------ المجلة العراقية لعلوم الأرض، المجلد ٤، العدد ٢، ص ٢٠-٣٩، 2004 ------

إنتاج كرات الطحن السيراميكية بطريقة التشكيل البارد

خلدون صبحي البصام   رحاب صباح الدوري   سلامة جلوب رشيد

الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين

بغداد

(تاريخ الاستلام 2001/10/30 ، تاريخ القبول 2002/5/22)

الملخص

يتناول هذا البحث إمكانية تحضير كرات طحن سيراميكية من خلطات مختلفة وباعتماد التشكيل البارد. استعملت المواد الآتية كمواد مثقلة: حطام الطابوق الزركوني، ركاز الفوسفات، ركاز السيليستايت وزجاج الرصاص، في حين اعتمد الكاؤولين لتحقيق اللدونة المطلوبة في التشكيل والفلدسبار كمادة مساعدة على التلبيد.

تم طحن المواد بنعومة (-75) µm واجراء التشكيل يدويا وفي تجارب محددة بالكبس الهيدروليكي للمقارنة وجففت العينات بدرجة 120م لمدة 24-48 ساعة وحرقت بدرجات حرارة مختلفة تراوحت بين 1000-1300م وتم قياس التقلص الحجمي والنقصان في الوزن بعد الحرق وكذلك قياس الكثافة والوزن النوعي والمسامية وامتصاص الماء ومقاومة الانضغاط في الاجسام المحروقة لكافة الخلطات.

بينت النتائج ان الخلطة الافضل هي 65 % حطام الطابوق الزركوني و 20% كاؤولين و 15% فلدسبار بوتاسي محروقة بدرجة 1300م ولفترة انضاج حراري 6 ساعات حيث حققت الكرات المنتجة بهذه الطريقة كثافة حجمية تراوحت بين 2.65-2.86 غم/سم^3 (حسب حجم الكرة) ومسامية 0.14-0.54% وامتصاص الماء 0.05-0.21% ومقاومة انضغاط 1350 MN/m^2 وكان التقلص الحجمي بعد الحرق 14-15% والفقدان بالوزن بين التجفيف والحرق 2.5-4.5%. هذه المواصفات افضل او مقاربة للكرات المستوردة المحضرة بالتشكيل البارد غير انها اقل من تلك المحضرة بطريقة الصب من صهير الالومينا في خاصية الكثافة ومقاومة الانضغاط فقط. بينت التجارب عدم وجود افضلية للكبس الهيدروليكي في التشكيل على التشكيل اليدوي في زيادة الكثافة الحجمية في حين ان زيادة وقت الانضاج الحراري عمل على زيادة الكثافة.

Synthesis of Ceramic Milling Balls by Cold Forming

Khaldon S. Al-Bassam **Rihab S. Al-Duri** **Salama Ch. Rashid**
State Company of Geological Survey and Mining
Baghdad

ABSTRACT

This research work is concerned with testing several raw materials and solid industrial waste to produce ceramic milling balls by cold forming. The following materials have been tested as density promotors: Zirconia bricks (waste), phosphate concentrate, celestite concentrate and Pb-glass. Kaolin was used to provide the required plasticity for forming and feldspar as sintering agent.

The balls were formed by hand and in a few tests by hydraulic pressure for comparison. The samples were dried for 24-48 hrs (120˚C) and fired under various temperatures ranging between 1000˚C and 1300˚C. Several parameters were determined including volume shrinkage, weight loss, bulk density, specific gravity, water absorption and compressive strength.

The results showed that the best specifications were achieved in the balls made form 65% Zr-bricks (waste), 20% kaolin and 15% K-feldspar, fired at 1300˚C for 6 hrs soaking time. These balls had bulk density of 2.65-2.86 gm/cm^3, porosity 0.14-0.54%, water absorption 0.05-0.21% and compressive strength 1350 MN/m^2. Volume shrinkage after firing was 14-15% and weight loss 2.5-4.0%.

These specifications are better than those of the balls formed by cold process and imported to Iraq. Whereas the imported balls formed by melt-casting of alumina show higher density and higher compressive strength. The present results also showed that forming under hydraulic pressure does not improve the density of the balls after firing whereas longer soaking time had significant impact in increasing the bulk density and improving the compressive strength, both of which reflect better sintering.

المقدمة

تستعمل الكرات السيراميكية في طحن المواد الاولية المختلفة في مطاحن خاصة تحمل اسمها (Ceramic ball mills) وتتوفر في هذه الكرات مواصفات خاصة لكي تؤدي عملها بشكل صحيح وبكفاءة عالية. اهم هذه المواصفات الكثافة العالية والمسامية القليلة ومقاومة الاحتكاك فضلا عن ضرورة صنعها من مواد لا تسبب تلوثا للمواد المطحونة.

الاستعمال الاساسي لهذه الكرات في العراق هو طحن المواد الاولية في صناعة السيراميك في الشركة العامة لصناعة الزجاج والسيراميك وكذلك في الصناعات الاخرى التي تعتمد على مواد اولية مشابهة. تستورد الكرات السيراميكية من مناشئ مختلفة ولايتم انتاجها في القطر. النوعيات عالية الجودة من هذه الكرات يتم صنعها من الالومينا المصهورة مع مساعدات انصهار بطريقة الصب ولا تتوفر مثل هذه التقنية التي تحتاج الى افران صهر ذات درجات حرارة عالية جدا في داخل القطر.

يهدف هذا البحث الى دراسة انتاج كرات سيراميكية ذات مواصفات جيدة لاغراض الطحن من مواد اولية متوفرة محليا او يمكن توفيرها في المستقبل القريب وبالاعتماد على اسلوب التشكيل البارد الرطب او الكبس شبه الجاف كبديل عن طريق الصب لصهير الالومينا واختبار الخلطات التي تحقق افضل المواصفات الفيزيائية من خلال تجارب مختبرية.

