

تحضير ودراسة بعض الخواص الفيزيائية والميكانيكية للبورسلين

المستخدم فيه بديل الفلدسبار

أ.م.د. فاضل عطية جبار أ.د. محمد حيدر الطائي م.م. حسين علاء جابر

الجامعة التكنولوجية / هندسة مواد

الخلاصة

يتضمن البحث تحضير نماذج بورسلينية باستخدام مواد أولية محلية وبدون استخدام مادة الفلدسبار والتي تعتبر من المواد الأساسية لتكوين البورسلين، وذلك لعدم توفر هذه المادة محليا ويتم استيرادها، ولقد تم الاستعاضة عنها باستخدام مادة كاربونات الكالسيوم وهي مادة متوفرة محليا. حيث تم تحضير نماذج بورسلينية مكونة من (50% كاؤولين دويخلة، 40% رمل زجاج ارضمة و 10% كاربونات الكالسيوم). استخدمت تقنية تكنولوجيا المساحيق للحصول على النماذج باستخدام ضغوط كبس مختلفة (15,20,25,30,35)MPa وأجراء التلييد عند درجات حرارية مختلفة (1100,1150,1200,1250,1300)°C، ولقد تمت دراسة تأثير درجة حرارة التلييد وضغط الكبس على بعض الخواص الفيزيائية مثل (التقلص الحجمي، الكثافة الحجمية، المسامية الظاهرية وامتصاصية الماء) والميكانيكية مثل (صلادة فيكرز المجهرية ومقاومة الكسر). حيث تم التوصل الى إمكانية استخدام كاربونات الكالسيوم كمادة بديله عن الفلدسبار في إنتاج نماذج بورسلينية. كما ان زيادة درجة حرارة التلييد وضغط الكبس ادى الى تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية ولكن الى حد معين ومن ثم حصل انخفاض في القيم، وذلك بسبب انحباس الغازات داخل المسامات وتكون الاجهادات الداخلية.

كلمات رئيسية: البورسلين ;كاربونات الكالسيوم ;مقاومة الكسر ; صلادة فيكرز

Preparation and Studying Some Physical and Mechanical Properties of Porcelain with Using Feldspar Replacement

Abstract

This research includes preparation of porcelain samples with using local raw materials and without using the feldspar material that consider of basic materials for porcelain formation, that is because the feldspar is not local available and will be imported. Feldspar replaced with using calcium carbonate and this material is local available. Porcelain samples formed from (50% Duekhla Kaolin, 40% Ardima Sand and 10% Calcium Carbonate) have been prepared. Powder technology were used to

present the samples by using different pressing pressures (15, 20, 25, 30 and 35) MPa and different sintering temperature (1100, 1150, 1200, 1250 and 1300)°C. The sintering temperature and pressing pressure effect have been studied on some physical properties as (volume shrinkage, bulk density, apparent porosity and water absorption) and mechanical properties as (Vickers hardness and fracture strength). The results shown possibility used the calcium carbonate as a feldspar replacement material in porcelain samples production. The increasing in sintering temperature and pressing pressure leads to enhance the physical and mechanical properties and then decrease because staying the gases in the porosities and formation the residual stresses.

المقدمة

ان لتقدم العلم والتكنولوجيا الأثر الكبير في تطوير المنتجات السيراميكية وان سبب انتشار هذه الصناعة في أنحاء كثيرة من العالم هي النواحي الجمالية والصناعية لهذه المواد وكذلك توفر مصادرها الأولية في معظم أرجاء العالم، وقد ازداد الطلب على المنتجات السيراميكية لسهولة تصنيعها وخواصها العالية، فضلاً عن قلة تكلفة البعض منها وتختلف المنتجات السيراميكية تبعاً لاستخداماتها الشائعة إذ أنها تشمل الطابوق العادي والخفيف وأنابيب صرف المياه والبلاط وصناعة الزجاج والأسمنت وصناعة المواد الحاكة والحراريات، وبسبب الخواص العزلية الكهربائية الجيدة لبعض أنواع السيراميك استخدم في مجالات تصنيع القطع الخاصة بأجزاء الدوائر الكهربائية وفي محطات توليد الطاقة الكهربائية، وتستخدم كذلك في التطبيقات التي تستفيد من خموليته الكيميائية ومقاومته لتأثير الحوامض والقواعد كبناء أحواض إنتاج الحوامض، وبسبب خواصه الميكانيكية والفيزيائية المميزة استخدم السيراميك في صناعة الأجزاء المعوضة للعظام وكذلك في ترميم الأسنان [1،2].

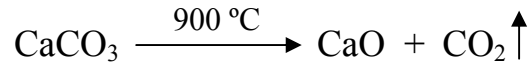
تصنف المواد السيراميكية بصورة عامة إلى: السيراميك التقليدي (Traditional Ceramics) والسيراميك المتقدم (Advanced Ceramics) [3-5]. السيراميك التقليدي يتميز بان معظمه سليكات والتركيب الدقيق له مسامي ويكون خشناً نوعاً ما وغير منتظم ومتعدد الأطوار وهو يصنع عادةً من مزج الأطنان مع الفلدسبار وتليده وتزجيجه وهو يشمل منتجات الطين (Clay Products) وغيرها من المواد. أما السيراميك المتقدم أو الحديث، فيشير إلى المواد السيراميكية المنتجة بتقنيات صناعية متقدمة وهو يتميز بالنقاوة العالية والحجم الدقائقي الصغير وتوزيع حجمي ضيق والتركيب الدقيق له أكثر تجانساً وأقل مسامية من السيراميك التقليدي وهو يتضمن الكربيدات والنتريدات والبوريدات والأكسيدات والفرايت وغيرها من المواد [6،1].

البورسلين

يعتبر البورسلين من المواد السيراميكية التي أصبحت تلاقي اهتماما كبيرا نظرا لما تمتاز به من خواص ميكانيكية وعزلية (حرارية أو كهربائية) جيدة. البورسلين هو منتج سيراميكي صلد ابيض شبه شفاف يسمى أحيانا الخزف الصيني أو المنتجات البيضاء (White Wares) يصنف اغلب الأحيان أنقى وأصفى مركبات السيراميك التقليدي [7،8]. والبورسلين خليط من مواد تتركب بصورة أساسية من خامات الكاؤولين والفلدسبار وبعض العناصر الأخرى وهو على نوعين رئيسيين هما: البورسلين الصلب (Hard Porcelain) والبورسلين الطري (Soft Porcelain) [8]. الجدول (1) يوضح بعض القيم القياسية للخواص الفيزيائية والميكانيكية للبورسلين المستخدم في صناعة الكاشي (Tiles) [9].

