جسم سيراميكي ذو مسامية عالية حوالي (٤٠٪) لذلك نحتاج إلى حبيبات متوسطة (Medium) لملا المسامات بين الحبيبات الخشنة وكذلك سنحتاج إلى حبيبات ناعمة (Fine) لملا المسامات الناتجة عن رص الحبيبات المتوسطة. سنحصل بالنتيجة على جسم سيراميكي كثيف الرص ويمدى واسع من توزيع الحجم الحبيبي ومسامية واطنة. كما إن للحجم الحبيبي دور كبير في عملية التكتيف والتلبيد يتناسب معها تناسباً عكسياً، كما انه يتحكم بعملية التحول إلى المولات أثناء عملية التلبيد.

إن الطيف الواسع من توزيع الحجم الحبيبي لا يعطي بالضرورة جسماً سيراميكياً ذا رص كثيف مالم يكن هنالك عملية خلط جيدة، إذ عند وضع الحبيبات الخشنة في اسطوانة زجاجية ومن ثم وضع الحبيبات المتوسطة والناعمة لا يعطي جسم ذو رص جيد وقيمة واطنة للمسامية بشكل مباشر ومن أجل تحقيق خاصية المسامية الواطنة يجب القيام بعملية الخلط ولمدة كافية وبشكل يضمن الحصول على جسم سيراميكي ذي قوام متجانس حيث اعتمدت المفاهيم التي تسهل الحصول على القوام المتجانس [٦٤].

## ٥-٤ قيم التقلص المقاسة Measurement Shrinkage Values

إن تأثير استخدام الكروك كما تم عرضه في الفقرة (٤-١) والمادة الرابطة وعمليات التشكيل بموجب طريقة العمل التي استخدمت في البحث، تم الحصول على نتائج التقلص التي تم عرضها في الفصل الثالث، من خلال النتائج المتحققة في البحث وجدنا أن أفضل قيمة للتقلص (الخطي والحجمي) لنماذج الخلطة (M) كانت للنموذج (E)، أما بالنسبة لنماذج الخلطة (N) فإن أفضل قيم تقلص متحققة هي للنموذج (I). كما هو موضح للنموذجين في الجدول (٤-٢).

جدول (٢-٤) يوضح قيم التقلص للنموذجين (E) و (I)

اسم النموذج	نسبة الكروك %	نسبة المادة الرابطة %	تقلص الجفاف الخطي %	تقلص الجفاف الحجمي %	تقلص الحرق الخطي %	تقلص الحرق الحجمي %
E	٨٧	١٣	٠.٠٧	٠.٢١	٠.٢١	٠.٦
I	٧٧.٨	٢٢.٢	٠.٣	٠.٩	٠.٦	١.٧

من الجدول (٢-٤) نلاحظ إن قيم تقلص الجفاف (الخطي والحجمي) هي أوطأ من قيم تقلص الحرق (الخطي والحجمي) ويمكن تفسير ذلك. إن تقلص الجفاف يرتبط بشكل رئيس بمفاهيم التشكيل إذ يتضح فيه تأثير المقاس الحبيبي وتوزيع المقاس الحبيبي كذلك تأثير ضغط التشكيل على قيمة تقلص الجفاف المستحصلة، ومن خلال الاختيار الدقيق لهذه القيم يمكن الحصول على أوطأ قيمة للمسامية وبالتالي على أوطأ قيمة لتقلص الجفاف. إن المعاملة الحرارية التي تجري للنماذج (عملية التجفيف) لا تتضمن ارتفاع درجات الحرارة إلى درجات عالية مما يؤدي إلى حدوث تحولات طورية في النماذج (كما يحدث في عملية الحرق)، لذلك تكون العوامل الأكثر تأثيراً على قيم تقلص الجفاف هي عوامل التشكيل.

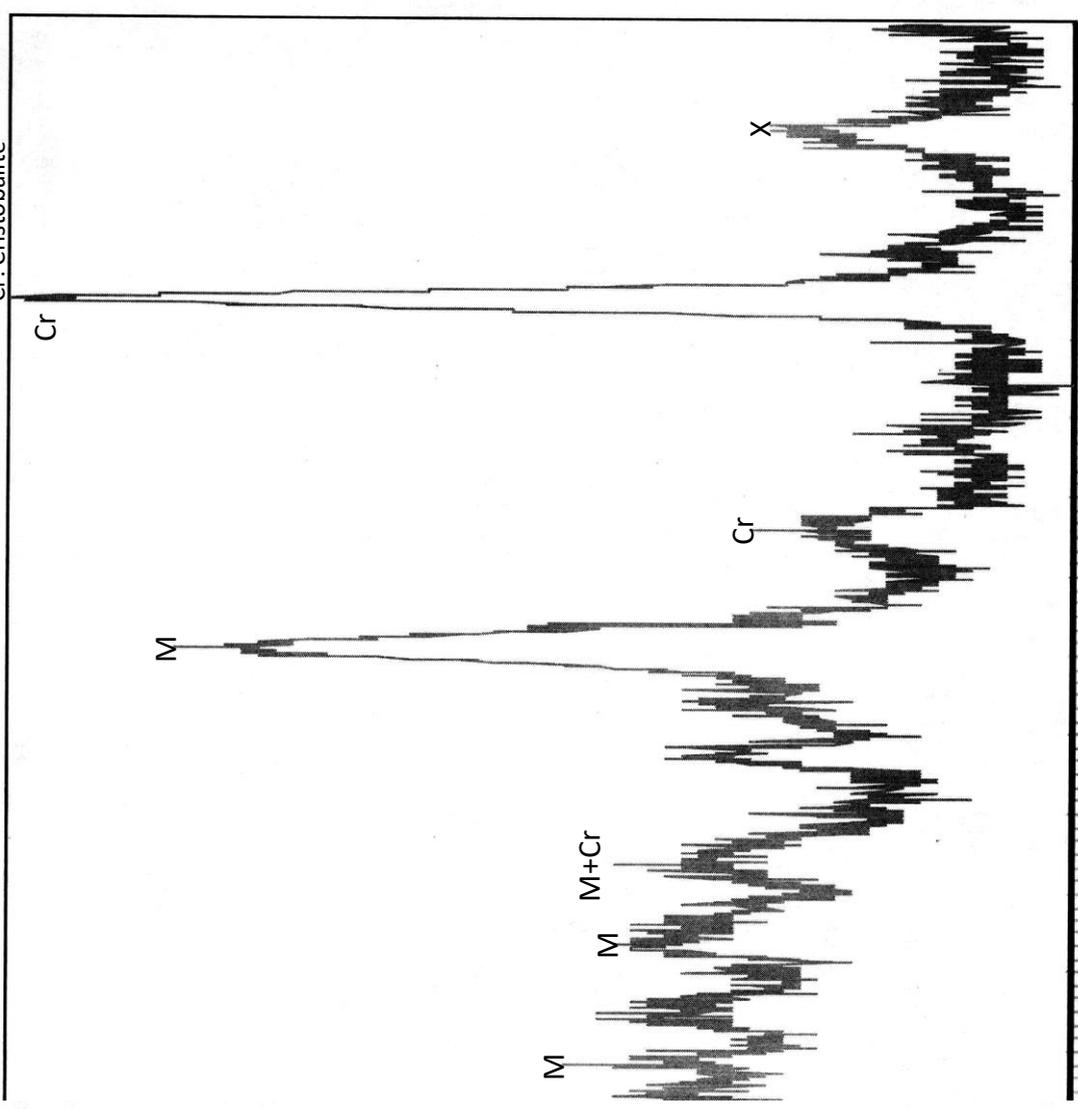
أما في حالة تقلص الحرق فإن العوامل الأكثر تأثيراً في قيم التقلص المستحصلة هي اختيار المادة الأساس والمادة الرابطة وسلوك كل منهما عند إجراء المعاملة الحرارية و مع ارتفاع درجات الحرارة. كذلك تأثير المعاملة الحرارية ذاتها من خلال اختيار زمن الإنضاج (زمن بقاء النموذج عند درجة الحرارة المطلوبة) بشكل دقيق يكون لها التأثير الأكبر في مقدار تقلص الحرق الحاصل للنماذج المحضرة وتأتي عوامل التشكيل كعامل مساعد في الوصول إلى قيم التقلص الواطنة المطلوبة للجسم السيراميكي المحضر.

## ٤-٦ تأثير الأطوار المتحولة

لتفسير الحصول على أفضل قيم لأدنى تقلص للنماذج وبموجب ظروف الخلط والتشكيل والحرق من خلال تفسير أو تحليل الأطوار المتحقة نتيجة المعاملة الحرارية. فقد تم إجراء التحليل المعدني للنماذج المشكلة والمعاملة حرارياً للخلطات المعرفة في الجدول (٤-٣) المجموعة **m** وكما موضحة في الأشكال (٤-٣) إلى (٤-٩). فتبين وجود الكروك والمادة الرابطة الكاؤولين المعالج لـ (خلطة **m**) قد أعطت تكون طوري المولايت والكرستوبلايت الذي انعكس على تحقق أدنى قيم للتقلص حسب كثافة الأطوار المتحقة (نموذج E و I).