على الرغم من ان البحوث والدراسات في موضوع السيراميك قد تزايدت بشكل كبير في الجامعات العراقية والمؤسسات البحثية الصناعية غير ان الدراسة الوحيدة المنجزة في مجال انتاج كرات الطحن السيراميكية تمت في مركز بحوث البناء (القس وآخرون، 1999) حيث تم تحضير كرات بورسيلينية من الكاؤولين ورمل الزجاج والفلدسبار (المستورد) وقد حققت الكرات المنتجة من هذه الخلطة كثافة حجمية 2.196 gm/cm^3 وقوة شد انشطارية ١٣٠ KN ونسبة امتصاص الماء 0.48 % وتقلص حجمي بعد الحرق 0.24%. اعتمدت المعلومات المتوفرة من الدراسات المحلية السابقة في مجال تحضير الاجسام البورسيلينية في اختيار ظروف اجراء التجارب الحالية (البصام وآخرون، 1999 والبصام وآخرون، 2000) فضلا عن بعض الدراسات والبحوث العالمية في مجال السيراميك (Maity and Sarker, 1995; Lepkova and Pavlova, 1998). وقد تم الاستفادة من التجارب السابقة في انتاج الاجسام البورسيلينية (البصام وآخرون، 1999) في تحديد درجات الحرق ووقت الانضاج، في حين تمت الاستفادة من المراجع الاجنبية في تحديد النسبة الدنيا من الكاؤولين اللازمة للتشكيل اليدوي فضلا عن الرطوبة اللازمة لهذا الغرض وتصرف المواد المخلوطة بعد الحرق. وقد ساهمت التجارب الاولية في تقويم مسار التجارب اللاحقة في الدراسات الحالية للوصول الى الظروف المثلى ضمن الامكانات المتاحة في مختبرات الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين.

اسلوب البحث

اعتمد هذا البحث على مبدأ ضرورة ان تحتوي الخلطة على جزء اساسي هو الجزء الثقيل وجزء آخر يوفر اللدونة الكافية للتشكيل وجزء آخر يقلل من درجة حرارة الانصهار او التلبيد عند الحرق فضلا عن مبدأ ان تكون المواد المستعملة متوفرة داخل القطر من الخامات العراقية او المخلفات الصناعية.

على هذا الاساس تم اختيار الخامات المثقلة الآتية:

- حطام الطابوق الزركوني وهو نفايات صناعية تطرح من الشركة العامة لصناعة الزجاج والسيراميك عند تبديل طابوق تبطين الافران وتوجد كميات مكدسة منه ويتكون بشكل اساسي من الزركون مع القليل من الالومينا.
- ركاز الفوسفات الناتج من كلسنة وغسل خام الفوسفات في الشركة العامة للفوسفات ويتكون من معدن الاباتيت بشكل رئيسي.

- ركاز السيلستايت الناتج من تركيز السيلستايت من رمال تكوين الدبدبة في منطقة النجف وقد وصلت تجارب التركيز الى مراحل متقدمة في الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين (حمودي وآخرون، 2000).
- زجاج الرصاص المحضر محليا من صهر رمال السيليكا مع اوكسيد الرصاص الاحمر ومواد صاهرة (كلية الفنون الجميلة).
- اما المادة التي توفر اللدونة اللازمة للتشكيل فقد تم توفيرها من الكاؤولين الابيض من موقع دويخلة في الصحراء الغربية لهذا الغرض في حين اعتمد على الفلدسبار البوتاسي والصوديومي المستوردين كمساعدات على الصهر خلال الحرق علما ان تجارب تركيز الفلدسبار العراقي من رمال تكوين الدبدبة قد قطعت شوطا كبيرا في الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين اعتمادا على احتياطات مثبتة (العجيل وآخرون، 1999).

اعتمد في تحضير الخلطات ان تكون الخامات المثقلة هي الاساس مع اقل كمية ممكنة من الكاؤولين لتحقيق اللدونة الملائمة والفلدسبار كمادة مساعدة على الانصهار. تم طحن المواد الاولية بنعومة (-75)μm وخلطها حسب النسب المخططة وتحديد كمية الرطوبة اللازمة للتشكيل اليدوي او بالكبس الهيدروليكي. وقد تم تشكيل الكرات في معظم التجارب يدويا مع تشكيل الخلطة رقم (9) بالكبس لاغراض المقارنة وقد تم تجفيف كافة العينات في فرن كهربائي قبل الحرق.

وضع برنامج الحرق على اساس المعرفة المتوفرة عن الخامات المستعملة وتم تعديل بعض المتغيرات مثل درجة الحرارة ووقت الانضاج على اساس النتائج المستحصلة. وتم قياس المواصفات الفيزيائية الاساسية للكرات بعد الحرق وهي الكثافة الحجمية، الوزن النوعي، المسامية، امتصاص الماء، مقاومة الانضغاط، الفقدان بالوزن، التقلص الحجمي، التغير في الكثافة قبل وبعد الحرق. بعد اختيار الخلطة الافضل اجريت تجارب اضافية لدراسة مقاومة الاحتكاك ومقدار التلوث الحاصل بسبب الطحن بالكرات المصنعة وكذلك المقارنة في المواصفات الفيزيائية الاساسية بين طريقة التشكيل اليدوي وطريقة الكبس الهيدروليكي. وقد تم تحليل المواد الاولية كيميائيا وتحليل الكرات المنتجة بعد الحرق للخلطة الافضل كما تم مقارنة المواصفات المتحققة مع مواصفات كرات مستوردة مختلفة ومع المواصفات المعتمدة للنوعيات عالية الجودة من هذه الكرات.

الاعمال المختبرية

تحضير المواد الاولية: تم الحصول على المواد الاولية لهذه الدراسة من مصادر مختلفة ذكرت آنفا وجرى طحنها في مطحنة قرصية بنعومة (-75)μm باستثناء التجارب الاخيرة التي اجريت على الخلطة الافضل فقد تم طحنها في مطحنة سيراميكية (Ceramic ball mill) بالطريقة الرطبة. اخذت عينات من كافة المواد الاولية للتحليل الكيميائي ونتائجها مبينة في الجدول (١).

جدول 1: التحليل الكيميائي للمواد الأولية ومصادرها.

Wt%	Kaolin	Celestite	Apatite	Zirconia Bricks	K-feld	Na-feld
SiO_2	50.16	20.82	1.14	26.93	46.96	69.28
ZrO_2	n.a.	n.a.	n.a.	52.83	n.a.	n.a.
Fe_2O_3	1.40	0.69	0.33	0.60	0.24	0.28
Al_2O_3	32.14	1.06	<0.04	14.16	18.69	17.28
SrO	n.a.	35.00	n.a.	n.a.	n.a,	n.a.
CaO	0.37	0.30	55.59	4.90	0.56	0.98
MgO	0.11	0.32	0.71	0.03	0.03	0.11
Na_2O	0.27	0.17	0.55	1.90	5.89	9.80
K_2O	0.33	0.28	0.03	0.13	8.30	0.38
P_2O_5	n.a.	n.a.	29.5	n.a.	n.a.	n.a.
SO_3	n.a.	29.0	2.30	n.a.	n.a.	n.a.
LOI	12.80	1.26	5.46	Nil	0.42	0.08

Kaolin: كاؤولين دويخلة الابيض.

Celestite: ركاز السيلستايت (حوالي 65% سيلستايت) من منطقة النجف (الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين).