كربونات الكالسيوم

توجد كربونات الكالسيوم (CaCO_3) في الطبيعة على شكل صخور جيرية (Lime Stone) وتوجد بصورة نقية في معدن الكالسايت (Calcite) الذي يبلغ وزنه النوعي (2.7) وصلادة (3) حسب مقياس (Mohs)، وان نسب مكونات كربونات الكالسيوم هي ($56.03\% \text{ CaO}$, $43.97\% \text{ CO}_2$) [11،10]. يتحلل كربونات الكالسيوم عند درجة حرارة (900°C) ويصاحب عملية التحلل فقدان في الوزن مقداره (44%) نتيجة تحرر غاز (CO_2)، وينتج كذلك من تحلل كربونات الكالسيوم اوكسيد الكالسيوم (CaO) وهذا الاوكسيد يعمل كمادة مساعدة للصهر بدلا من مادة الفلدسبار في البورسلين والمعادلة التالية توضح تحلل كربونات الكالسيوم [10،4]:



ان تأثير وجود اوكسيد الكالسيوم في الأجسام الطينية هي في خفض لدونة الاطيان وتقليل الانكماش وهو أيضا يساعد على خفض درجة الانصهار حيث يتفاعل مع الاكاسيد التي تنتج من تحلل المعادن الطينية ليكون جزءا سائلا بدرجة انصهار واطنة ثم يتحول السائل الى جزء زجاجي أثناء عملية التبريد يعمل على ربط الدقائق مما يؤدي الى تحسين مقاومة الأجسام الطينية. ان بقاء اوكسيد الكالسيوم بصورة حرة في الأجسام الطينية بعد عملية الحرق سوف يكون له تاثير سلبي، حيث يتفاعل مع رطوبة الجو مكونا هيدروكسيد الكالسيوم (Ca(OH)_2) الذي يتبلور بحجم كبير مما ينتج اجهادات داخلية تؤدي بمرور الزمن الى ظهور تشققات في الأجسام الطينية [7،11،12].

الجانب العملي

1. تهيئة المواد الأولية:

بالتعاون مع الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين تم جلب المواد الأولية التالية (كاؤولين دويخلة ورمل زجاج ارضمة وكاربونات الكالسيوم) التحليل الكيميائي للكاؤولين ولرمل الزجاج مبين بالجدول رقم (2) وتحليل الاشعة السينية (X-Ray) للكاؤولين موضح بالشكل (1). حيث تم طحن المواد الأولية باستخدام طاحونة الكرات ثم أجريت بعد ذلك عملية الغرلة وتم الحصول على حجم دقائق مقداره (53µm) لجميع المواد الأولية.

2. تحضير النماذج:

تم استخدام تقنية تكنولوجيا المساحيق للحصول على النماذج النهائية، حيث تم تحضير خلطة بورسلين متكونة من (50% كاؤولين و40% رمل الزجاج و10% كاربونات الكالسيوم) وقد تم اجراء عملية الخلط للمواد الأولية باستعمال طاحونة الكرات ولمدة 30 دقيقة، بعدها شكلت العينات بطريقة الكبس شبه الجاف حيث تم اخذ عينات بوزن (8 g) واضيف اليها كمية من الماء المقطّر بنسبة (10 %wt) وخلطت بشكل جيد، ثم كبست بواسطة مكبس هيدروليكي مستخدمين قالب مصنوع من مادة فولاذ العدة بقطر (30 mm)، وقد تم تسليط ضغوط كبس مختلفة MPa (15,20,25,30,35) ثم أجريت عملية التليد بدرجات حرارة مختلفة °C (1100,1150,1200,1250,1300) بمعدل تسخين (5 °C/min) وبزمن تثبيت مقداره ساعة واحدة بعدها تم إطفاء الفرن مع بقاء العينات داخله.

الفحوصات

أ. الخواص الفيزيائية

(1) نسبة التقلص الحجمي % (V.Sh): تصف هذه الخاصية حساسية الأطياف تجاه عملية الحرق وتحسب من المعادلة (1) حيث (V₀) حجم النموذج قبل التليد (mm³) و (V) حجم النموذج بعد التليد (mm³) [13]:

$$(V.Sh)\% = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

(2) الكثافة الحجمية (B.D): تم حساب الكثافة الحجمية باستخدام مبدأ أرخميدس وحسب المواصفة ASTM (C373-72) والتي تتم وفق المراحل التالية [10]:

- (أ) تجفيف النماذج الملبدة في مجفف لمدة 24 ساعة ومن ثم وزنها. ويسمى هذا الوزن W_d.
(ب) غمر النماذج بالماء المقطر لمدة 24 ساعة ثم تعليقها في ميزان حلزوني ويسجل الوزن. يسمى هذا الوزن W_n.

(ج) أخرج النماذج ومسحها بقطعة قماش ومن ثم وزنها. يسمى هذا الوزن W_s . ومن الأوزان أعلاه يتم إجراء الحسابات باستخدام المعادلة (2) حيث (D) كثافة الماء المقطر (1 g/cm^3) .

$$(B.D) = \frac{W_d}{W_s - W_n} \times D \quad (2)$$

(3) المسامية الظاهرية % (A.P) ونسبة امتصاص الماء % (W.A):
تمثل المسامية الظاهرية النسبة بين حجم المسامات المفتوحة \ الحجم الكلي (حجم المسامات الكلية + حجم الحبيبات) وتحسب من المعادلة (3). اما نسبة امتصاص الماء فهي تمثل حجم المسامات المفتوحة التي يملئها الماء وتحسب من المعادلة (4) [12].

$$(A.P)\% = \frac{W_s - W_d}{W_s - W_n} \times 100 \quad (3)$$

$$(W.A)\% = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100 \quad (4)$$

ب. الخواص الميكانيكية

(1) الصلادة: هي إحدى الخواص الميكانيكية المهمة وتشير الى مقاومة المادة للخدش، استخدم جهاز فيكرز المجهرى لفحص النماذج السيراميكية وذلك بسبب سهولة تصدع المواد السيراميكية، وتحسب الصلادة من المعادلة (5) حيث (P) مقدار الحمل المسلط (0.5 kgf) و (d_{av}) معدل قطري المضلع الرباعي (mm) [14].