M: Mullite

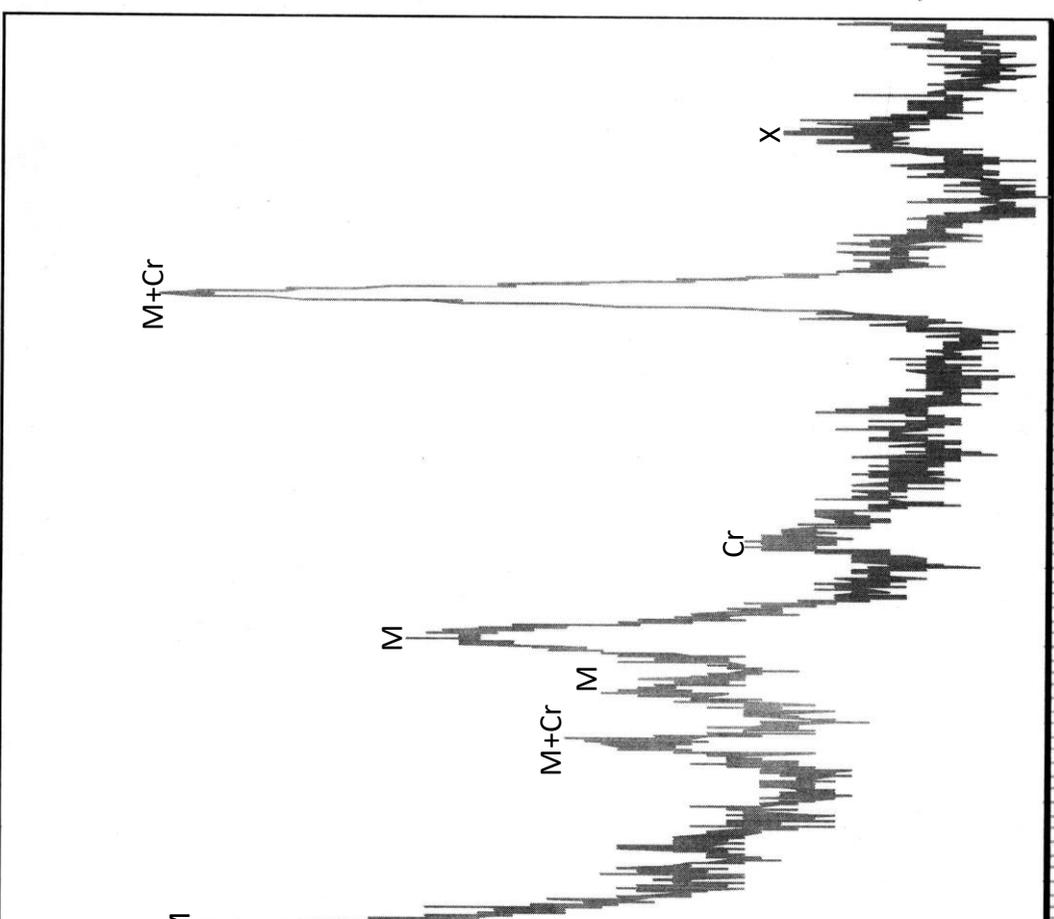
Cr: Cristobalite



شكل (٢-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج A من نماذج الخلطة **m** والمتكون من  
 (Grnp ٨٧% + K.M ١٣%)

M: Mullite

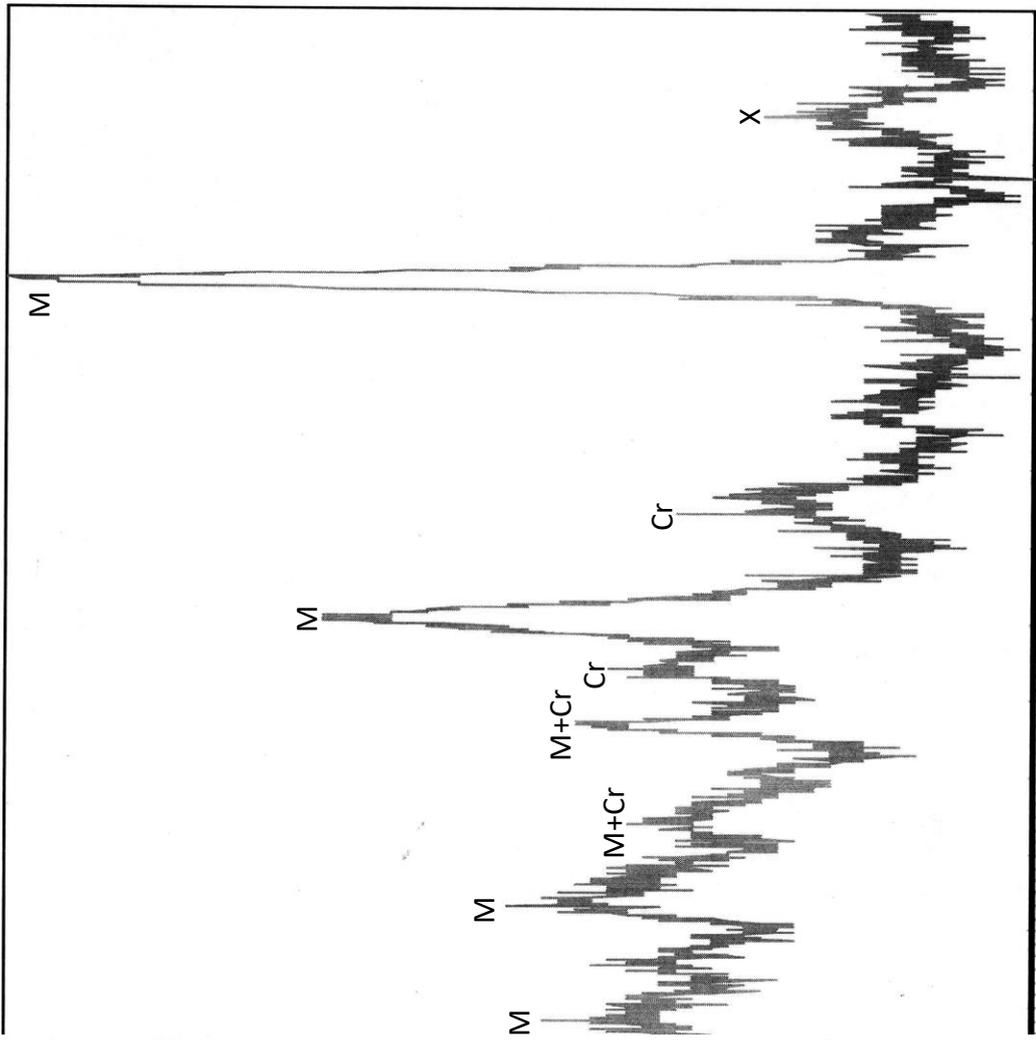
Cr: Cristobalite



شكل (٣-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج  
 (Grnp ٧٧% + K.M ٢٣%)

M: Mullite

Cr: Cristobalite



24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50

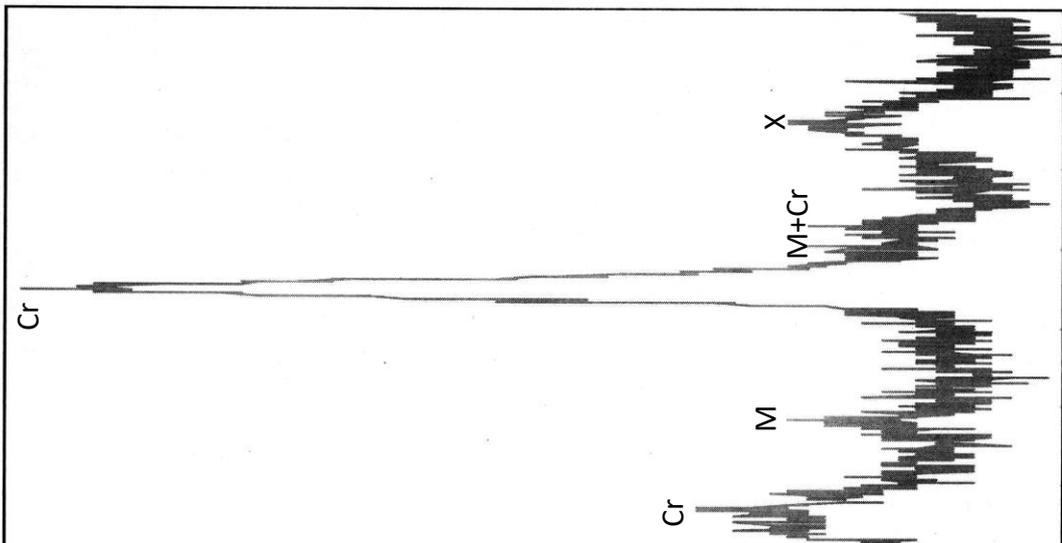
شكل (٤-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج C من نماد الخايطة M والمتكون من

$2\theta$  →

(Grp ٨٧% + K.M ١٣%)

