مجلة الهندسة والتنمية المستدامة
المجلد 23، العدد 6، تشرين الثاني 2019
ISSN 2520-0917
https://doi.org/10.31272/jeasd.23.6.15

انتاج خرسانة حرارية عازلة من مواد محلية

أحمد جبارمحسن[1] ،هند حسين حمد[2] ،زياد ممتاز محمد ازهر[3]

1) رئيس مهندسين أقدم دائرة بحوث البناء، وزارة الاعمار والاسكان والبلديات العامة ،بغداد، العراق.
2) مدرس، كلية التربية البدنية وعلوم الرياضة، جامعة بغداد، بغداد، العراق.
3) رئيس مهندسين، دائرة بحوث البناء، وزارة الاعمار والاسكان والبلديات العامة، بغداد، العراق.

تاريخ التقديم 2018/4/1 تاريخ القبول 2018/10/9 تاريخ النشر 2019/11/1

الخلاصة: يتناول البحث امكانية انتاج خرسانة حرارية عازلة من مواد اولية متوفرة محليا تتكون من الركام الحراري متمثلا بالطابوق الالومينى والذي يتوفربكميات كبيرة في المعامل كمخلفات صناعية ,وركام خام البورسلينايت خفيف الوزن كابدال جزئي عن الركام الحراري لاكساب صفة خفة الوزن للخرسانة الحرارية كما تم استخدام السمنت الابيض بنسبة 25% والكاؤولين الابيض بنسبة 5% لربط المكونات،وقد تم الحصول على خرسانة حرارية عازلة مطابقة لمتطلبات المواصفة الامريكية ASTM C401 باستخدام ركام البورسلينايت بالنسب (10،15)% كابدال جزئي عن الركام الحراري الالومينى ، وقد بلغت الكثافة الجافة للخرسانة الحرارية المصنعة (1.21, 1.24)غم/سم^3 وبتقلص خطي عند الحرق بدرجة حرارة 1150C° قيمته (1.38, 1.22)% على التوالي.

الكلمات الدالة: *خرسانة حرارية ،بورسلينايت ،مخلفات الطابوق الالومينى ،عزل حراري.*

Production of Insulating Castable Refractory From Local Materials

Abstract: The research examines the possibility of producing insulating castable Refractory from locally available raw materials consisting of thermal aggregates represented by alumina bricks, which produce in large quantities in factories as industrial residues, and lightweight raw porcelainite aggregates as a partial replacement for thermal aggregates to give a lightweight character to thermal concrete, the white cement was also used at 25% and the white kaolinite at 5% to bind the ingredients, the castable which obtained is insulation refractory castable conforming to the requirements of the American specification ASTM C401 by using porcelainite aggregate in percentages (10, 15%) as a partial replacement of the thermal Alumina bricks aggregate, the dry density of manufactured refractory castable is (1.21, 1.24) g/cm3 with linear shrinkage at 1150c ° (1.38, 1.22)%, respectively.

1.المقدمة

تعرف الخرسانة الحرارية بصورة عامة على انها خليط من الركام الحراري بتدرجات معينة مضافا اليه نسبة من المواد الرابطة مثل السمنت الحراري ،وتمتاز بمحافظتها على الشكل والصلابة في درجات الحرارة العالية ،ويختلف مدى تحملها الحراري اعتمادا على نوع ونسب المكونات الاولية لها [1] ،تعتبر الخرسانة الحرارية احد انواع الحراريات (Refractories) غير المشكلة والتي تصنف حسب تركيبها الكيميائي الى [2,3]:

أ. الحراريات الحامضية وصيغتها الكيميائية RO_2 والتي تنتج من اتحاد ذرتي اوكسجين مع ذرة واحدة من العنصر مثل السليكا SiO_2 وتمتاز بثبات كيميائي عند استخدامها بوجود الخبث الحامضي.

الباحث المتابع:c.eng21@yahoo.com

ب. الحراريات القاعدية الناتجة من اتحاد ذرة اوكسجين مع ذرة من العنصرRO مثل MgO, CaO وتستخدم بوجود الخبث القاعدي.
جـ. الحراريات المتعادلة وهي الناتجة من اتحاد ثلاث ذرات اوكسجين مع ذرتين من العنصر R_2O_3 مثل الالومينا Al_2O_3 وتمتاز بثبات كيميائي عند استخدامها بوجود الخبث الحامضي او القاعدي.