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d_{av}^2} \quad (5)$$

(2) مقاومة الكسر: تم استخدام قانون الانضغاط القطري (Diametrical Compression Test) لقياس مقاومة الكسر. ويجري هذا الاختبار بأبسط صورة كالآتي: يتم ضغط العينة التي تكون بشكل قرص بين صفيحتين مستويتين ويتم تسليط القوة عاموديا عبر القطر شكل (2)، وعند حصول الكسر في العينة يتم حساب مقاومة الكسر من المعادلة (6) حيث (F) القوة المسلطة (N) و (d) قطر النموذج (30mm) و (h) سمك النموذج (6mm) وحسب المواصفة (ASTM - D 3967) [15].

$$\sigma_t = \frac{2 F}{\pi h d} \quad (6)$$

ويسمى هذا الاختبار بعدة أسماء أخرى وهي اختبار الشد القطري (Diametrical tensile test)، الاختبار البرازيلي (Brazilian test)، اختبار الشد غير المباشر (Indirect tensile test) واختبار الضغط الشديد (Compact crushing test) [15].
النتائج والمناقشة

1. تأثير درجة حرارة التلبيد على الخواص الفيزيائية:

الشكل (4) يوضح التقلص الحجمي ودرجة حرارة التلبيد عند ضغط كبس 25 MPa. نلاحظ من الشكل زيادة في مقدار التقلص مع زيادة درجة الحرارة حيث ارتفعت نسبة التقلص من (1.1%) الى (3.47%) عند ارتفاع درجة الحرارة من (1100°C) ولغاية (1250°C) وذلك بسبب ان عملية التلبيد والتكثيف للدقائق تزداد بارتفاع درجة حرارة والتي تؤدي الى زيادة تقارب حبيبات الأنموذج مع بعضها وبالتالي زيادة في مقدار تقلص النموذج. اما عند درجة حرارة (1300°C) فنلاحظ انخفاض في مقدار التقلص وذلك لغلق المسامات وعزلها قبل اكتمال تحليل كاربونات الكالسيوم مما ادى الى عدم تمكن غاز CO₂ المتكون من التحلل الهروب من المسامات والذي سبب ضغطاً ادى الى الانتفاخ وزيادة في حجم النموذج [7، 16].

الشكل (5) يوضح الكثافة الحجمية مع تغير درجة حرارة التلبيد عند ضغط كبس 25 MPa. حيث نلاحظ زيادة في مقدار الكثافة بزيادة درجة حرارة التلبيد من (1100°C) ولغاية (1250°C) ويعود سبب ذلك الى عمليات التكثيف (Densification) التي تحصل اثناء عملية التلبيد حيث تبدأ هذه العمليات بتكون أعناق (Necks) بين الذرات تتطور مع ازدياد زمن التلبيد ودرجة حرارة التلبيد لتحصل أحاطة كاملة بالفراغات الموجودة بين الذرات فتصبح على شكل مسامات مغلقة. ونلاحظ انخفاض الكثافة عند درجة حرارة (1300°C) ويعود سبب ذلك الى حصول زيادة في حجم الأنموذج والنتيجة من ضغط الغازات المحصورة.

الشكلان (6) و(7) يوضحان المسامية الظاهرية ونسبة امتصاص الماء على التوالي مع تغير درجة حرارة التلبيد عند ضغط كبس 25 MPa. حيث يلاحظ من الشكلين انخفاض كل من المسامية الظاهرية ونسبة امتصاص الماء مع زيادة درجة الحرارة وذلك بسبب زيادة كمية الطور السائل المتكون والذي يعمل على غلق المسامات عند الدرجات الحرارية العالية وعند التبريد يتصلب الطور السائل ليتكون الطور الزجاجي [17].

2. تأثير درجة حرارة التلبيد على الخواص الميكانيكية:

تمت دراسة تأثير درجة حرارة التلييد على بعض الخواص الميكانيكية مثل الصلادة ومقاومة الكسر. حيث أظهرت نتائج فحص الصلادة بطريقة فيكرز شكل (8) وفحص مقاومة الكسر شكل (9) وكما يأتي:

عند مدى درجات الحرارة $^{\circ}\text{C}$ (1100-1250) لوحظ ان الصلادة ومقاومة الكسر تزدادان مع زيادة درجة الحرارة، ويعود سبب ذلك الى زيادة كمية الطور الزجاجي الذي يعمل على زيادة الترابط بين دقائق الأنموذج وأيضاً على تقليل المسامية، وكذلك بسبب زيادة محتوى طور المولايت (Mullite) في تركيب هذه النماذج والذي يمتاز بخصائص ميكانيكية جيدة [17،18]، وعند درجة حرارة $^{\circ}\text{C}$ (1300) نلاحظ ان الصلادة تستمر بالزيادة اما مقاومة الكسر فقد أبدت انخفاضاً في هذه الدرجة الحرارية ويعود سبب ذلك الى احتمالية تكون شقوق مجهرية حول دقائق السليكا والنتيجة من اختلاف معامل التمدد الحراري بين السليكا والطور الزجاجي وهذه الشقوق تعتبر مراكز للاجهادات والتي أدت الى خفض المقاومة. او بسبب زيادة كمية الطور الزجاجي الذي يعمل على زيادة هشاشة النموذج

3. تأثير ضغط الكبس على الخواص الفيزيائية:

الشكل (10) يوضح التقلص الحجمي مع تغير ضغط الكبس عند درجة حرارة التلييد $^{\circ}\text{C}$ 1250. نلاحظ من الشكل ان التقلص الحجمي يزداد تدريجياً مع زيادة ضغط الكبس ولغاية ضغط (30 MPa) ويعزى سبب ذلك الى ان زيادة الضغط المسلط ادى الى تقارب دقائق السليكا اكثر، وكلما كانت الدقائق متقاربة اكثر كانت التفاعلات المؤدية للتكثيف أسرع وهذا مما سبب زيادة في كمية الطور الزجاجي وبالتالي زيادة في مقدار التقلص [19]، وعند ضغط كبس (35 MPa) فقد انخفض مقدار التقلص وذلك لان الضغط العالي المسلط سبب غلق مبكر للمسامات وقبل اكتمال تحلل الكربونات مما سبب ضغط الغازات المحصورة الى خفض مقدار التقلص.