M: Mullite

Cr: Cristobalite



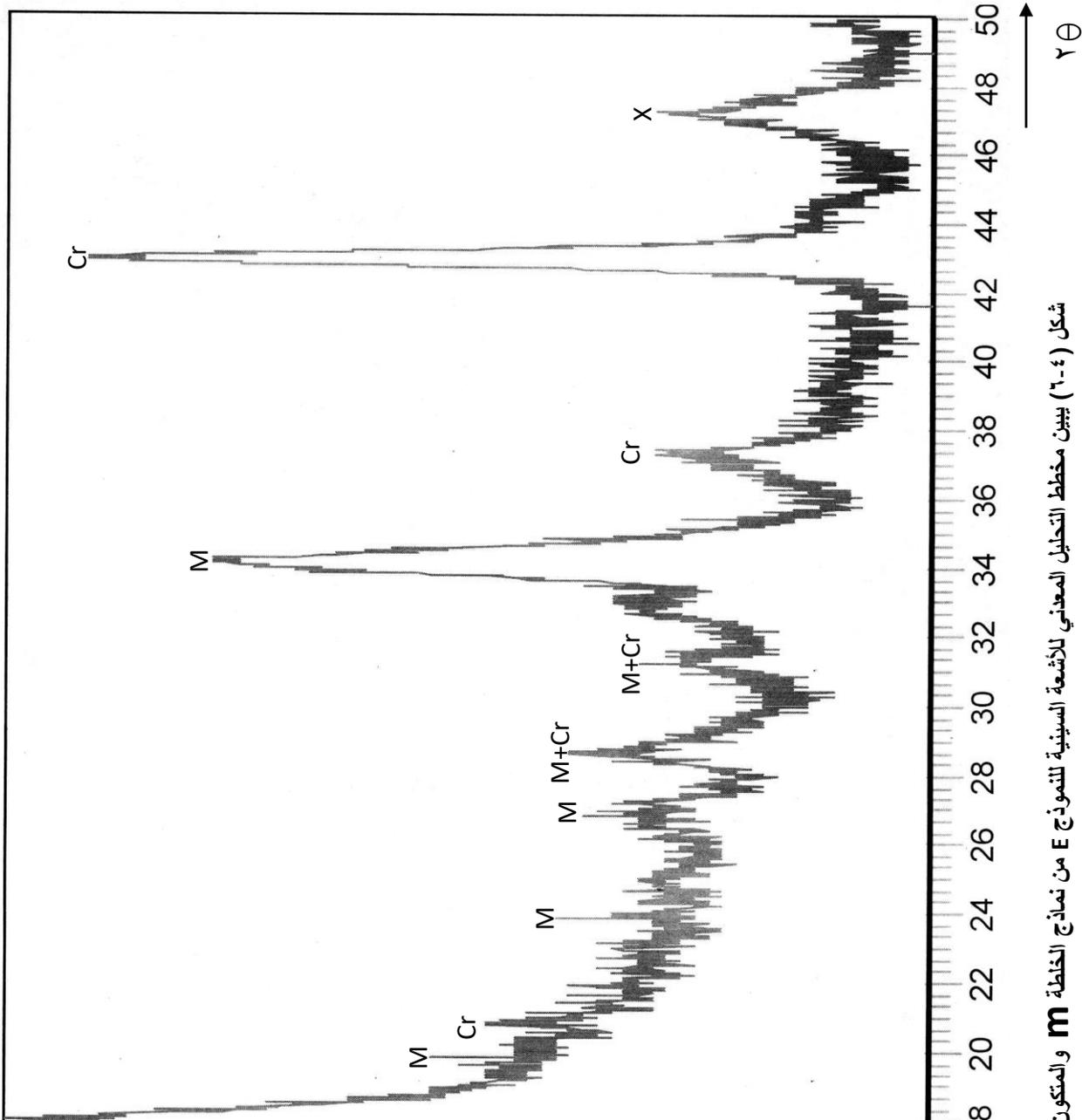
38 40 42 44 46 48 50

شكل (٥-٤) يبين مخ

$2\theta$  →

M: Mullite

Cr: Cristobalite

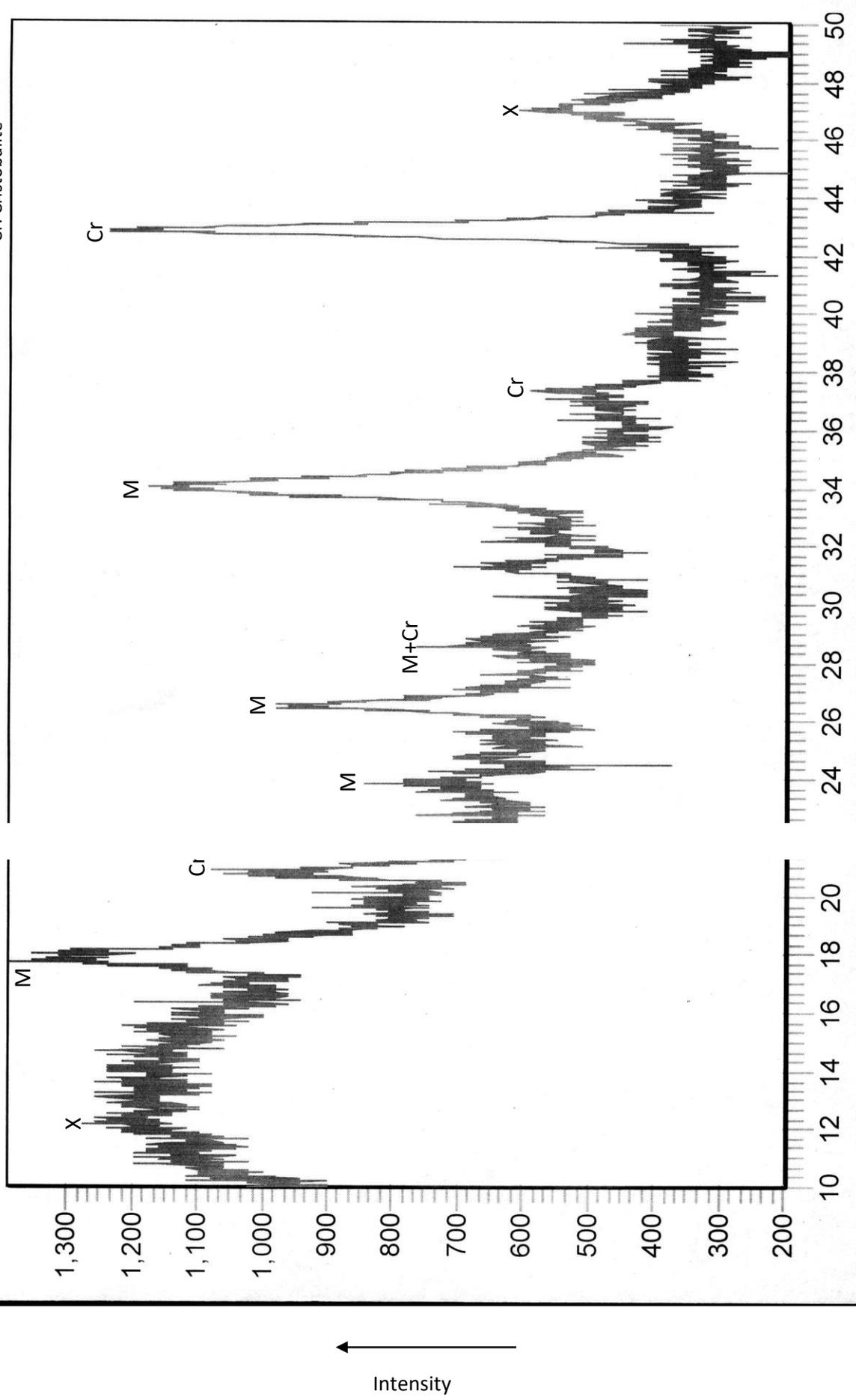


شكل (٦-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج E من نماذج الخططة **m** والمكون

(Gr 87% + K.M 13%)