Apatite: ركاز الفوسفات (الشركة العامة للفوسفات)،

Zirconia Bricks: طابوق تبطين افران مستهلك يتكون من الزركون $ZrSiO_4$ والالومينا Al_2O_3 (الشركة العامة لصناعة الزجاج والسيراميك).

K-feld: فلدسبار بوتاسي مستورد (الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين).

Na-feld: فلدسبار صوديومي مستورد (الشركة العامة لصناعة الزجاج والسيراميك).

n.a.: لم يتم تحليله.

ملاحظة: لم يمكن تحليل عينة زجاج الرصاص لأسباب تقنية تتعلق بصعوبة الاذابة.

تحضير الخلطات: اعدت الخلطات حسب البرنامج المعد لهذا البحث انطلاقا من الاسس المذكورة في اسلوب العمل والمبينة تفاصيلها في الجدول (2). تم وزن المواد الاولية حسب النسب المقررة لها واعتمد في المرحلة الاولى من العمل تحضير 100 غم من كل خلطة وجرى خلط المواد ميكانيكيا بالطريقة الرطبة ومجانستها بالطحن البسيط وتركت كل خلطة لمدة 24 ساعة قبل سحب الماء الزائد منها لغرض التشكيل. في المرحلة اللاحقة وعند العمل على الخلطة الافضل جرى تحضير كمية اكبر من الخلطة 1كغم لتحضير كرات باحجام مختلفة. تم سحب الماء من الخلطة بواسطة الترشيح الفراغي.

تشكيل الكرات: اعتمد على طريقة التشكيل اليدوي في تحضير الكرات في معظم مراحل هذه الدراسة لعدم توفر قالب مناسب لذلك وتراوحت النسبة المثلى من الماء لتنفيذ التشكيل اليدوي بين 15% و 20% وزنا. وقد اجريت تجربة واحدة لتشكيل اشكال اسطوانية باستعمال الكبس الهيدروليكي بضغط 100-150 KN لغرض مقارنة المواصفات الفيزيائية للاجسام المشكلة يدويا مع تلك المشكلة بالكبس، وكانت النسبة المثلى للماء في الكبس الهيدروليكي 2.5%.

جدول 2: تركيب الخلطات وظروف الحرق وطريقة التشكيل والحجم قبل الحرق.

التجربة	المواد ونسب الخلط	درجة حرارة الحرق C°	وقت الانضاج (hrs)	طريقة التشكيل	الحجم (سم^3)
1	50% طابوق زركوني 30% كاؤولين 20% فادسبار بوتاسي	1300	4	يدوي	11.49
2	65% طابوق زركوني 20% كاؤولين 15% فادسبار بوتاسي	1300	4	يدوي	a: 13.71 b: 8.10
3	65% طابوق زركوني 20% كاؤولين 15% فادسبار بوتاسي	1000	4	يدوي	11.48
4	65% طابوق زركوني 20% كاؤولين 15% فادسبار بوتاسي	1200	4	يدوي	18.80
5	65% ركاز الفوسفات 20% كاؤولين 15% فادسبار بوتاسي	1100	4	يدوي	19.48
6	65% ركاز السيلستايت 20% كاؤولين 15% فادسبار بوتاسي	1200	4	يدوي	14.13
7	65% طابوق زركوني 20% كاؤولين 15% زجاج الرصاص	1300	4	يدوي	12.21
8	65% طابوق زركوني 20% كاؤولين 15% فادسبار بوتاسي	1300	6	يدوي	a: 88.01 b: 34.82 c: 10.12 d: 8.29
9	65% طابوق زركوني 20% كاؤولين 15% فادسبار بوتاسي	1300	6	كبس هيدروليكي	a: 34.99 b: 39.80

تم تحضير ثلاث كرات من كل خلطة في المراحل الاولى زنة الواحدة حوالي 40-30 غـم حسـب نسبة الماء عند التشكيل وفي المراحل المتأخرة من العمل تم تشكيل كرات بأحجام مختلفـة (جـدول 2)

واوزان تراوحت بين 250-20 غم لدراسة التباين في المواصفات الفيزيائية ومقاومة الاحتكاك مع التبـاين في الحجم والوزن فضلا عن دراسة كفاءة التلبيد مع تباين الحجم.

برامج الحرق: تم تجفيف العينات المحضرة في فرن كهربائي بدرجة 120م لمدة 48 ساعة، ثـم حرقـت كافة العينات المحضرة في هذه الدراسة باستعمال فرن كهربائي مبرمج بمعـدل رفـع درجـة الحـرارة ١ C/min ° وتباين وقت الانضاج الحراري بين 4 hrs,6 hrs (جدول 2) وتركت العينات لتبرد تـدريجيا في الفرن المغلق بعد انتهاء الحرق. استغرقت عملية الحرق من بدايتها الى نهايتها حوالي 20-24 hrs.

الفحوصات الفيزيائية والهندسية: اجريت الفحوصات الآتية إلى الاجسام المشكلة باعتمـاد المواصـفات العالمية (ASTM) والمثبتـة فـي سـياقات عمـل الشـركة العامـة للمسـح الجيولـوجي والتعـدين (Al-Haimus, 1994):

- قياس القطر قبل وبعد الحرق باستعمال الفيرنير (Vernier).
- الوزن قبل وبعد الحرق.
- الوزن النوعي، الكثافة الحجمية والمسامية وامتصاصية الماء بعد الحرق.
- مقاومة الانضغاط بعد الحرق. وقد اعتمدت طريقة الثقل النقطي (Point load) عند فحـص الكـرات وتحويل القيمة الى مقاومة الانضغاط باستهمال معادلة خاصة.
- مقاومة الاحتكاك او السحج (Abrasion test) وتم ذلك بطحن رمل من منطقـة كـربلاء باسـتعمال مطحنة سيراميكية دوارة سعة (2 لتر) بسرعة (100 rpm) مع الماء والكرات السيراميكية المحضـرة في هذه الدراسة بأربعة احجام مختلفة وبنسبة رمال: ماء: كرات = 1: 2: 1 وزنا. وتم وزن الكـرات وهي جافة قبل الاستعمال وبعد كل 6 ساعات ولغاية 24 ساعة لتحديد التآكل الحاصل بالكرات نتيجـة الطحن.
- تحديد نسبة التلوث الناتج من استعمال الكرات المحضرة في الطحن، حيـث جـرى تحليـل الرمـال المطحونة بالكرات السيراميكية المحضرة في التجارب الحالية بعد 24 ساعة طحن لعنصر الزركونيوم واخذت العينات من الجزء (75-)µm و (75+) µm وقورنت مع تركيز الزركونيوم في الرمال قبـل الطحن.
- فحص العينات المحضرة بحيود الاشعة السينية (XRD) وتحديد الاطوار المعدنية المكونة بعد الحـرق (جدول 3).