الشكل (11) يوضح الكثافة الحجمية مع تغير ضغط كبس عند درجة حرارة التلييد $^{\circ}\text{C}$ 1250. حيث نلاحظ زيادة في مقدار الكثافة بزيادة ضغط الكبس وذلك بسبب النقصان في حجم الأنموذج والنتائج من تقارب الدقائق وسد الفراغات بينها، حيث تم الحصول على أعلى قيمة للكثافة الحجمية عند ضغط كبس 25 MPa، ونلاحظ انخفاض قيمة الكثافة عند ضغط كبس 35 MPa وهو أعلى ضغط مستعمل وذلك بسبب حصول ظاهرة الانفصال بشكل طبقات في الأنموذج وفضلاً عن انخفاض مقدار التقلص عند هذا الضغط مما ادى ذلك الى حصول زيادة في حجم الأنموذج وبالتالي نقصان الكثافة.

الشكلان (12) و (13) يوضحان المسامية الظاهرية ونسبة امتصاص الماء على التوالي مع تغير ضغط الكبس عند درجة حرارة التلييد 1250°C . حيث يلاحظ من الشكلين ان زيادة الضغط المسلط أدى الى خفض نسبة المسامية وامتصاصية الماء ولكن لغاية ضغط كبس 25 MPa ويعود سبب هذا الانخفاض الى ان زيادة الضغط أدى الى تقليل حجوم المسامات وعددها وكمياتها داخل النموذج، ويلاحظ ان النموذج تعرض لزيادة في مقدار كل من المسامية الظاهرية وامتصاصية الماء عند ضغط كبس (30-35) MPa، ويعود سبب ذلك الى احتمالية تكون المسارات الشعرية داخل النموذج والنتيجة عن ارتفاع ضغط الغازات المحصورة داخل المسامات المغلقة الصغيرة مما أدى الى تحويل المسامات المغلقة الى مسامات مفتوحة.

4. تأثير ضغط الكبس على الخواص الميكانيكية:

الشكل (14) يوضح العلاقة بين ضغط الكبس والصلادة عند درجة حرارة التلييد 1250°C . حيث نلاحظ ان الصلادة تزداد مع زيادة ضغط الكبس وتبلغ أقصى قيمة لها عند ضغط كبس 25 MPa، ونلاحظ تناقص الصلادة عند ضغوط كبس (30-35) MPa ويعود سبب ذلك الى تزايد المسامية حيث تمثل المسامية عاملاً مهماً جداً في تقدير الصلادة وعلى الرغم من صغر الباعج إلا انه يتمكن من التغلغل في الجسم الأكثر مسامية. والعلاقة بين ضغط الكبس ومقاومة الكسر عند درجة حرارة تلييد 1250°C موضحة في الشكل (15)، حيث نلاحظ من الشكل وبصورة عامة ان مقاومة الكسر لم تتأثر بشكل كبير مع زيادة ضغط الكبس حيث تعرض النموذج لزيادة طفيفة في مقدار المقاومة مع زيادة الضغط المسلط وبلغت أقصى قيمة لها عند ضغط كبس 25 MPa.

الشكل (3) يوضح كيفية تكسر العينات عند قياس مقاومة الكسر حيث نلاحظ عند زيادة كل من درجة حرارة التلييد وضغط الكبس يكون شكل الكسر على طول قطر العينة وبخط مستقيم وذلك لزيادة التراص بين الدقائق مما يجعل العينة متجانسة الخواص.

الاستنتاجات

يمكن تلخيص أهم ما توصلت اليه الدراسة الحالية بالنقاط التالية:-

1. تبين من خلال الفحوصات الفيزيائية والميكانيكية الى امكانية استخدام مادة كاربونات الكالسيوم كمادة بديله عن الفلدسبار في تحضير نماذج بورسلينيه وذلك من خلال ان الخواص الناتجة كانت مقاربة للخواص القياسية للبورسلين.
2. ان زيادة درجة حرارة التلييد وضغط الكبس أدى الى تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية بنسبة 55% ولكن الى حد معين ومن ثم حصل انخفاض في القيم بنسبة 10%،

وذلك بسبب انحباس الغازات داخل المسامات وتكون الاجهادات الداخلية الناتجة عن ضغط الغازات المحصورة.

3. وجد ان أفضل ضغط كبس عند درجة حرارة تلييد 1250°C هو 25 MPa.

4. أقصى مقاومة كسر تم الحصول عليها كانت (13.986 MPa) عند ضغط كبس 25 MPa ودرجة حرارة تلييد 1250°C .

المصادر

- [1] Ryan, W. & Fric, C., "Properties of Ceramic Raw Materials", John Wiley and Sons, Inc., New York, (1967).
- [2] Grim, S.R., "The Chemistry and Physics of Clay", Ernestbeen, Ltd., London, (1971).
- [3] Barsoum, M.W., "Fundamentals of Ceramics", Drexel University, (1997).
- [4] Rahaman, M.N., "Ceramic Processing", CRC Press by Taylor & Francis Group, New York, (2007).
- [5] Callister, W.D., JR., "Materials Science and Engineering an Introduction", 6th edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, (2003).
- [6] علي، ذكرى مهدي، "دراسة تأثير متغيرات عملية التصنيع على العلاقة بين مقاومة الكسر ومتانة الكسر للمواد السيراميكية"، اطروحة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، (1999).
- [7] Kingery, W.D., "Introduction to Ceramics", 2nd edition, by A Wiley Interscience Publication, (1975).
- [8] Budnikov, P., "Technology of Ceramic Materials and Refractories", 1st edition, Pergamon Press, Cambridge, (1967).
- [9] Rado, P., "An Introduction to the Technology of Pottery", 2nd edition by Pergamon Press, (1988).
- [10] Singer, F. & Singer, S., "Industrial Ceramic", Chapman and Hall Ltd., Published, (1979).
- [11] Alikss, R.M., Hadi, M.H., Khalil, N.I. and Al-Takarli, S.F., "Effect of Fine Calcite Grains Resent in the Soil on The Properties of Clay Brick", J. Building research, vol. 3, No. 2, (1984).
- [12] القيسي، فوزي عبد العزيز، "تقنيات الخزف والزجاج"، الطبعة الأولى، دار الشروق للنشر والتوزيع، عمان، (2003).
- [13] Ryan, W., Radford, C., "White Wares", Production, Testing and Quality control, The Institute of Ceramics pergamon press. U.K., (1987).
- [14] الحيدري، جعفر، "اختبارات المواد الهندسية"، دائرة هندسة المواد والمعادن/ جامعة بلقاء التطبيقية، (2004).
- [15] Procopio, A.T., A.Zavaliangos and J.C.Cunningham, J.Mat.Sci. 38, (2003).
- [16] الخزرجي، قحطان خلف، "ميتالورجيا المساحيق"، قسم هندسة المواد، جامعة بابل، (1997).
- [17] Worrall, W.E., "Ceramic Raw Materials", 2nd edition, Institute of Ceramics, London, (1982).