M: Mullite

Cr: Cristobalite

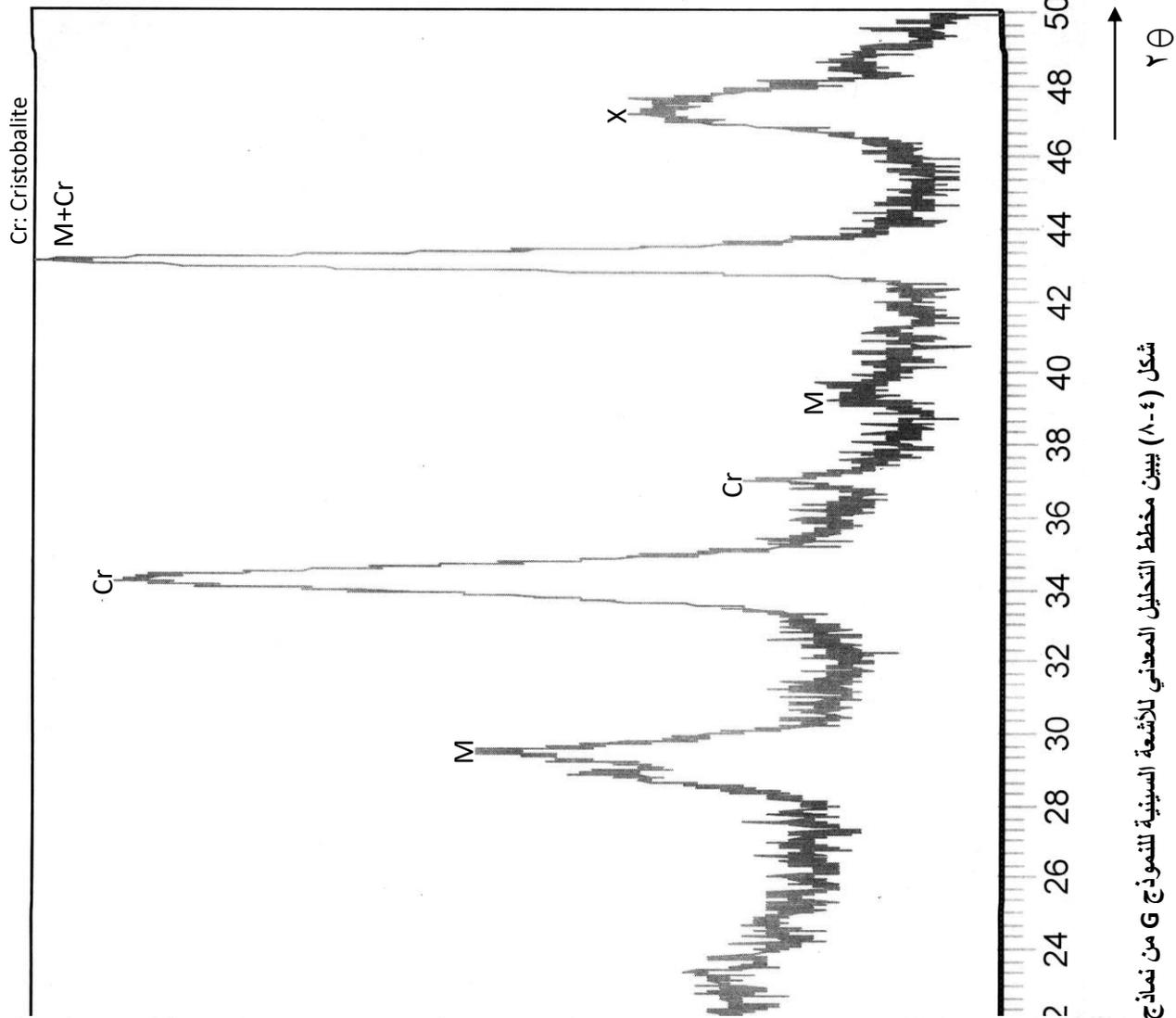


شكل (٧-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج F من نماذج

(Grp ٧٧% + K.M ٢٣%)

ونتيجة المعامله ا  
 التحليل المعدني تا  
 نواجد المكون الطور  
 من اما بالنذا  
 نماذج هذه الخط  
 وجودها في الماده  
 جزء من سيليكات  
 لاوكسيد الصوديوم  
 إن المكونات الاسد

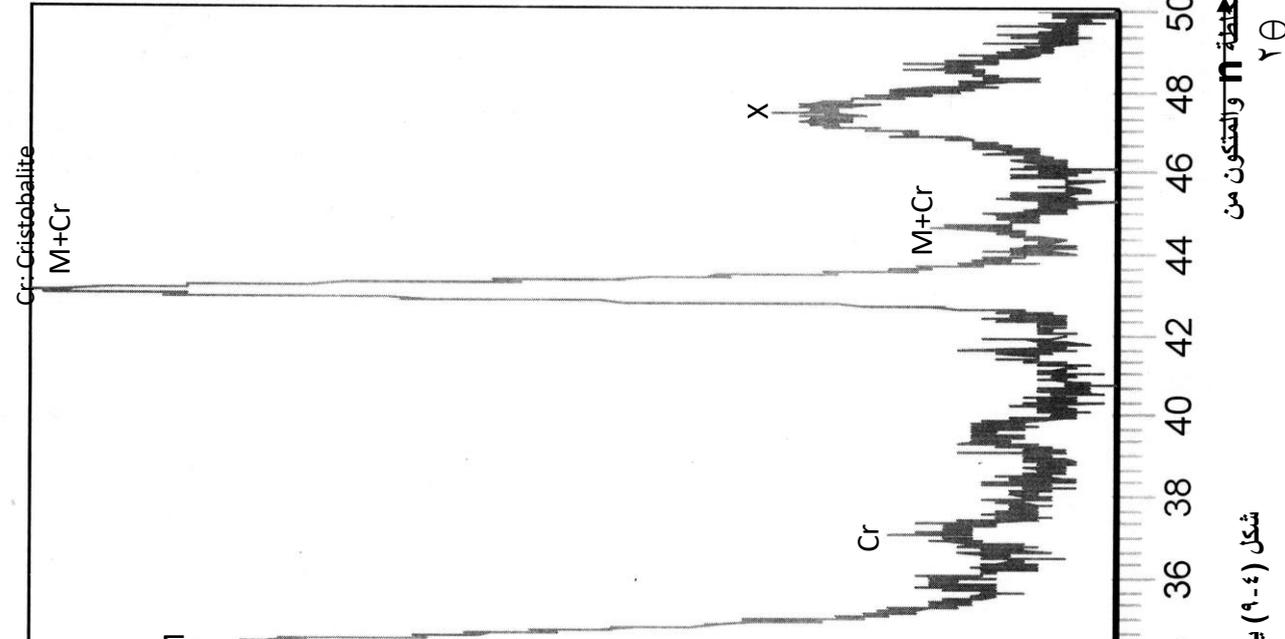
M: Mullite



شكل (٨-٤) يبين مخطط التحليل المعدي للأشعة السينية للنموذج G من نماذج الخطية M والتكون من

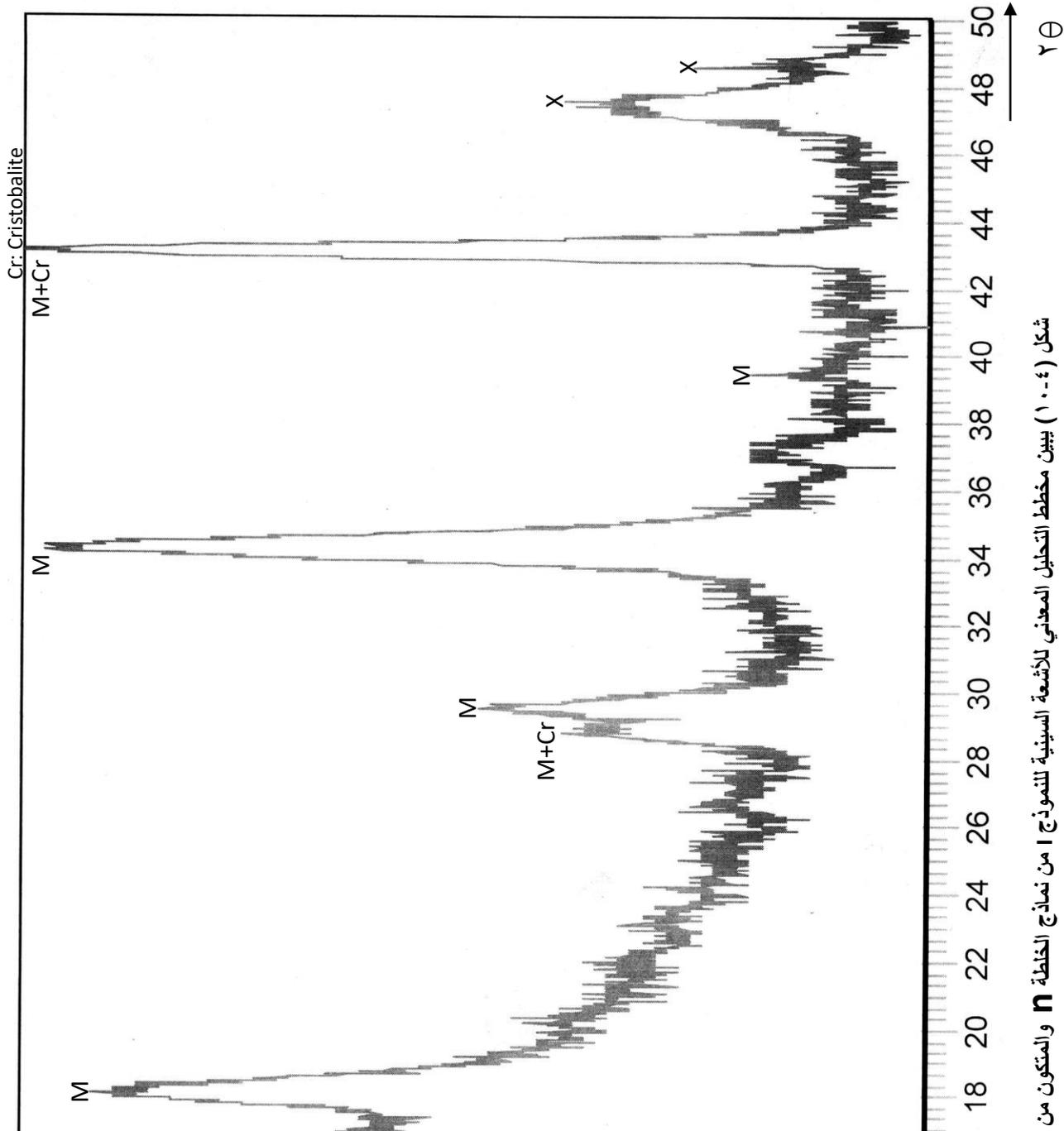
(Grnp ٧٧.٥% + S.C. ١٢.٥%)