النتائج

المواصفات الفيزيائية: تباينت نتائج الفحوصات الفيزيائية للكرات السيراميكية المصنعة في هذه الدراسة، فقد تباينت الكثافة الحجمية بين 1.63 و 2.89 غم/سم^3، وتحققت اعلى الكثافات في الخلطات التي تحتـوي

على الزركونيا وأقلها في خلطات ركاز الفوسفات، اما المسامية فقد تراوحت بـين 0..14% و 27.13% وتحققت اقل مسامية في خلطات الزركونيا المشكلة يدويا واعلى مسامية في خلطات الفوسفات. تبعا لـ ذلك تراوحت قيم امتصاص الماء بين 0.05% في الاولى و 15.19% في الثانية (جدول 4).

جدول 3: الاطوار المعدنية المتكونة بعد الحرق (XRD).

العينة 1	سيليكات الزركونيوم وسيليكات البوتاسيوم والالمنيوم.
العينة 2	سيليكات البوتاسيوم والالمنيوم وسيليكات الزركونيوم.
العينة 3	سيليكات الصوديوم والالنيوم وسيليكات الرصاص.
العينة 4	اباتايت ومولايت (شحيح).
العينة 5	اباتايت ومولايت (شحيح).
العينة 6	سيليكات السترونتيوم والالمنيوم وسيليكات البوتاسيوم والالمنيوم.
العينة 7	سيليكات الزركونيوم وسيليكات البوتاسيوم والالمنيوم.
العينة 8	سيليكات الزركونيوم وسيليكات البوتاسيوم والالمنيوم.
العينة 9	سيليكات الزركونيوم وسيليكات البوتاسيوم والالمنيوم.
العينة F1	سيليكات المغنيسيوم، كريستوبالايت وسيليكات الزركونيوم.

جدول 4: المواصفات الفيزيائية للاجسام المنتجة في الدراسة الحالية والمستوردة.

رقم التجربة	**الوزن النوعي**	**الكثافة الحجمية gm/cm^3**	**المسامية %**	**امتصاص الماء %**	**مقاومة الانضغاط MN/m^2**
1	2.67	2.65	0.48	0.18	228.0
2a	2.74	2.72	0.35	0.13	283.2
2b	2.75	2.75	0.02	0.10	520.8
4	1.71	1.63	4.74	2.91	180.0
5	2.45	1.79	27.13	15.19	21.6
6	2.58	2.42	6.22	2.57	168.0
7	2.68	2.65	1.17	0.44	283.2
8a	2.66	2.65	0.54	0.21	n.d.
8b	2.72	2.71	0.22	0.08	n.d.
8c	2.83	2.83	0.14	0.05	n.d.
8d	2.87	2.86	0.30	0.10	1350
9a	2.93	2.88	1.73	0.60	94.8
9b	2.93	2.89	1.31	0.46	92.0
F1	2.61	2.59	0.66	0.26	720.0
F2	3.67	3.66	0.24	0.07	1843.2

F1: كرة سيراميكية وزنها 30 غم مصنوعة بالكبس شبه الجاف/مستوردة/المسح الجيولولوجي والتعدين.

F2: كرة سيراميكية وزنها 30 غم مصنوعة من الاولومينـا المصـهورة/مسـتوردة/الشـركة العامـة لصـناعة الزجـاج والسيراميك.

n.d.: لم يتم قياسها.

لم يتم اجراء قياسات لناتج حرق الخلطة (3) لتشوه الجسم بعد الحرق.

تراوحت مقاومة الانضغاط بين (21.6 و 1350) MN/m^2 وحققت خلطات الزركونيا المشكلة يدويا اعلى مقاومة انضغاط بعد الحرق بدرجة 1300م لفترة انضاج 6 ساعات، بالمقارنة مع اقل مقاومة انضغاط في خلطة ركاز الفوسفات المحروقة بدرجة حرارة 1100م لمدة 4 ساعات.

تباينت نتائج الكرات المستوردة في المواصفات الفيزيائية، فقد تميزت الكرات المصنوعة بطريقة الصب من صهير الالومينا (العينة F2) باعلى المواصفات من ناحية الكثافة الحجمية ومقاومة الانضغاط وتقاربت بقية المواصفات مع مواصفات الكرات السيراميكية المحضرة من خلطة الزركونيا في الدراسة الحالية. في حين كانت مواصفات الكرات المستوردة المصنوعة بالتشكيل البارد (العينة F1) اقل من مواصفات خلطة الزركونيا المحروقة بدرجة 1300م لمدة 6 ساعات والمقارنة في النتائج هي بين كرات سيراميكية ذات اوزان متقاربة. حققت خلطات الزركونيا زيادات كبيرة نسبيا في الكثافة الحجمية بعد الحرق حوالي 14% كمعدل في الكرات المشكلة يدويا وحوالي 10% في الاجسام المحضرة بطريقة الكبس، في حين كانت الزيادة في الكثافة الحجمية بعد الحرق اقل من 10% في باقي الخلطات (جدول 5).

جدول 5: الفرق في قيمة الكثافة الحجمية بعد الحرق.

رقم التجربة	الكثافة بعد التجفيف gm/cm^3	الكثافة بعد الحرق gm/cm^3	الفرق %
1	2.27	2.65	+16.74
2^a	2.34	2.72	+16.24
2^b	2.45	2.75	+12.24
3	2.45	n.d.	n.d. (تشوه الجسم بعد الحرق)
4	1.69	1.63	-3.55
5	1.66	1.79	+7.83
6	2.26	2.42	+7.08
7	2.59	2.65	+2.32
8^a	2.32	2.65	+14.22
8^b	2.37	2.71	+14.35
8^c	2.51	2.83	+12.75
8^d	2.41	2.86	+18.67
9^a	2.62	2.88	+9.92
9^b	2.59	2.89	+11.58

التقلص الحجمي والوزني: تراوحت النسبة المئوية للتقلص الحجمي للكرات المصنعة بين 4.63% و 18.19% وكانت اعلى نسبة تقلص في خلطة السيلستايت في حين تميزت خلطة ركاز الفوسفات المحروقة بدرجة 1100م وخلطة الزركونيا مع زجاج الرصاص باقل قدر من التقلص الحجمي (جدول 6). تباين الفقدان بالوزن بين التشكيل والتجفيف من 4.88% الى 25.36% تبعا لنسبة الماء في الخلطة عند التشكيل

وبطبيعة الحال كانت الاجسام المشكلة بطريقة الكبس اقلها فقدانا بالوزن بسبب كمية المـاء القليلـة عنـد التشكيل (جدول 7).