[18] Tkalec, E., Prodanovic, D. Falz W., Hennicke H.W., "Microstructure and Properties of Aluminous Electrical Porcelain Doped with Talc", Trans. J. Br. Ceram. Soc., Vol. 83, No. 3, (1984).

[19] Pampuch Roman, "Ceramic Materials an Introduction To Their Properties", Elsevier scientific publishing com., (1979).

جدول (1) يوضح بعض القيم القياسية للخواص الفيزيائية والميكانيكية للبورسلين المستخدم في صناعة الكاشي [9].

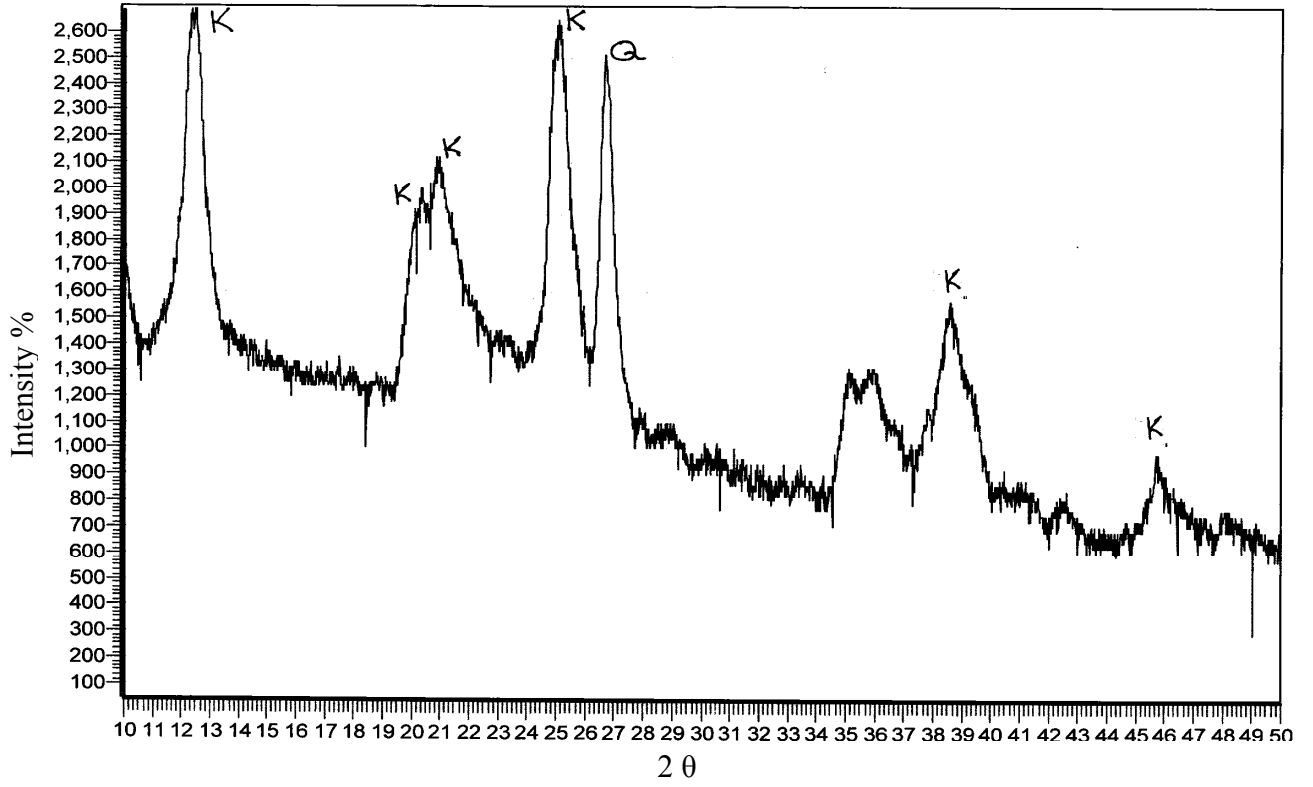
التقلص الحجمي (%)	الكثافة الحجمية (g/cm ³)	المسامية الظاهرة (%)	امتصاصية الماء (%)	صلادة فيكرز (GPa)	مقاومة الكسر (MPa)
3 – 1	2.4 – 2.2	12 – 5	8 – 3	6	22 – 15

جدول (2) يوضح التحليل الكيميائي لكاولين دويخلة ولرمل زجاج ارضية.

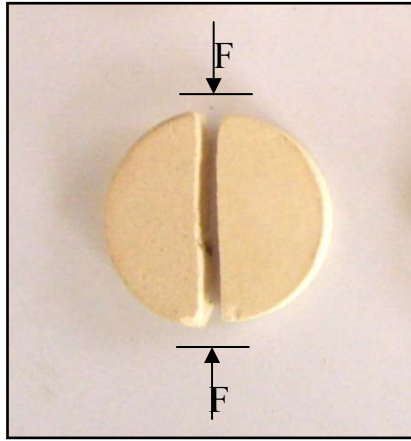
%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	L.O.I
كاولين دويخلة	51.16	33.32	1.17	0.4	0.41	0.41	0.23	12.9
رمل الزجاج	98.4	0.4	0.05	-	-	0.3	0.3	0.55

جدول (3) نتائج الفحوصات الفيزيائية والميكانيكية للنماذج البورسلينية المنتجة.