M: Mullite



شكل (٩-٤) ي

M: Mullite

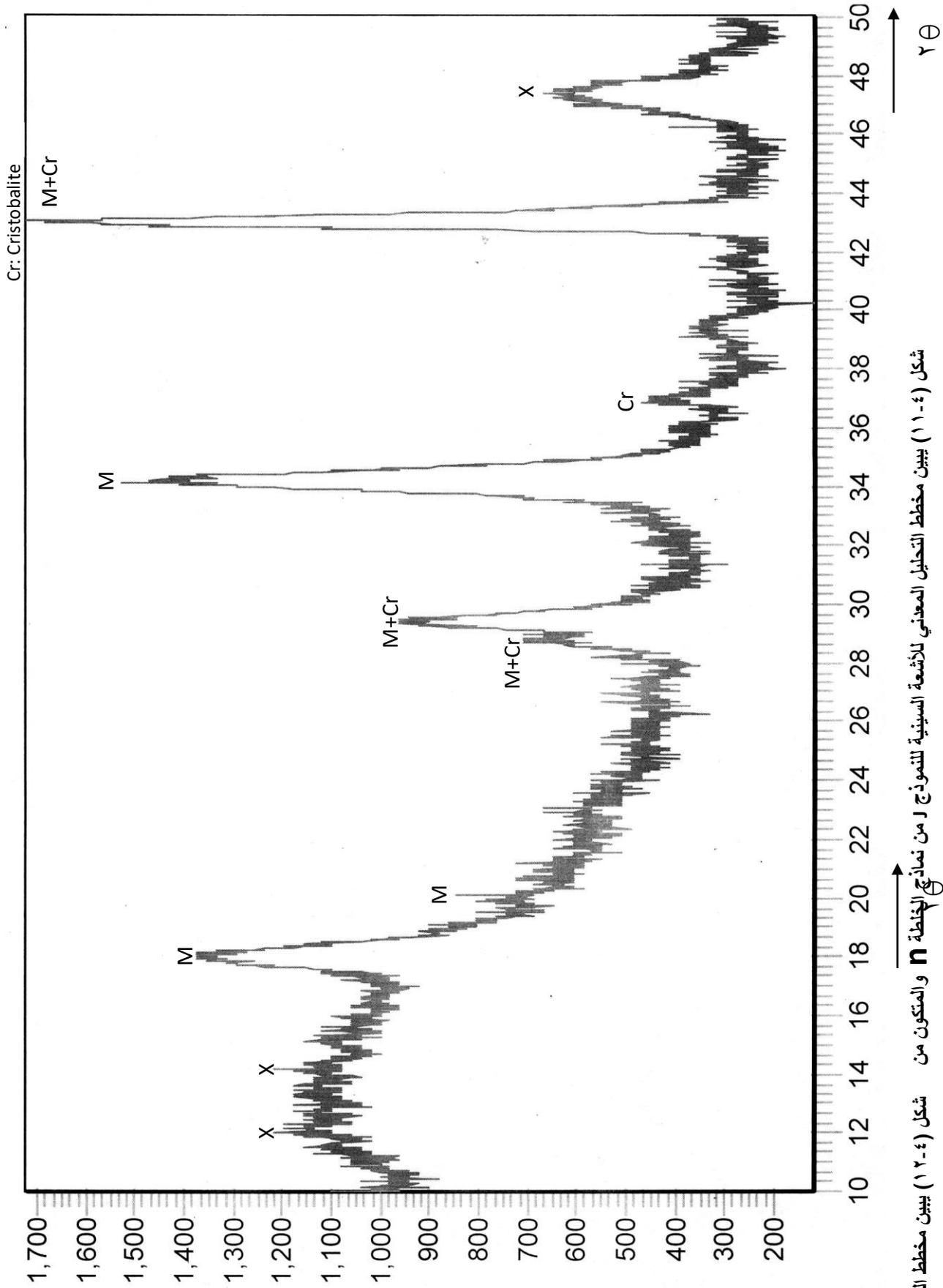


شكل (١٠-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج 1 من نماذج الخطة n والمتكون من

٢٢.٢ S.G + ٧٧.٨ Grnp

M: Mullite

M: Mullite



شكل (١٢-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج J من نماذج الخطة N والمتكون من شكل (١٢-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج (١١-٤) يبين مخطط التحليل المعدني للأشعة السينية للنموذج J من نماذج الخطة N والمتكون من

٢٦.٣ S.C. + ٧٣.٧ Grnp

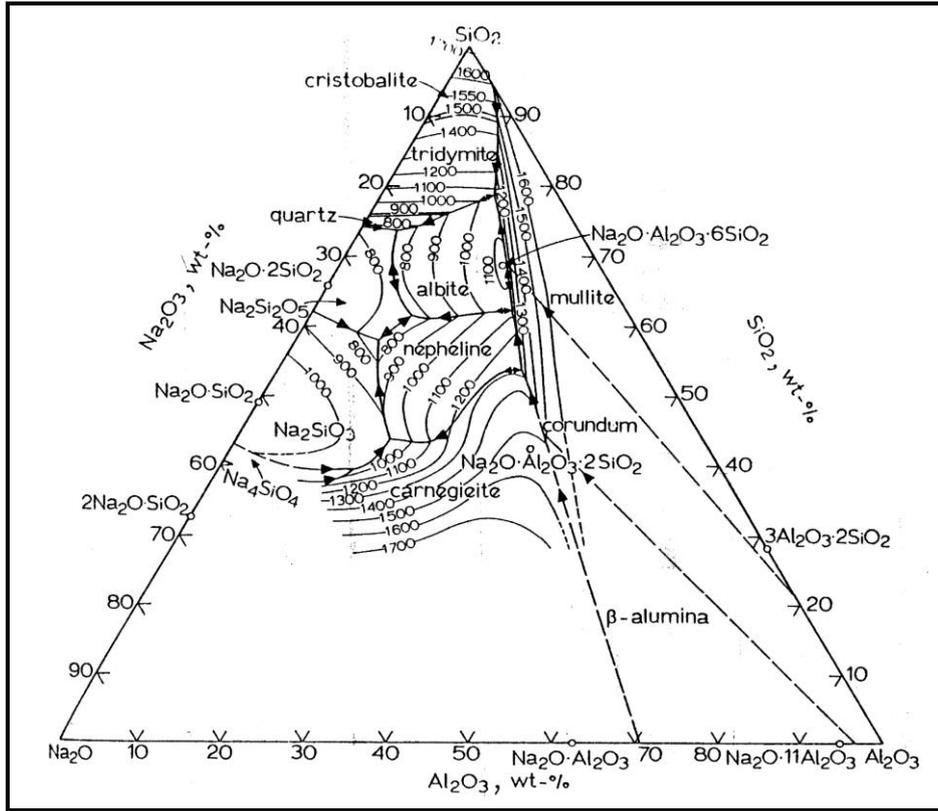
٢٠.٥ S.C. + ٧٠ Grnp

ويمكن حساب نسبة كل مكون من المكونات من خلال معرفة الوزن الجزيئي للمكونات الداخلة ويوضح الجدول (٤-٤) نسبة كل مكون من المكونات.

جدول (٤-٤) يوضح نسبة كل مكون من مكونات الخلطة n

اسم النموذج	نسبة الكروك %	نسبة سيليكات الصوديوم %	نسبة الالومينا % (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	نسبة السليكا % (SiO <sub>2</sub> )	نسبة أوكسيد الصوديوم % (Na <sub>2</sub> O)
G	٨٧.٥	١٢.٥	٤٤.٦	٣٩.٤	٦.٣٥
H	٨٢.٤	١٧.٦	٤٢	٣٩.٩٧	٨.٩٤
I	٧٧.٨	٢٢.٢	٣٩.٦٨	٤٠.٤٩	١١.٢٧
J	٧٣.٧	٢٦.٣	٣٧.٥٩	٤٠.٩٦	١٣.٣٥
K	٧٠	٣٠	٣٥.٧	٤١.٣٧	١٥.٢٣

وبالاستعانة بالمخطط الطوري الثلاثي يمكن معرفه الأطوار المتحققة في نماذج الخلطة (N).



شكل (٤-١٣) المخطط الطوري لنظام  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  وبيان أهم الأطوار الظاهرة فيه [١٨]

ومن تسقيط القيم المحسوبة على الهرم الثلاثي المكونات ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ) نجد تحقق تلك الأطوار، الذي يعطي إمكانية استعمال أطيان الكاؤولين العراقي في تصنيع أجسام سيراميكية ذات تقلص واطى بعد إجراء المعالجات التي تمت في متن البحث.

## Conclusions

## ٧-٤ الاستنتاجات

يمكن تلخيص أهم ما توصلت إليه الدراسة الحالية بالنقاط التالية:

١. تحقق تحضير نموذج ذي تقلص واطى جداً من استعمال الكروك المحضّر من كاؤولين دويخله العراقي وباستعمال مواد رابطة معالجة من مواد محلية.
٢. تحضير جسم سيراميكي ذي تقلص واطى جداً من استعمال كل من الكاؤولين المعالج و سيليكات الصوديوم كمعاد رابطة متماسكة وصلبة بعد المعاملة الحرارية.
٣. ظهر من خلال الدراسة إن قيم التقلص الناتج من استعمال الكاؤولين المعالج كمادة رابطة هي أفضل (أوطأ) من قيم التقلص الناتج من استعمال سيليكات الصوديوم.