جدول 6: التقلص الحجمي بعد الحرق.

رقم التجربة	الحجم بعد التجفيف cm^3	الحجم بعد الحرق cm^3	نسبة التقلص الحجمي %
1	11.49	9.51	17.23
2[a]	13.71	11.54	15.83
2[b]	8.10	7.11	12.22
3	11.48	n.d.	n.d. (تشوه الجسم بعد الحرق)
4	18.80	17.93	4.63
5	19.48	16.66	14.48
6	14.13	11.56	18.19
7	12.21	11.53	5.57
8[a]	88.01	75.23	14.52
8[b]	34.82	29.65	14.85
8[c]	10.12	8.64	14.62
8[d]	8.29	7.11	14.23
9[a]	34.99	30.94	11.57
9[b]	39.80	34.57	13.14

جدول 7: الفقدان بالوزن بين التشكيل والتجفيف والحرق.

رقم التجربة	بعد التشكيل gm	بعد التجفيف gm	بعد الحرق gm	الفقدان بالوزن بعد التجفيف %	الفقدان بالوزن بعد الحرق %
1	22.50	26.03	25.19	19.91	3.23
2[a]	40.07	32.13	31.38	19.82	2.33
2[b]	n.d.	19.84	19.54	n.d.	1.51
3	32.60	28.12	27.36	13.74	2.70
4	38.90	31.75	29.23	18.38	7.93
5	42.56	32.43	29.82	23.80	8.05
6	42.70	31.87	27.98	25.36	12.21
7	n.d.	31.58	30.57	n.d.	3.20
8[a]	237.3	204.55	199.35	13.80	2.54
8[b]	94.6	82.62	80.35	12.66	2.75
8[c]	28.3	25.34	24.44	10.46	3.55
8[d]	22.1	20.00	19.20	9.50	4.00
9[a]	96.4	91.70	89.10	4.88	2.84
9[b]	n.d.	103.10	99.90	n.d.	3.10

تراوح الفقدان بالوزن بعد الحرق بين 1.51% و 12.21% وتميزت الكرات المصنوعة من ركـاز الفوسفات وركاز السيلستايت باعلى النسب في هذا المجال في حين تراوحت نسبة الفقدان بين 2% و 4%

بشكل عام في باقي الخلطات، وتشابهت العينات المحضرة بطريقة الكبس شبه الجاف مع تلـك المشـكلة يدويا (جدول 7).

الفقدان في وزن الكرات والتلوث نتيجة الاستعمال في الطحن: تباينت نسبة الفقدان بالوزن بعد 24 ساعة طحن رطب لرمال كربلاء بين 0.24% و 0.52% وتناسبت هذه النسبة عكسيا مع وزن الكرات المستعملة والتي كانت من الخلطة المتكونة من زركونيا وكاؤولين وفلدسبار بوتاسي (التجربة 8) اما بالنسبة للتلوث الحاصل نتيجة الطحن فقد ازداد معدل تركيز عنصر الزركونيوم في الرمال المطحونة لمدة 24 ساعة من 0.035% الى 0.21% (في الجزء المطحون 75– µm) (جدول 8 و 9).

جدول 8: الفقدان بالوزن نتيجة الطحن (نواتج التجربة 8).

العينة	وزن الكرة قبل الطحن (gm)	بعد 6 ساعات (gm)	الفقدان %	بعد 12 ساعة (gm)	الفقدان %	بعد 18 ساعة (gm)	الفقدان %	بعد 24 ساعة (gm)	الفقدان %
8a	199.64	199.16	0.24	198.68	0.48	198.50	0.57	198.23	0.71
8b	80.79	80.63	0.20	80.43	0.45	80.24	0.68	80.06	0.90
8c	24.19	24.08	0.45	23.94	1.03	23.81	1.57	23.70	2.03
8d	19.14	19.06	0.42	18.٩٤	1.04	18.84	1.57	18.74	2.09

جدول 9: التلوث بعنصر الزركونيوم نتيجة الطحن (ppm Zr).

	تركيز الزركون في الرمال قبل الطحن	تركيز الزركون في الرمال بعد 24 ساعة طحن (-75µm)	تركيز الزركون في الرمال بعد 24 ساعة طحن (+75µm)
	326	2016	
	344	2015	
	383	2256	
المعدل	351	2096	97

المنافشة وتقييم النتائج

تباينت نتائج حرق الكرات المحضرة في هذه الدراسة بشكل كبير ويعزى هذا التباين الى عدد مـن الاسباب هي نوع المواد الداخلة في الخلطة وكمياتها (نسبها المئوية)، درجة حرارة الحرق، وقت الانضاج الحراري، كتلة الكرات وبشكل اقل طريقة التشكيل. تبين نتائج الفحوصات الفيزيائية والهندسية ان العامل الاساسي في تباين المواصفات هو المواد الاولية الداخلة في الخلطة وتصرفها اثناء الحرق ومدى انحراف تركيبة خلطة المواد عن متطلبات حصول تلبيد جيد او كامل بعد الحرق.

بينت النتائج ان الخلطات التي تحتوي على نسبة عالية من القلويات الارضية (Alkali earth) وهي الكالسيوم والسترونتيوم في خلطتي الفوسفات (تجربة 4 و 5) وخلطة السيلستايت (تجربة 6) حققت اقـل

الكثافات الحجمية وكانت الاكثر فقدانا للوزن بعد الحرق وامتازت بمسامية عالية وبالتالي نسبة امتصاص عالية للماء فضلا عن تميزها بمقاومة انضغاط واطئة نسبيا. ان كلا من الكالسيوم والسترونتيوم تعمل كعناصر صاهرة في درجات الجرارة الاعلى من 1200م وكما بينت ذلك التجارب السابقة (البصام وآخرون، 2000، 1999). ويتم معالجة ذلك باضافة سيليكا حرة الى الخلطة لاستيعاب القلويات الارضية خلال التفاعل الحراري بتكوين سيليكات الكالسيوم او السترونتيوم. وحيث ان اضافة السيليكا سيكون على حساب المادة المثقلة في الخلطة وبالتالي سيقلل من عامل الكثافة المطلوب في مواصفات هذه الكرات فقد استبعدت خلطتي الفوسفات والسيليستايت من التنافس لاختيار الخلطة الافضل في التجارب الحالية.