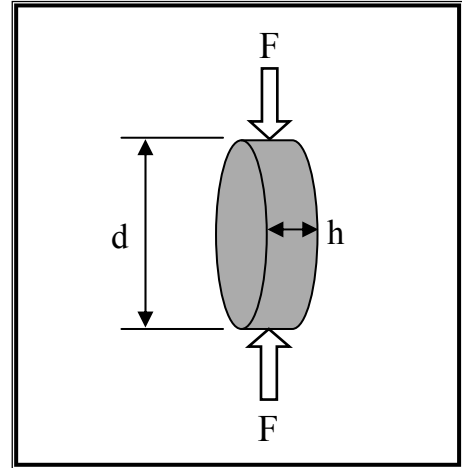
رقم العينة	ضغط الكبس (MPa)	درجة حرارة التلبد (°C)	التقلص الحجمي (%)	الكثافة الحجمية (g/cm ³)	المسامية الظاهرة (%)	امتصاصية الماء (%)	صلادة فيكرز (GPa)	مقاومة الكسر (MPa)
1	25	1100	1.092	1.898	26.378	14.211	4.870	6.681
2		1150	1.588	1.912	25.465	13.447	4.910	8.337
3		1200	1.618	1.920	23.231	12.090	5.820	11.127
4		1250	3.476	2.002	17.668	8.860	6.805	13.986
5		1300	2.976	1.973	12.293	6.230	8.475	10.763
6	1250	15	2.965	1.920	22.180	11.550	5.030	11.492
7		20	3.463	1.947	20.974	10.769	5.890	11.637
8		30	3.571	1.998	18.146	9.083	6.705	13.565
9		35	2.580	1.980	19.039	9.813	6.405	13.601



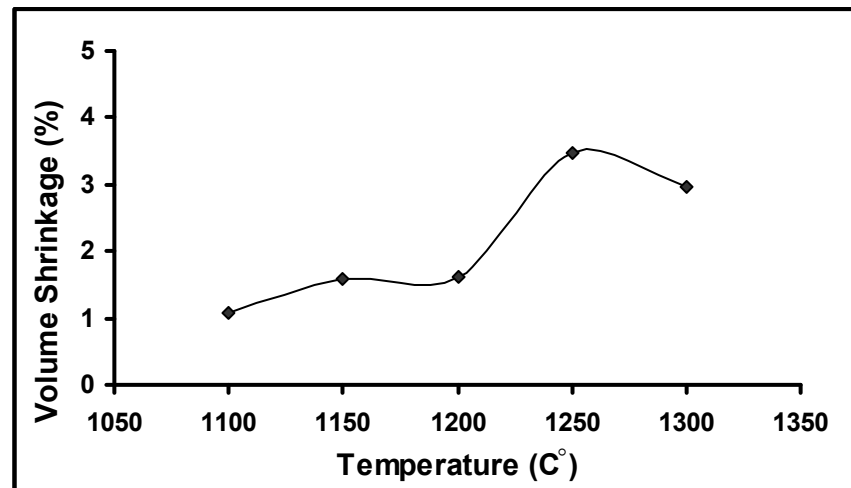
التحليل المعدني لمادة كاؤولين دويخلة. (XRD) الشكل (1) يوضح حيود الاشعة السينية



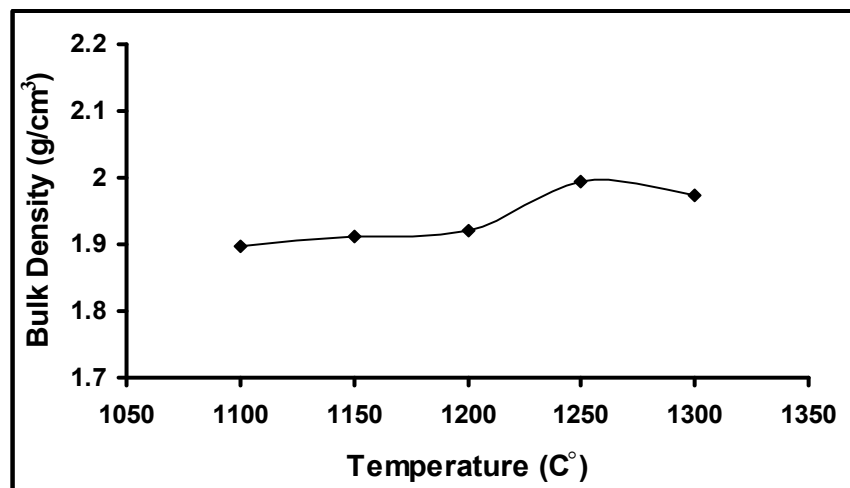
شكل (3) يوضح كيفية تكسر العينات عند قياس مقاومة الكسر.



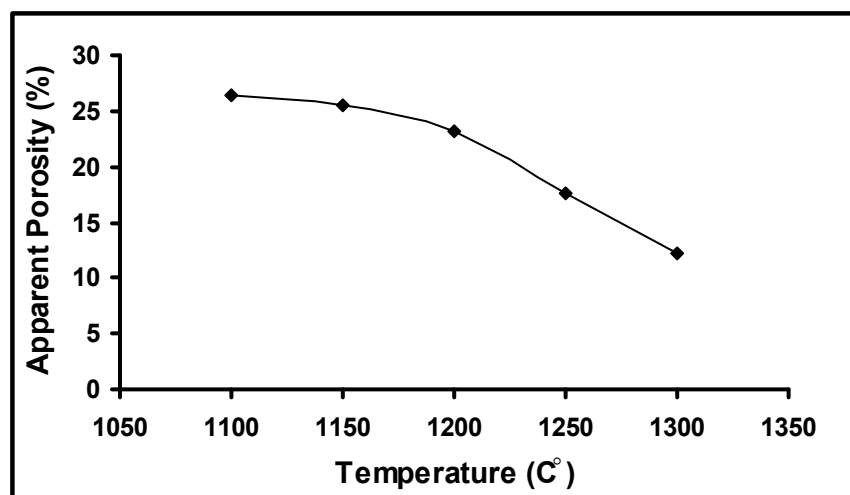
شكل (2) يوضح تحميل العينة أثناء اختبار الانضغاط القطري.



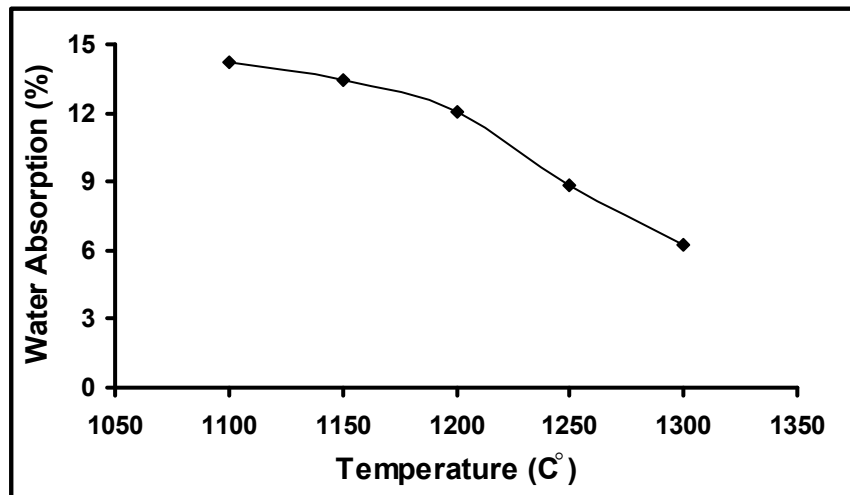
شكل (4) يوضح تغير التقلص الحجمي مع درجة حرارة التلبيد عند ضغط كبس 25MPa.