اسم النموذج	نسبة المادة الرابطة	تقلص الجفاف الخطي %	تقلص الجفاف الحجمي %	تقلص الحرق الخطي %	تقلص الحرق الحجمي %
E	الكاؤولين المعالج	٠.٠٧	٠.٢١	٠.٢١	٠.٦
I	سيليكات الصوديوم	٠.٣	٠.٩	٠.٦	١.٧

٤. أظهرت الدراسة أن هنالك تأثير كبير للمقاس الحبيبي وتوزيع المقاس الحبيبي وضغط التشكيل على قيم تقلص المنتجات سيراميكية حيث ومن خلال اختيار طيف واسع من المقاسات الحبيبية وتوزيعها بشكل دقيق لضمان الحصول على منتجات سيراميكية كثيفة الرص وذات تقلص واطئ جداً.

٥. أظهرت الدراسة أن المعاملة الحرارية للنماذج المحضرة ضمن مدى حراري (١٣٥٠-١٤٠٠ °C) تحوّل طورَي المولايث والكرستبولايث التي هي أطوار مستقرة عند الدرجات الحرارية العالية وهذا ما يضمن تحقق الاستقرار الحراري الذي تتمتع به المنتجات السيراميكية المحضرة.

## Recommendations

## ٨-٤ التوصيات

بعد الانتهاء من الدراسة الحالية نوصي بان تنال الموضوعات التالية اهتماماً اكبر للبحث في الدراسات المستقبلية:

١. دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للنماذج (E,I) التي أعطت أفضل قيم تقلص خلال الدراسة الحالية.
٢. دراسة استعمال أنواع أخرى من المواد الرابطة وتأثيرها على قيم التقلص الناتج.
٣. دراسة تأثير زمن الإنضاج لأكثر من ساعتين على قيم التقلص الناتج.
٤. دراسة استعمال طرق أخرى للسيطرة على التقلص كاستعمال مواد ذات معامل تمدد معروف في تحضير أجسام سيراميكية واطنة التقلص.

جدول (٣-٦) تغيير قيم تقلص (الجفاف والحرق) الخطي مع درجة حرارة التحميص للكاولين المضاف بنسبة (١٣%) كمادة

### رابطة لنماذج الخلطة m

اسم النموذج	نسبة الكروك المضاف %			المادة الرابطة			النماذج قبل التجفيف			النماذج بعد التجفيف			النماذج بعد الحرق			تقلص الحرق الخطي %
	٢٥٠ μm < D < ٣٥٥ μm gm	٣٥٥ μm < D < ٤٧٥ μm gm	٤٧٥ μm < D < ٨٥٠ μm gm	نسبة الكاولين المضاف gm	نسبة الكاولين المضاف gm	نسبة الكاولين المضاف gm	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	
A	٢٤.٨	٨.٧	٤٣.٥	١٢.٩	٤٠.٠	١٢.٩	٢٥.٨	٥.٩	٢٥.٨	٦.٢	٥.٨٩	٦.١	٢٥.٦	٥.٨	٥.٣٥	
C	٢٤.٨	٨.٧	٤٣.٥	١٢.٩	٣٠.٠	١٢.٩	٢٥.٨	٥.٨	٢٥.٨	٦.٢	٥.٨٥	٦.٢	٢٥.٧	٥.٧	٥.٣٥	

جدول (٧-٣) تغير قيم تقلص (الجفاف والحرق) الحجمي مع درجة حرارة التحميص للكاؤولين المضاف بنسبة (١٣%) كمادة

رابطة لنماذج الخلطة m

اسم النموذج	نسبة الكروك المضاف %			المادة الرابطة			النماذج قبل التجفيف			النماذج بعد التجفيف			النماذج بعد الحرق		
	ناعم 250 μm < D < 300 μm gm	وسط 250 μm < D < 400 μm gm	خشخ 1.0 mm < D < 1.18 mm gm	نسبة الكاؤولين المضاف D > 50 μm	درجة حرارة التحميص الكاؤولين °C	نسبة PVA	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm
A	24.8	24.8	24.8	11.1	400	0.08	25.8	0.9	25.8	0.9	25.8	1.1	0.9	25.8	
C	24.8	24.8	24.8	11.1	400	0.08	25.8	0.9	25.8	0.9	25.8	1.1	0.9	25.8	

جدول (٨-٣) تغير قيم تقلص (الجفاف والحرق) الخطي مع درجة حرارة التحميص للكاؤولين المضاف بنسبة (٢٣%) كمادة

رابطة لنماذج الخلطة m

اسم النموذج	نسبة الكروك المضاف %			المادة الرابطة			النماذج قبل التجفيف			النماذج بعد التجفيف			النماذج بعد الحرق		
	ناعم 250 μm < D < 300 μm gm	وسط 250 μm < D < 400 μm gm	خشخ 1.0 mm < D < 1.18 mm gm	نسبة الكاؤولين المضاف D > 50 μm	درجة حرارة التحميص الكاؤولين °C	نسبة PVA	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	القطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm
B	24.8	24.8	24.8	11.1	400	0.12	25.8	0.9	25.8	0.9	25.8	1.1	0.9	25.8	
D	24.8	24.8	24.8	11.1	400	0.12	25.8	0.9	25.8	0.9	25.8	1.1	0.9	25.8	

جدول (٩-٣) تغير قيم تقلص (الجفاف والحرق) الحجمي مع درجة حرارة التحميص للكاؤولين المضاف بنسبة (٢٣%) كمادة

رابطة لنماذج الخلطة m

اسم النموذج	نسبة الكروك المضاف %	المادة الرابطة	النماذج قبل التجفيف	النماذج بعد التجفيف	النماذج بعد الحرق
-------------	----------------------	----------------	---------------------	---------------------	-------------------



		γ	λ		•	ᶒ	ο	ϣ	ᶒ	ο	γ	•	ϣ	ο	γ	λ	
•.ᶒ	•.ᶒ	ο.ᶒ λ	ο.ο ε	ᶒο.γ ο	ο.γ ο	ο.οᶒ	ᶒο.λ λ	ο.γ ᶒ	ο.ο ε	ᶒο.λ λ	•.ᶒ ο	ϣ. •	ᶒᶒ.γ ο	εᶒ. ο	λ. γ	ᶒε. λ	<b>E</b>



جدول (١٤-٣) تغير نسبة فقدان الكتلة بعد الحرق مع قيم (الكاولين+PVA) المضافة كمادة رابطة لنماذج الخلطة m

اسم النموذج	نسبة الكروك المضاف %			المادة الرابطة			النماذج قبل التجفيف			النماذج بعد التجفيف			النماذج بعد الحرق		
	ناع gm 250µm < D < 300µm	وسط gm 250µm < D < 800µm	خشخ gm 10mm < D < 1.18mm	نسبة الكاولين المضاف D < 50µm gm	درجة حرارة التحميص الكاولين °C	نسبة PVA	الفطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	الفطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	الفطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm
A	24.8	24.8	24.8	12.94	400	0.07	25.89	0.98	6.20	25.89	0.98	6.16	25.66	0.86	5.45
B	24.8	24.8	24.8	22.88	400	0.12	25.81	0.43	7.66	25.81	0.37	7.64	25.52	0.43	6.69
C	24.8	24.8	24.8	12.94	400	0.07	25.85	0.86	6.23	25.85	0.85	6.20	25.7	0.88	5.47
D	24.8	24.8	24.8	22.88	400	0.12	25.83	0.46	7.67	25.83	0.43	7.64	25.53	0.43	6.69
E	24.8	24.8	24.8	12.94	400	0.25	25.88	0.43	5.79	25.88	0.52	5.75	25.75	0.54	5.18
F	24.8	24.8	24.8	22.88	400	0.45	25.86	0.9	6.9	25.86	0.88	6.88	25.95	0.88	6.50

من الجداول السابقة نلاحظ أن أفضل قيمة تقلص (أوطأ) تم الحصول عليها لنماذج الخلطة (m) كانت للنموذج E والذي يتكون من [٨٧% كروك + ١٣% كاؤولين معالج].