نلاحظ وجود جزء الاوكسيد (الاوكسجين) في هذه المركبات وهو ما يكسبها صفة التحمل الحراري ،وتصنف الخرسانة الحرارية موضوع البحث كنوع من الحراريات غير المشكلة المتعادلة لاحتوائها على الالومينا بنسبة جيدة ضمن الركام الحراري الالومينى ،وبشكل عام تعتبر الحراريات من المواد الانشائية واسعة الانتشار على النطاق المحلي والعالمي اذ يزداد معدل استهلاكها وخاصة الخرسانة الحرارية نظرا لدخولها في الكثير من الصناعات حيث تستعمل في بناء وتبطين الافران المستخدمة في صناعة المواد السيراميكية وفي صناعة الحديد والصلب والسمنت والزجاج كما تستخدم في تبطين المراجل البخارية وابراج التصفية المستخدمة في الصناعات النفطية والبتروكيمياوية لما تمتاز به هذه المادة من ايجابيات عند الاستخدام حيث تكون عملية وسهلة التشكيل الى مقاطع ذات سمك قليل او بأشكال معقدة او في اماكن يصعب الوصول اليها ،ومن اهم خواص الخرسانة الحرارية حفاظها على ثبات حجمي في درجات الحرارة العالية اضافة الى كونها ذات انسيابية وقابلية تشغيل جيدة عند الاستخدام، وتكون على نوعين اعتيادية غير عازلة وخفيفة الوزن عازلة ،تتكون الخرسانة الحرارية الاعتيادية من ركام وسمنت حراري كمادة رابطة ، في حين تنتج الخرسانة العازلة باستخدام ركام حراري اعتيادي اوخفيف الوزن والمادة الرابطة مع اضافة مواد خفيفة ذات تحمل حراري تكسب الجسم خفة في الوزن كالالياف الصناعية المختلفة مثل الالياف الزجاجية والياف الكربون او باستخدام وسائل صناعية ومضافات كيمياوية لاحداث وتكوين الفجوات الهوائية داخل المنتج، وقد تم اعتماد اسلوب استخدام ركام خفيف الوزن ذو تحمل حراري جيد (ركام البورسلينايت) كبديل جزئي عن الركام الحراري لانتاج خرسانة حرارية خفيفة الوزن، تكتسب الخرسانة الحرارية خواصها من تفاعل الركام الحراري مع السمنت بدرجات الحرارة العالية التي تزيد عن $1000C°$ مؤدية الى تكون الاواصر السيراميكية وتكوين مركبات حرارية جديدة تكسب الجسم خواصه المقاومة للحرارة العالية [4]،وتمتلك الخرسانة العازلة خواص حرارية تعرف بانها قابلية المادة على العزل الحراري وتقاس بمعامل التوصيل الحراري فكلما انخفضت قيمته زادت قابلية المادة على العزل الحراري وهذا يعتمد على نسب المواد المضافة والفجوات الهوائية داخل الجسم فكلما زادت نسبتها ازداد عزلها الحراري.

يعتبر خام البوكسايت من المواد المستخدمة بشكل واسع في مجال صناعة الحراريات بانواعها المختلفة نتيجة لاحتوائه على الالومينا بنسبة عالية اذ يتكون بشكل رئيسي من اوكسيد الالمنيوم Al_2O_3 ونسبة من اوكسيد السليكون اضافة الى اكاسيد اخرى بنسب قليلة مثل (Na_2O, Fe_2O_3, K_2O, MgO, TiO_2) ويظهر بالوان عديدة حسب نسب اكاسيد الالومينا والسليكا فيه فقد يكون ذو لون بني او بني محمر او ابيض او ابيض مصفر ، ويتواجد في مناطق مختلفة من العالم وهو خام تم اكتشافه في فرنسا ويحمل اسم المنطقة المكتشف فيها لاول مرة [5]، ويعتبر البوكسايت العراقي من المواد الخام التي ترتفع فيها نسبة الالومينا مقارنة مع الخامات الاخرى كالكاؤولين الابيض لذا استخدم كركام حراري يتمثل بمخلفات الطابوق الالومينى المصنع من البوكسايت المحروق.

2.الهدف

الهدف الاساسي للبحث ينصب في انتاج خرسانة حرارية ذات خواص تطابق متطلبات المواصفات العالمية للخرسانة الحرارية العازلة بطرق تحقق شروط السلامة في العمل اضافة الى الانتاج باقل الكلف الممكنة ، لذا كان التوجه لاستخدام مواد اولية تكسب المنتج خواص العزل الحراري الجيد وتقليل الوزن بدون اثار جانبية ذات اثر سلبي على البيئة مثل انبعاث الغازات السامة الناتجة من التفاعلات الكيميائية المكونة للفجوات داخل المنتج او باستخدام مواد خفيفة الوزن ذات محاذير على الصحة كالالياف الزجاجية ،استخدم في هذا البحث مواد اولية متوفرة محليا بكلف مناسبة وتتمثل بركام مخلفات الطابوق الالومينى وركام البورسلينايت خفيف الوزن والمادة الرابطة وتشمل السمنت الابيض واطيان الكاؤولين الابيض.