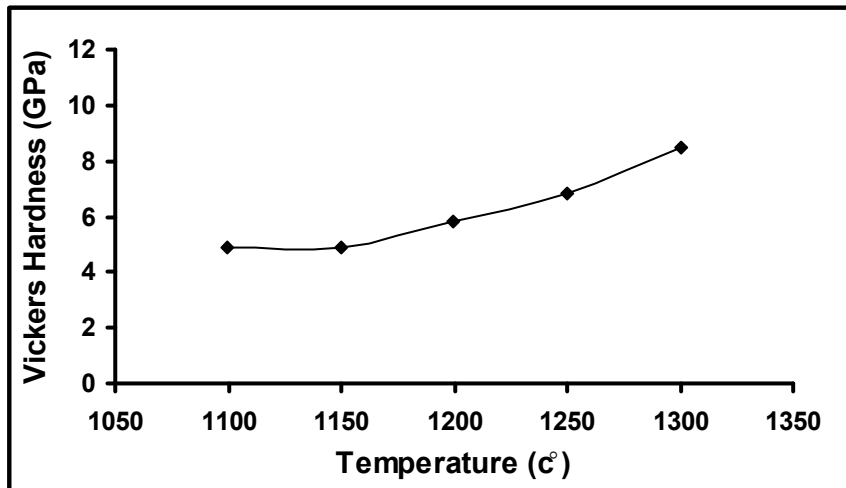
شكل (5) يوضح تغير الكثافة الحجمية مع درجة حرارة التلبيد عند ضغط كبس 25MPa.



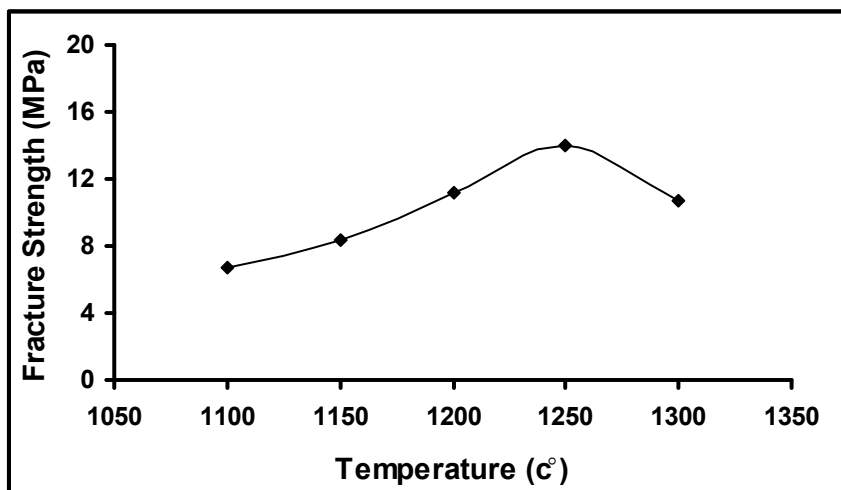
شكل (6) يوضح تغير المسامية الظاهرية مع درجة حرارة التلبيد عند ضغط كبس 25MPa.



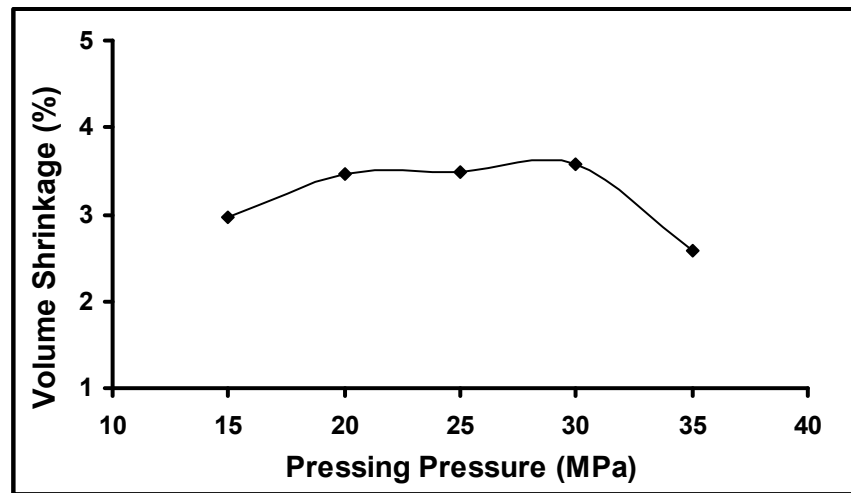
شكل (7) يوضح تغير امتصاصية الماء مع درجة حرارة التليد عند ضغط كبس 25MPa.



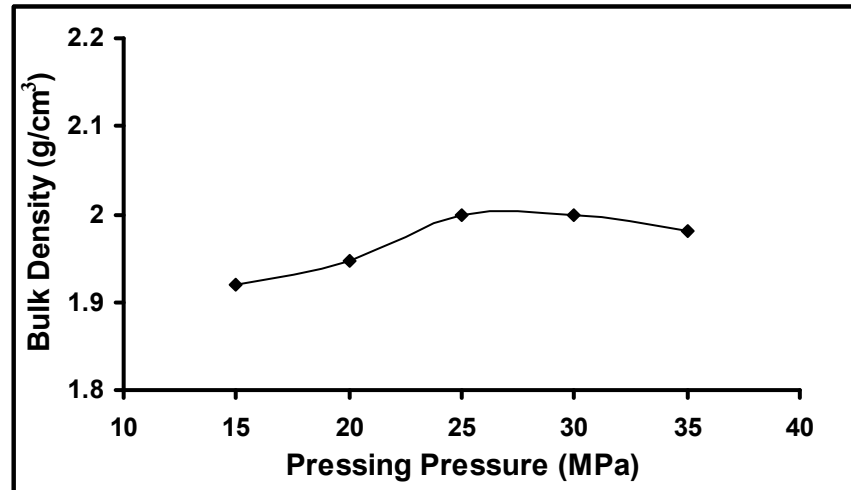
شكل (8) يوضح صلادة فيكرز مع درجة حرارة التليد عند ضغط كبس 25MPa.