ان اضافة زجاج الرصاص كمثقل الى الخلطة (3) عمل على صهر الجسم المشكل حتى مع استعمال حرارة حرق واطئة هي 1000م ويعود ذلك الى وجود القلويات المساعدة على الانصهار وخاصة الصوديوم بوفرة في الزجاج المستعمل فضلا عن الفلدسبار الصوديومي المضاف الى الخلطة، وبالامكان الاستغناء عن الاخير عند استعمال زجاج الرصاص، وعليه اعدت الخلطة رقم (7) لتجربة ذلك حيث تم الاستغناء عن الفلدسبار واضيف زجاج الرصاص كمادة مساعدة على الانصهار (ومثقلة في نفس الوقت) الى الزركونيا (وهي مادة مثقلة ايضا) مع النسبة الدنيا من الكاؤولين اللازم للتشكيل اليدوي. وقد كانت نتائج هذه التجربة جيدة من كافة النواحي ومقاربة الى حد ما الى الخلطة المستعمل فيها الزركونيا مع الكاؤولين والفلدسبار (الخلطة 2). وحيث ان تحضير زجاج الرصاص يتطلب اضافة اوكسيد الرصاص الاحمر الى الزجاج (كلية الفنون الجميلة) وهذه المادة مستوردة فقد تم استبعاد هذه الخلطة من التجارب اللاحقة خاصة وان مواصفاتها ليست افضل من مواصفات خلطة الزركونيا في مجال الكثافة الحجمية والمسامية وامتصاص الماء (جدول 4).

تحققت افضل النتائج في خلطة الزركونيا (65%) والكاؤولين (20%) والفلدسبار البوتاسي (15%) من ناحية الكثافة الحجمية (2.7) غم / سم^3 والمسامية (0.5<%) وامتصاص الماء (0.2<%) ومقاومة الانضغاط (520-283 MN/m^2). وقد امكن تحسين هذه المواصفات بعد زيادة وقت الانضاج الحراري من 4 ساعات الى 6 ساعات (التجربة 8) حيث حصلت زيادة في الكثافة الحجمية (2.86) غم / سم^3 ونقصان في المسامية وامتصاص الماء ($0.3 \leq$ % و ≤ 0.1% على التوالي) وزيادة كبيرة في مقاومة الانضغاط (1350 MN/m^2) وهذه المقارنة في المواصفات هي لكرات ذات اوزان متقاربة (حوالي 20 غم).

يلاحظ من العلاقات الارتباطية ان مقاومة الانضغاط تتناسب طرديا مع الكثافة الحجمية (شكل 1) وعكسيا مع المسامية (شكل 2) وهي نتائج متوقعة وتعود الى الرص الجيد بسبب التلبيد الناتج من عملية الحرق والذي يقلل من الفراغات الداخلية (المسامية) ويزيد بالتالي من قيمة الكثافة فضلا عن زيادة متانة الجسم السيراميكي. هنالك عامل آخر له تأثير على الكثافة الحجمية للكرات السيراميكية بعد الحرق وهو الكتلة، حيث لوحظ ان قيمة الكثافة الحجمية تكون اعلى كلما قلت الكتلة المشكلة، أي ان الكرات الاصغر

لها كثافة حجمية اعلى من الكرات الاكبر (جدول 4 وشكل 3) ويعود ذلك بطبيعة الحال الـى ان كفـاءة التلبيد في الكرات الاصغر تكون افضل من الكرات الكبيرة حيث ان مركز الكرة فـي الكـرات الكبيـرة لايتأثر بالحرارة بنفس الدرجة كما في الجزء الخارجي وهذه الظاهرة اقل بطبيعة الحـال فـي الكـرات صغيرة الحجم.

شكل ١: علاقة الكثافة الحجمية مع قوة الانضغاط (كرات مشكلة يدوياً وباحجام متشابهة).

شكل ٢: علاقة المسامية مع قوة الانضغاط (كرات مشكلة يدوياً وباحجام متشابهة).

شكل ٣: علاقة الكثافة الحجمية مع كتلة الكرات السيراميكية (كرات مشكلة يدوياً – التجربة ٨).

ولنفس السبب لوحظ ان الفقدان بالوزن بين التشكيل والتجفيف بدرجة 120م يزداد مع زيادة كتلة او حجم الكرة (شكل 4) وذلك لصعوبة ازالة ماء التشكيل بكامله من الكرات الكبيرة.

شكل ٤: علاقة وزن الكرات السيراميكية مع الفقدان بالوزن بعد التجفيف وبعد الحرق.

يمكن معالجة هذه الظاهرة وفي الحالتين بزيادة وقت الانضاج الحراري خلال الحرق الى حوالي 9 ساعات وهو الوقت الاعتيادي للانضاج عند استعمال الانفاق الحرارية على المستوى المعملي فضلا عـن زيادة وقت التجفيف على الرغم من ان العامل الاخير لا يعتبر مشكلة او معوق في انتـاج الكـرات ذات الاحجام او الكتل الكبيرة. ويلاحظ ان الفقدان بالوزن بعد الحرق يقل مع زيادة كتلـة الكـرة المحروقـة (شكل 4) ويتعلق ذلك بكفاءة التلبيد وعلاقتها مع حجم الكرات المذكورة آنفا. امكن في الدراسـة الحاليـة تحديد اقل نسبة كاؤولين تحقق اللدونة المطلوبة للتشكيل اليدوي بـ 20% من وزن الخلطة كمـا ان اقـل نسبة رطوبة (ماء) في الخلطة اللازمة للتشكيل اليدوي هي 15% في حين يجب ان لا تزيد هـذه النسـبة عن 2.5% عند استعمال قالب الكبس الهيدروليكي لتجنب التصاق العجينة بالقالب بعد الكبس وكما بينـت التجارب في الدراسة الحالية.

تبين مقارنة نتائج الكبس الهيدروليكي ان الكثافة الحجمية لم تزداد كثيرا بالمقارنـة مـع الاجسـام المشكلة يدويا وذات كتلة مقاربة، حيث ان الكرات المشكلة يدويا من وزن حوالي 100 غـم لهـا كثافـة حجمية حوالي 2.7 غم / سم^3 (بعد الحرق) بالمقارنة مع عينة اسـطوانية مـن وزن مقـارب مكبوسـة هيدروليكيا بضغط ١٠٠ KN لها كثافة حوالي2.9 غم / سم^3 (بعد الحرق) وكلاهما محضـرتان مـن خلطة واحدة هي طابوق الزركونيا والفلدسبار والكاؤولين (65%،١٥ %،٢٠ % على التوالي) ومحروقتان بنفس الظروف. فضلا عن ذلك كانت مسامية الاجسام المكبوسة هيدروليكيا اعلى من تلك المشكلة يـدويا وتبع ذلك امتصاصية للماء اعلى في الاولى. التقاص الحجمي بعد الحرق اقل قليلا في العينات المكبوسـة هيدروليكيا (جدول 6) وكذلك الفقدان بالوزن بعد الحرق للعينات ذات الاوزان المتقاربة (جدول 7) وبذلك لاتوجد افضلية كبيرة لطريقة الكبس الهيدروليكي على طريقة التشـكيل اليـدوي (بـدون ضـغط) فـي المواصفات الفيزيائية الحاكمة للاجسام السيراميكية المنتجة.