جدول (١٥-٣) تغير قيم التقلص (الجفاف والحرق) الخطي مع قيم سليكات الصوديوم المضافة كمادة رابطة لنماذج الخلطة n

اسم النموذج	نسبة الكروك المضاف %			المادة الرابطة % سليكات الصوديوم			النماذج قبل التجفيف			النماذج بعد التجفيف			النماذج بعد الحرق		
	ناع gm 250µm < D < 300µm	وسط gm 250µm < D < 800µm	خشخ gm 10mm < D < 1.18mm	نسبة السليكات	الفطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	الفطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	الفطر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	الفطر cm	معدل السمك cm
١	25	25	25	12.5	26	7.24	6.72	25.91	7.02	6.69	25.62	6.82	0.98	1.3	2.8
٢	25	25	25	12.5	26	7.24	6.80	25.86	6.73	6.77	25.57	6.54	0.98	1.3	2.8
٣	25	25	25	12.5	26	7.24	6.76	25.85	6.86	6.75	25.56	6.48	0.98	1.3	2.8
٤	25	25	25	12.5	26	7.24	6.71	25.89	6.87	6.57	25.60	6.36	0.98	1.3	2.8
١	26	26	26	17.6	26	7.24	6.93	25.90	6.89	6.90	25.67	6.73	0.98	1.3	2.8
٢	26	26	26	17.6	26	7.24	6.93	25.90	6.89	6.90	25.67	6.73	0.98	1.3	2.8

1.4	2.3	0.72	7.33	20.77	7.49	7.48	20.89	7.03	7.09	27					H3
1.0	1.3	0.80	7.31	20.74	7.09	7.47	20.89	7.71	7.77	27					H4
0.7	0.3	0.70	7.40	20.70	7.42	7.00	20.87	7.44	7.49	27	22.22	38.89	7.78	31.11	I1
0.7	0.8	7.00	7.72	20.74	7.79	7.78	20.87	7.71	7.88	27					I2
0.7	0.7	0.81	7.32	20.76	7.47	7.39	20.89	7.49	7.48	27					I3
0.7	1.4	0.73	7.34	20.73	7.42	7.39	20.78	7.43	7.08	27					I4
0.9	0.7	0.70	7.22	20.70	7.44	7.31	20.90	7.48	7.4	27	27.32	37.48	7.37	29.47	J1
1	1	0.70	7.23	20.73	7.32	7.33	20.89	7.34	7.47	27					J2
0.4	0.8	0.70	7.44	20.74	7.47	7.40	20.89	7.49	7.00	27					J3
0.7	0.0	0.73	7.42	20.76	7.02	7.49	20.90	7.04	7.40	27					J4
1.7	0.3	0.72	7.17	20.73	7.42	7.34	20.90	7.40	7.30	27	30	30	7	28	K1
1.7	0.4	0.78	7.14	20.72	7.40	7.30	20.89	7.43	7.33	27					K2
1.7	0.8	0.78	7.198	20.71	7.47	7.37	20.89	7.49	7.47	27					K3
1.4	0.7	0.00	7.04	20.70	7.30	7.17	20.90	7.31	7.27	27					K4

جدول (١٦-٣) تغير قيم النقل (الجفاف والحرق) الحجمي مع قيم سليكات الصوديوم المضافة كمادة رابطة لنماذج الخلطة n

اسم النموذج	نسبة الكروك المضاف %			المادة الرابطة % سليكات الصوديوم	النماذج قبل التجفيف			النماذج بعد التجفيف			النماذج بعد الحرق		تقلص الجفاف الحجمي %	تقلص الحرق الحجمي %	
	ناغم 250µm < D < 300µm	وسط 420µm < D < 850µm	خشخ 10mm < D < 1.18mm		القلتر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	القلتر cm	معدل السمك cm	الوزن gm	القلتر cm	معدل السمك cm			الوزن gm
G1	25	8.75	43.75	12.5	26	7.24	6.72	25.91	7.02	6.69	25.62	6.82	5.98	3.8	7.6
G2	25	8.75	43.75		26	6.62	6.80	25.86	6.73	6.78	25.57	6.54	6.10	5.6	5
G3	25	8.75	43.75		26	6.86	6.76	25.85	6.86	6.75	25.56	6.48	5.96	3.8	6.5
G4	25	8.75	43.75		26	6.715	7.12	25.89	6.57	7.10	25.60	6.36	6.35	3	5.4
H1	32.96	8.24	41.2	17.6	26	6.56	6.93	25.90	6.89	6.90	25.67	6.73	6.05	4	4
H2	32.96	8.24	41.2		26	7	6.51	25.89	6.47	6.50	25.68	6.32	5.70	9	3.9
H3	32.96	8.24	41.2		26	6.59	6.53	25.89	6.48	6.49	25.66	6.33	5.72	6.7	4
H4	32.96	8.24	41.2		26	6.67	6.61	25.89	6.47	6.59	25.64	6.31	5.80	4	4.4
I1	31.11	7.78	38.89	22.22	26	6.44	6.44	25.87	6.50	6.42	25.75	6.45	5.75	0.9	1.7
I2	31.11	7.78	38.89		26	6.88	6.71	25.87	6.78	6.69	25.74	6.72	6.0	2.5	1.9
I3	31.11	7.78	38.89		26	6.48	6.49	25.89	6.39	6.46	25.76	6.32	5.81	2	2
I4	31.11	7.78	38.89		26	6.58	6.43	25.68	6.39	6.42	25.73	6.34	5.73	4	1.8
J1	29.47	7.37	36.48	26.32	26	6.4	6.48	25.90	6.31	6.44	25.75	6.22	5.65	2.2	2.6
J2	29.47	7.37	36.48		26	6.46	6.34	25.89	6.33	6.32	25.73	6.23	6.50	2.8	2.9
J3	29.47	7.37	36.48		26	6.55	6.49	25.89	6.45	6.47	25.74	6.44	5.70	2.4	1.3
J4	29.47	7.37	36.48		26	6.45	6.54	25.90	6.49	6.52	25.76	6.42	5.73	1.5	2.2
K1	28	7	35	30	26	6.35	6.45	25.90	6.34	6.42	25.63	6.17	5.62	0.9	4.7
K2	28	7	35		26	6.33	6.43	25.89	6.30	6.40	25.62	6.14	5.68	1.3	4.6
K3	28	7	35		26	6.46	6.49	25.89	6.36	6.46	25.61	6.198	5.68	2.4	4.6
K4	28	7	35		26	6.26	6.31	25.90	6.17	6.30	25.65	6.04	5.55	2.2	4

جدول (٣-١٧) تغير نسبة فقدان الكتلة بعد الحرق مع قيم سليكات الصوديوم المضافة كمادة رابطة لنماذج الخلطة **n**

نسبة فقدان الكتلة % gm	النماذج بعد الحرق			النماذج بعد التجفيف			النماذج قبل التجفيف			المادة الرابطة % سليكات الصوديوم	نسبة الكروك المضاف %			اسم النموذج
	الوزن gm	معدل السمك cm	القطر cm	الوزن gm	معدل السمك cm	القطر cm	الوزن gm	معدل السمك cm	القطر cm		خشخ gm 1.0mm < D < 1.8mm	وسط gm 20µm < D < 80µm	ناعم gm 250µm < D < 300µm	
10.60	0.98	6.82	25.62	6.69	7.02	25.91	6.72	7.24	26	12.5	42.75	8.75	25	G1
11.37	6.0	6.54	25.57	6.77	6.73	25.86	6.80	6.62	26					G2
11.70	0.96	6.48	25.56	6.75	6.86	25.85	6.76	6.86	26					G3
10.56	6.35	6.36	25.60	7.10	6.57	25.89	7.12	6.715	26					G4
12.31	6.05	6.73	25.67	6.90	6.89	25.90	6.93	6.56	26	17.6	41.2	8.24	32.96	H1
12.30	0.70	6.32	25.68	6.50	6.47	25.89	6.51	7	26					H2
11.86	0.72	6.33	25.66	6.49	6.48	25.89	6.53	6.59	26					H3
11.98	0.80	6.31	25.64	6.59	6.47	25.89	6.61	6.67	26					H4
10.44	0.75	6.45	25.75	6.42	6.50	25.87	6.44	6.494	26	22.22	38.89	7.78	31.11	I1
10.31	6.0	6.72	25.74	6.69	6.78	25.87	6.71	6.88	26					I2
10.10	0.81	6.32	25.76	6.46	6.39	25.89	6.49	6.48	26					I3
10.75	0.73	6.34	25.73	6.42	6.39	25.68	6.43	6.58	26					I4
12.27	0.65	6.22	25.75	6.44	6.31	25.90	6.48	6.4	26	26.32	36.48	7.37	29.47	J1
11.39	0.60	6.23	25.73	6.32	6.33	25.89	6.34	6.46	26					J2
11.90	0.70	6.44	25.74	6.47	6.45	25.89	6.49	6.55	26					J3
12.12	0.73	6.42	25.76	6.52	6.49	25.90	6.54	6.45	26					J4
12.46	0.62	6.17	25.63	6.42	6.34	25.90	6.45	6.53	26	30	36.48	7.37	29.47	K1
11.25	0.68	6.14	25.62	6.40	6.30	25.89	6.43	6.33	26					K2
12.10	0.68	6.198	25.61	6.46	6.36	25.89	6.49	6.46	26					K3
11.90	0.55	6.04	25.65	6.30	6.17	25.90	6.31	6.26	26					K4

من الجداول السابقة نلاحظ أن أفضل قيمة تقلص (أوطأ) تم الحصول عليها لنماذج الخلطة (**n**) كانت للنموذج 1 والذي يتكون من [77% كروك + 22.2% سليكات الصوديوم].