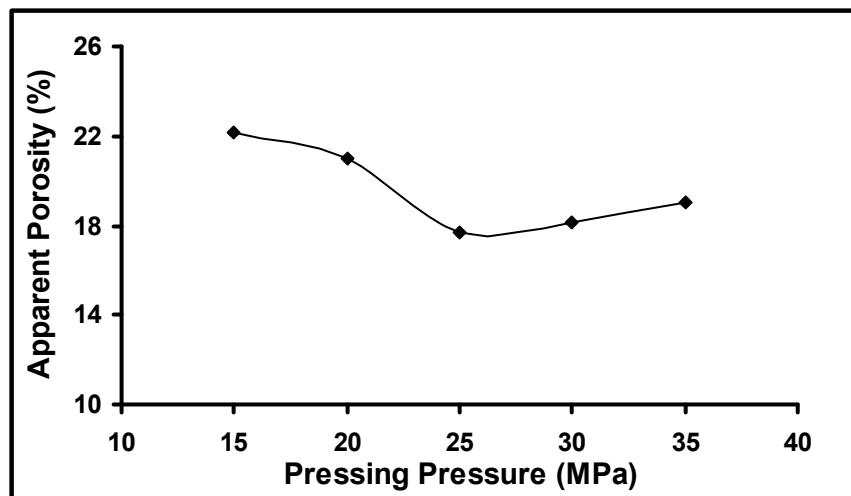
شكل (9) يوضح تغير مقاومة الكسر مع درجة حرارة التليد عند ضغط كبس 25MPa.



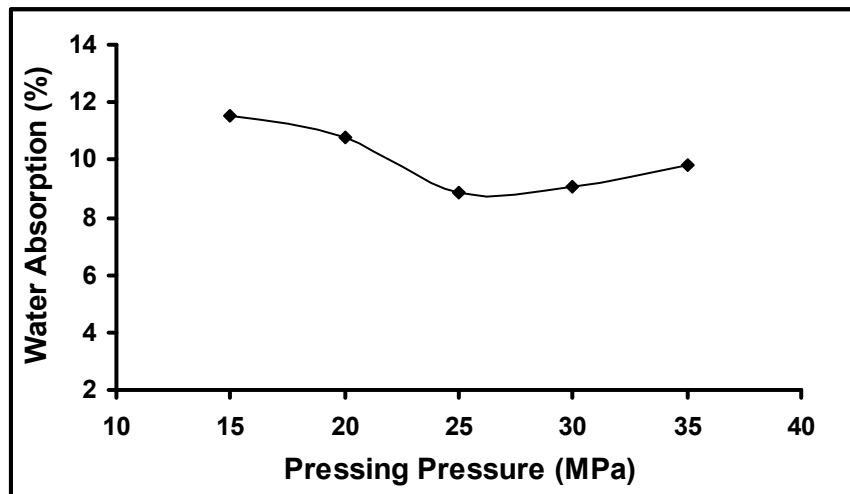
شكل (10) يوضح تغير التقلص الحجمي مع ضغط الكبس عند درجة حرارة تلييد 1250°C .



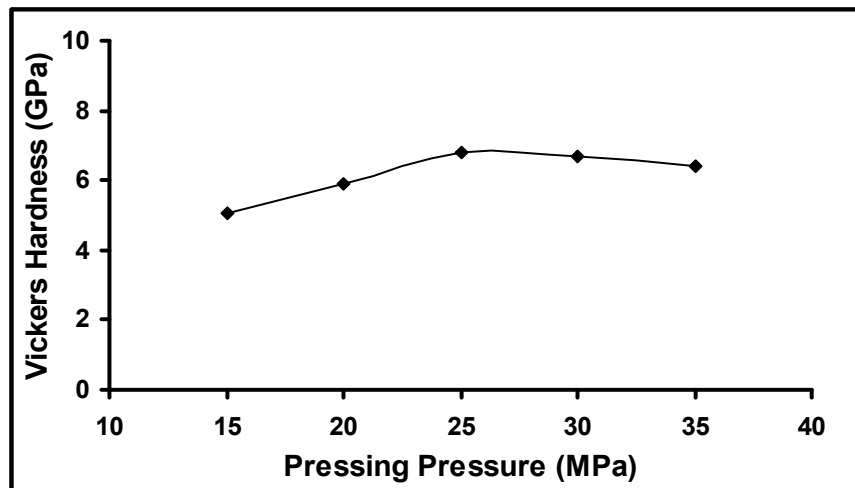
شكل (11) يوضح تغير الكثافة الحجمية مع ضغط الكبس عند درجة حرارة تلييد 1250°C .



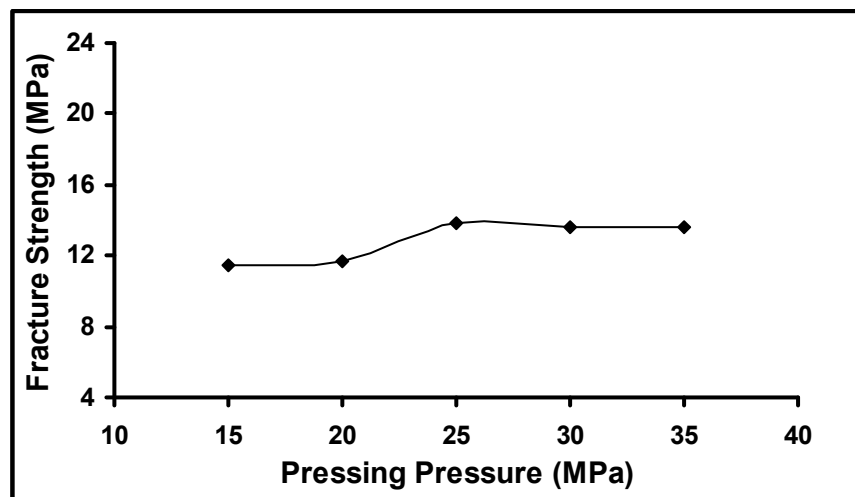
شكل (12) يوضح المسامية الظاهرية مع ضغط الكبس عند درجة حرارة تلييد 1250°C .



شكل (13) يوضح تغير امتصاصية الماء مع ضغط الكبس عند درجة حرارة تلييد 1250°C .



شكل (14) يوضح صلادة فيكرز مع ضغط الكبس عند درجة حرارة تلييد 1250°C .



شكل (15) يوضح تغير مقاومة الكسر مع ضغط الكبس عند درجة حرارة تلييد 1250°C .