تبين مقارنة النتائج التي حققتها خلطة الزركونيا (المحروقة بدرجة 1300م لمدة 6 ساعات) تفوقهـا في المواصفات الفيزيائية على مواصفات الكرات المستوردة المشكلة بالطريقة الباردة (العينة F1) وتبـين كذلك تقارب مواصفاتها مع الكرات المستوردة المشكلة بطريقة صب صهير الالومينا (العينـة F2) فـي مجال المسـامية وامتصاص الماء والى حد ما مقاومة الانضـغاط، الا ان الكثافة المتحققة في الكـرات الزركونية (المحضرة بالتشكيل البارد) اقل من تلك المحضرة من صـهير الالومينـا والاسـباب تتعلـق بالفروقات المتوقعة في درجة الرص بين الطريقتين وقد امتازت كرات الالومينا بكثافة حجمية اكثر من 3.0 غم / سم^3 نتيجة الشد العالي لجزيئات الالومينا المصهورة بعد الانجماد، ويرافق ذلك وبسببه مقاومة عالية للتهشم (مقاومة الانضغاط) (جدول 4).

ويمكن ملاحظة افضلية مواصفات الكرات المنتجة في الدراسة الحالية بالمقارنة مع تلك المصـنعة في مركز بحوث البناء (القس وآخرون، 1992) في قيمة الكثافة الحجمية ونسبة امتصاص الماء.

تعتبر مقاومة الاحتكاك والتآكل خلال الطحن من المواصفات المهمة في الكرات السيراميكية، وقد بلغ مجموع الفقدان بعد 24 ساعة طحن 1% في الكرات السيراميكية المصنوعة من خلطة الزركونيا (الخلطة 8)، بالمقارنة مع حوالي 0.2% فقدان بالوزن في الكرات المستوردة المصنوعة من صهير الالومينا في نفس الظروف (24 ساعة طحن لرمال كربلاء). ويلاحظ من النتائج المبينة في الجدول (8) والشكل (5).

شكل ٥: علاقة الفقدان التراكمي بالوزن مع وقت الطحن ووزن الكرات.

ان الفقدان في كتلة كرات الطحن الزركونية يتناسب عكسيا مع كتلة الكرة المستعملة، حيث ان الكرة ذات وزن 200 غم تقريبا فقدت حوالي 0.7% من وزنها بعد 24 ساعة طحن لرمال تتكون من اكثر من 90% كوارتز (رمال كربلاء)، في حين فقدت الكرات ذات كتلة 80 غم حوالي 0.9% من وزنها وازدادت نسبة الفقدان بالوزن في الكرات الاصغر حيث بلغت حوالي 2% في الكرات ذات وزن 20-25 غم ويعود ذلك بطبيعة الحال الى ان عزم الكرات اثناء الطحن الدوراني يتأثر بكتلة الكرة اثناء تدحرجها داخل الوعاء وبالتالي تكون كفاءة الطحن افضل كلما ازداد وزن الكرة المستعملة، ومقاومة الحبيبات المطحونة للطحن اقل كلما ازدادت كتلة كرة الطحن، وتعتبر نسب الفقدان بالوزن نتيجة الطحن التي تحققت في كرات الزركونيا اعلى من نسبة الفقدان بالوزن في الكرات المستوردة المصنوعة من صهير الالومينا ويعود ذلك الى فرق الكثافة الحجمية ومقاومة الانضغاط في الاثنين. تناسب التلوث الناجم من استعمال كرات الزركونيا في طحن رمال كربلاء مدة 24 ساعة مع نسبة الفقدان في وزن هذه الكرات والذي بلغ 1%، حيث ان الزيادة في تركيز الزركونيوم (Zr) بلغت حوالي 0.2% وهي نسبة ضئيلة جدا قياسا على تراكيز المواد التي تدخل عادة في الخلطات السيراميكية. وللمقارنة فإن الكرات المستعملة حاليا في طحن المواد الاولية في معمل سيراميك الرمادي والمتكونة من الحصى الطبيعي تركت حوالي 10% من كاربونات الكالسيوم في الخلطة بعد حوالي 24 ساعة طحن، حيث ازدادت نسبة اوكسيد الكالسيوم في الخلطة من 0.5% الى 6.8% بعد الطحن (البصام وآخرون، 2000).

ان كافة الكرات التي تستعمل في المطاحن تتعرض للتآكل بسبب الاحتكاك مع المواد الاولية المطحونة ولذلك تستعمل كرات مصنوعة من مواد لاتؤثر على المواصفات الحرارية للخلطة (مثل الالومينا) ولنفس السبب ترك استعمال الكرات الحديدية في هذا المجال لما للحديد من تأثير بالغ السوء على نتائج عملية الحرق، وتجدر الاشارة هنا الى ان الزركونيا ($ZrSiO_2$) مادة حرارية (Refractory) ذات درجة انصهار عالية جدا (2000<م) وليس لها تأثير على مواصفات الاجسام المحروقة فضلا عن النسب القليلة جدا منها التي تضاف الى الخلطة بعد الطحن.

يمكن تلخيص افضل النتائج التي توصلت اليها الدراسة الحالية كما يأتي:

- تركيب الخلطة: 65% حطام طابوق زركوني و 20% كاؤولين و 15% فلدسبار بوتاسي.
- الطحن بنعومة (75-)μm بمطحنة كرات سيراميكية بالستعمال الماء واعتماد النسب الآتية: مواد اولية : كرات : ماء = 1 : 1 : 2 وزنا.
- التشكيل يدوي بارد وبرطوبة 15-20%.
- التجفيف 120م لمدة 24 ساعة.
- درجة حرارة الحرق 1300م بمعدل (١ºC/min) وبفترة انضاج حراري 6 ساعات.
- المواصفات الفيزيائية بعد الحرق:

- الكثافة الحجمية 2.65-2.86 غم / سم^{3} (حسب كتلة وحجم الكرة).

- المسامية 0.14-0.54%.
- امتصاص الماء 0.05-0.21%.
- مقاومة الانضغاط 1350 MN/m^2 (للكرات وزن حوالي 20 غم).
- التقلص الحجمي 14-15%.
- الفقدان بالوزن بعد الحرق 2.5-4.0%.
- الفقدان بالوزن نتيجة طحن رمال الكوارتز لمدة 24 ساعة 0.7-2.0% وبمعدل 1%.