References

المصادر

١. I.P Singh, "Materials Science and processes", ٣<sup>rd</sup> ed. New Delhi., (٢٠٠٤).
٢. Ronmyers (MD-١٤) Emission factor and inventory group, "Ceramic products manufacturing". Final report, U.S.A. (١٩٩٦).
٣. W.D. Kingery, "Introduction to ceramics", ٢<sup>nd</sup> ed. U.S.A, (١٩٧٦).
٤. P. Mathew, and B. Bill, "Technology of engineering materials". ١<sup>st</sup>, Great Britain, (٢٠٠٢).
٥. F. Vales, R. Pe Zakhon and C. Olangnon, Journal materials science, p. ١٦, ٣٤, ٤٠٨١, (١٩٩٩).
٦. L. Sheppard, "American ceramic societ. Bullentin", p. ٦٩, ١٠١٢, (١٩٩٩).
٧. L. Pavlava and M. Wilson, "Clay and clay minerals", (١٩٩٩).
٨. Y. Kobayashi, K. Sumi and E. Kato, "Ceramics international", J. Ceramic Bulletin. Vol. ٤٩, No. ٧. (٢٠٠٠).
٩. Rose Rock design, Inc, "A technology transfer and outsource research and development company", New York, (٢٠٠٢).
١٠. K. Reinhard, R. Matthias, U. Peter, and G. Carsten, "LTCC-Multilayer ceramic for wireless and sensor application", Germany, (٢٠٠١).
١١. P. Greiland F. Muller, "Microstructurs design of advanced bioceramics", European cells and materials, J. American Ceramics Society Vol. ٣, Suppl. ١, (٢٠٠٢).
١٢. S. Felix and S. Sonjas, "Industrial ceramics", First published, University of Combrige, Great Britain, (١٩٦٣).

١٣. قحطان خلف الخزرجي، "مبادئ هندسة المواد اللامعدنية"، جامعة بابل، (١٩٩٤).

١٤. ريان، "خواص المواد الخام السيراميكية"، ترجمة فاضل بندر، ماجد محمد عكاشة، فوزي عبد الهادي، وزارة التعليم العالي، دار التقني للطباعة والنشر، (١٩٨٦).

١٥. National Harazd, "Kaoline based ceramics study", J. American Ceramics Society, Vol. ٣٤, No. ٥, (٢٠٠٤).
١٦. G.B. Rothenborg, "Refractory materials", First published, park ridge, New Jersey, USA, (١٩٧٦).
١٧. U.S. Patent ٢,٠٦٧,٢٨٢, (١٩٧٢).
١٨. F.H. Norton, "Refractories", ٤<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill Book Company New York. (١٩٦٨).
١٩. W.A. Rybnikw Steklo Keven Bd., Transaction and Journal of British ceramic society, Vol. ٦٨, No. ٤, (١٩٦٤).

٢٠. فارس محمد علي، "تحضير عازل حراري سيراميكي من مخلفات الطاقة الكهربائية ودراسة خواصه الفيزيائية والكيميائية"، رسالة ماجستير، جامعة بابل، كلية العلوم، (٢٠٠٥).
٢١. أثير جواد الطائي، وسام نوري الدباغ، "بحث إمكانية إنتاج الطابوق الطيني الناري (الشاموت) من الأطنان العراقية"، مشروع بحث لنيل شهادة الدبلوم العالي في هندسة البناء والإنشاءات، الجامعة التكنولوجية، (١٩٩٨).
٢٢. Kempnievax, "Low expansion clay", (١٩٩٦). Email: [kempb@nievax.ne.ac.sg](mailto:kempb@nievax.ne.ac.sg).
٢٣. R. Dannon, "Study in cushioning hand book", (١٩٩٦). Web: <http://home.earthlink/~philfety>.
٢٤. R. Susan, "Ceramics monthly", University of Hartford, (١٩٩٦). Appalachian center for crafts, Smithville TN ٣٧١٦٦.
٢٥. S. Seven, Rolfjanssen and C. Nils, "In-situ synthesis of mullite-aroute to zero shrinkage", Technology university, Hamburg, Germany, (١٩٩٩).
٢٦. P.H. Marin, W.U. Suxing, C. Helen, "Precursor mixture and methods of forming ceramic composite", Competitive technologies Inc, (٢٠٠٠).
٢٧. Wikipedia, "Ceramics", Gnufree documentation license, (٢٠٠٥).
٢٨. Grim, R.E. "Clay mineralogy", Mcgrau Hill, New Yourk, USA, (١٩٨٦).
٢٩. W.E. Worrall, "Clays their nature Origin and general properties", First published, Great Britain, (١٩٦٨).
٣٠. جلال محمد صالح، "كيمياء الغرويات والسطوح البينية"، جامعة بغداد، كلية العلوم، (١٩٨٤).
٣١. A.I. Andrews, "Ceramic tests and calculations", New York, John Wiley and Sons, Ins, tenth printing, USA, (١٩٥٧).
٣٢. F.H. Norton, "Physical ceramics for engineers", Addison Wesley publishing company, University of Michign, London. (١٩٦٤).
٣٣. F.H. Norton, "Fine ceramics technology and calculations", Roberte. Krieger publishing company Malabar, Florida, (١٩٧٠).
٣٤. H. Edrees and A. Hendry, "British ceramic transaction", ٩٨, ٦, (١٩٩٩).
٣٥. W. Kingery, Journal applied physics, ٣٠, ٣٠١, (١٩٥٩).
٣٦. M. Sacks and J. Pask, Journal American Society, Vol. ٦٥, P. ١٨٠١, (١٩٨٢).
٣٧. S. Kenneth, "Refractories and their uses", ١<sup>st</sup> ed., London, (١٩٧٢).
٣٨. S. Grim, "The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials", ٤<sup>th</sup> ed., Ernestbeem, Ltd., London, (١٩٧١).

٣٩. R.D. Dennis, J. Ceramic processing E-Zine, Vol. ٢, No. ٩, (٢٠٠٤).
٤٠. W.G. Moffat and Son, "The structure and properties of materials", Hill Book Company New York, (١٩٦٤).
٤١. فريد بلمبير، ترجمة د. صلاح محسن عليوي، "أساسيات علم البوليمر"، جامعة الموصل، كلية العلوم، (١٩٧١).
٤٢. علي، حسين علي وهيب، صباح فاضل، فارس غانم عاجل، "تصنيع بوابق الصهر" (بحث غير منشور)، مركز البناء والزجاج، ص (١٢)، (٢٠٠١).
٤٣. جلال محمد صالح، "كيمياء السطح والعوامل المساعدة"، جامعة بغداد، كلية العلوم، (١٩٨٠).
٤٤. C. Chambers, A.K. Holliday, "Inorganic Chemistry", Inter seseience publication, New York, (١٩٨٢).
٤٥. G. Lutz, "International Ceramic", p. ٤٢, ٦, ٣٦٧, (١٩٩٣).
٤٦. Anil Kumar Sinha, "Powder Metallurgy", ٢<sup>nd</sup> ed., (١٩٨٧).
٤٧. J.R. Taylor and A.C. Bull. "Ceramics glaze technology", ١<sup>st</sup> ed., Pergamon press, (١٩٨٦).
٤٨. شوكت إسماعيل الداھري، ، "دراسة التوصيلية الحرارية لمكبوسات (البورسلينات-كاؤولين)"، رسالة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، (٢٠٠١).
٤٩. R.D. Dennis, J. Ceramic processing E-zine, Vol. ٣, No. ٣, (٢٠٠٤).
٥٠. J. Aue and De Hosson; Journal Materials Science Bulletin, p. ٦٩, ١٠١, (١٩٩٩).
٥١. F.A. Rassen "The use of Iraqi siliciliceous rock in electric insulated industry", Ph.D. Thesis, Al-Nhrean university, (١٩٩٨).
٥٢. محمد هادي الشمري، "دراسة تأثير المعاملة الحرارية في الخواص الميكانيكية للمونة الحرارية المستعملة في أفران صهر"، رسالة ماجستير، جامعة بابل، كلية العلوم، (٢٠٠٤).
٥٣. W.E. Brwnell, "Structure clay production", Springer early, New York, (١٩٧٦).
٥٤. R. Ford, "Ceramic Drying", Pergamon press Oxford, New York, (١٩٨٦).
٥٥. F.B. Swinkels, and M.F. Ashby, "A second report on Sintering diagrams", Journal Acta. Materials, Vol. ٢٩, (١٩٨١).
٥٦. U.S. Patent ٤,٠٩١,١٦٤, (١٩٧٨).
٥٧. B.K.G. Theng, J. Clay and clay minerals, Vol. ١٠, (١٩٨٢).
٥٨. U.S. Patent ٤,٠١٧,٤٥٢, (١٩٧٧).
٥٩. J.H. Chesters, "Refractories production and properties". Published by The Iron and steel Institute. London, (١٩٧٣).

- ٦٠ . J.E. Gilloif, "Clay Inengineering gology" Tokyo, (١٩٨٧).
- ٦١ . R. Danie, "Clay and Glazes for the potter" Pennesylvania, USA, (١٩٧٣).
- ٦٢ . عباس كريم سعدون الجبوري، "دراسة سلوكية التلييد في مادة الالومينا السيراميكي"، رسالة ماجستير، جامعة بغداد، كلية الهندسة.
- ٦٣ . J. J. Brown, Ceramic Bulletin, Vol. ٥٨, No. ٦, (١٩٧٩).
- ٦٤ . R.D. Dennis, J. Ceramic Processing E-Zine, Vol. ٢. No. ١٠, Ot.. ٨-١٠, ٢٠٠٤.