الاستنتاج

بينت التجارب الحالية ان الخلطة المتكونة من 65% حطام الطابوق الزركـوني و 20% كـاؤولين و 15% فلدسبار بوتاسي هي الافضل من ناحية المواصفات الفيزيائية والهندسية من بين الخلطات التـي تمت تجربتها. درجة حرارة الحرق لهذه الخلطة هي 1300م مع وقت انضاج 6 ساعات.

المواصفات التي حققتها خلطة الزركونيا افضل في الكثافة والمسامية وامتصاص المـاء ومقاومـة الانضغاط بالمقارنة مع كرات سيراميكية مستوردة بنفس الطريقة (تشكيل بـارد). كمـا ان مواصـفات الكرات المصنعة في التجارب الحالية بالطريقة الباردة مقاربة لتلك المستوردة والمصنعة عن طريق صب صهير الالومينا في المسامية وامتصاص الماء واقل في الكثافة الحجمية وقوة الانضغاط.

مقاومة الانضغاط تتناسب طرديا مع كثافة الكرات السيراميكية وعكسيا مع المسـامية. فـي حـين تتناسب الكثافة عكسيا مع كتلة الكرات السيراميكية. وتفسر هذه العلاقات بأن كفاءة التلبيد خلال الحـرق تغلق المسامات وبذلك تزداد الكثافة وتزداد تبعا لذلك المتانة. وتقل كفاءة التلبيد في وسـط الكـرات ذات الاحجام الكبيرة بالمقارنة مع الكرات الاصغر في وقت انضاج متشابه.

مقاومة الاحتكاك خلال الطحن افضل في الكرات ذات الكتلة الاكبر لعلاقة كتلة الجسم مـع العـزم خلال دوران المطحنة.

لاتوجد افضلية للتشكيل بالكبس الهيدروليكي على التشكيل اليدوي في المواصفات الفيزيائية للاجسام بعد الحرق.

بالامكان تحسين المواصفات بزيادة الكثافة وتقليل المسامية باعتماد وقت انضاج حراري اطول من 6 ساعات ويتم ذلك في الافران النفقية الانتاجية.

المواد المستعملة في الخلطة الافضل متوفرة محليا حيث ان الطابوق الزركوني المستعمل في تبطين افران الزجاج والسيراميك في الشركة العامة لصناعة الزجاج والسيراميك يستبدل بـين فتـرة واخـرى ويعتبر الطابوق التالف نفايات صناعية صلبة يمكن الاستفادة منها في انتاج الكرات السـيراميكية ضـمن استعمالات اخرى مفيدة. فضلا عن ذلك ان الفلدسبار البوتاسي الذي استعمل في الخلطة مشابه في تركيبه الكيميائي للفلدسبار الموجود في رمال تكوين الدبدبة وهو من نوع الاورثـوكليس وبالتـالي يمكـن فـي

المستقبل، عند انتاج الفلدسبار من تلك الرمال على ضوء التجارب الناجحة في هذا المجال والتي تقوم بها الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين، استبدال الفلدسبار المستورد الذي تحتاجه الخلطة. وبطبيعة الحال ان الكاؤولين اللازم لتحقيق اللدونة المطلوبة في التشكيل متوفر ضمن الانتاج النمطي للمسح الجيولوجي والتعدين يضاف الى ذلك ان التشكيل البارد وحرارة الحرق بدرجة 1300م يمكن تحقيقها بالامكانات المتاحة حاليا في الافران المتوفرة في عدد من معامل الحراريات في القطر.

نوصي باجراء دراسة للاطوار المعدنية المتكونة بعد الحرق وعلاقتها بالمواصفات الفيزيائية للكرات السيراميكية.

نوصي بدراسة تأثير الحجم الحبيبي للمواد الاولية على المواصفات الفيزيائية للكرات بعد الحرق وتجربة مواد مطحونة بنعومة اقل من 45 μm في هذا المجال.

نوصي ان تتبنى الشركة العامة لصناعة الزجاج والسيراميك هذا المشروع لانتاج كرات الطحن السيراميكية لسد حاجتها اولا من هذه المادة فضلا عن سد حاجة قطاعات صناعية اخرى في القطر.

المصادر العربية

البصام، خلدون؛ الكعبي، عادل؛ مهدي، محمد عبد الامير ورشيد، سلامة جلوب، 1999. استعمال الرمال الحاملة للفلدسبار من تكوين الدبدبة وخامات عراقية اخرى في صناعة الاجسام البورسيلينية ومواد التزجيج. المسح الجيولوجي والتعدين، بغداد، تقرير داخلي رقم 2513، 17 صفحة.

البصام، خلدون؛ الكعبي، عادل؛ مهدي، محمد عبد الامير؛ رشيد، سلامة جلوب؛ جاسم، اكرم محمد؛ حسين، رياض علي ونجم، اسماعيل محمد، 2000. التجارب نصف المعملية لانتاج اجسام بورسيلينية من الخامات المحلية. المسح الجيولوجي والتعدين، بغداد، تقرير داخلي رقم 2593، 8 صفحات.

العجيل، عبد الوهاب؛ دايخ، بان عبد ا ؛ الكعبي، عادل والدهان، داليا خالد، 1999. تركيز الفلدسبار من رمال النجف. المسح الجيولوجي والتعدين، بغداد، تقرير داخلي رقم 2517، 25 صفحة.

القس، رائد متي؛ عبد الحميد، صادق وابراهيم، نسرين، 1992. تصنيع كرات بورسيلينية. مركز بحوث البناء، تقرير بحثي داخلي، 35 صفحة.

حمودي، نوفل عبد الرسول؛ عبد ا ، سحر نجم؛ عبد القادر، ملاذ قصي والخفاجي، علي عبد الحسن، 2000. فصل وتركيز معدن السيلستايت من الخامات الرملية لتكوين الدبدبة في منطقة طار النجف. المسح الجيولوجي والتعدين، بغداد، تقرير داخلي رقم 2597، 25 صفحة.

المصادر الأجنبية

Al-Haimus, A.F., 1994. GEOUSURV Work Procedures, part 19: Engineering Geology Laboratories. State Co. of Geological Survey and Mining, Baghdad, 196p.

Lepkova, D. and Pavlova, L., 1998. Low temperature porcelain synthesis and properties. Interceram., Vol.74, pp.369-372.

Maity, S. and Sarkar, B.K., 1995. Effect of temperature on the strength and physical properties of conventional porcelain. Interceram., Vol.44, pp.318.