3.البحوث والدراسات السابقة

نظرا لزيادة معدل استهلاك الحراريات ومنها الخرسانة الحرارية حيث اصبح موضوع الحفاظ على الطاقة من الضياع من اهم الاساسيات التي يبنى عليها اختيار المواد الاولية لصناعتها للحفاظ على درجة حرارة الافران المستخدمة في مختلف الصناعات ،لذا ازداد التوجه في الاونة الاخيرة لانتاج خرسانة حرارية عازلة توضع ضمن طبقات تغليف الافران لغرض زيادة العزل الحراري لها والمحافظة على حرارتها من الضياع وبالتالي تقليل كلف التسخين لهذه الافران، وقد تنوعت البحوث التي تدرس امكانية انتاج خرسانة حرارية عازلة بطرق مختلفة وباستخدام مواد اولية ملائمة من الناحية الصحية للعاملين على الانتاج وباقل الكلف الممكنة وبما يضمن الحصول على افضل الخواص.

ومن الدراسات العالمية التي اجريت لانتاج مواد اولية خفيفة الوزن ذات تحمل حراري جيد هي البحث المنجز من قبل Manuel,Gonzaleaz,Alonso,2017[6] حيث تمكن الباحثون من انتاج ركام خفيف الوزن ذو تحمل حراري يصل الى $1150C^0$ باضافة الياف الكاربون بنسبة (5,10، 2.5)% بشكل مطحون ذو مقاس اقل من 500µm الى خبث الاحجار وتعجن الخلطة بالماء حيث تسمح الياف الكاربون ذات التحمل العالي لدرجات الحرارة بتكوين عجينة لزجه تسمح بخروج الغازات وتكون الفقاعات التي تسبب انخفاض في وزن المنتج الى كثافة تصل الى ($1.13\ gm/cm^3$) للركام المصنع ، كما اشارت الدراسة التي قام به الباحث Santos,2003 [7] والذي درس تاثير الرطوبة ونسبة المسامات للمكونات الاولية على الخواص الحرارية للخرسانة المقاومة للحرارة اذ وجد ان الموصولية الحرارية للاجسام المجففة والتي تتاثر بكمية الماء الحر في الجسم ونسبة المسامات التي تحتوي هذا الماء تنخفض الى النصف للاجسام المحروقة، وكانت دراسته ضمن المدى الحراري الذي يتراوح من درجة حرارة المختبر الى حد °1000C ووجد ان زيادة المسامات والماء في الجسم يؤدي الى انخفاض في الموصولية الحرارية للاجسام بعد الحرق نتيجة فقدان الماء وظهور التشققات الشعرية التي تملا بالهواء والغازات الناتجة من فقدان ماء التبلور اوالناتجة من التفاعل بين مادة السمنت والركام الناعم مما يسبب انخفاض في قيمة موصوليته الحرارية.

واشار الباحث Demirboga,Gul.2003[8] ان الموصولية الحرارية لخرسانة ركام البرلايت تتاثر باضافة بعض المواد اذ وجد ان اضافة كل من الرماد المتطاير(Fly Ash) ورغوة السليكا (Silica Fume) يؤديان الى انخفاض في الموصولية الحرارية للخرسانة المصنعة ويكون الرماد ذو تاثير اكبر على خفضها، في حين قام الباحث Alton-2001 [9] بنشر بحثه الذي يتناول دراسة تاثير درجات الحرارة المختلفة على الخواص الفيزيائية والميكانيكية (مقاومة الانضغاط ،مقاومة الانحناء ، الكثافة ، المسامية ، معاير الكسر) لنماذج الخرسانة الحرارية المصنعة باستخدام البوكسايت ونماذج خرسانة الكورندم وبمحتوى سمنت قليل، وقام بدراسة الخواص عند درجات الحرارة °C(1500,1000,110) ووجد ان خرسانة البوكسايت افضل في فحص مقاومة الانضغاط الباردة ومقاومة الانحناء الباردة والحارة ومعاير الكسر البارد والحار من نماذج خرسانة الكورندم ،ويعود ذلك الى تكون الاطوار الحرارية الجديدة للبوكسايت عند الحرق لدرجات حرارة °C(1500,1000) وبوجود المسامات داخل الهيكل والتي تمتلئ عند التلبيد مؤدية الى تحسين في الخواص الميكانيكية للمنتج المحروق ، وكانت النتائج عند الحرق لدرجة °1000C افضل منها عند الحرق لدرجة حرارة °1500C.

وفيما يخص البحوث المنجزة محليا في هذا المجال فقد قام الباحث د.الجباري صبحي من مركز بحوث البناء، 1992[10] بانتاج خرسانة حرارية من مواد متوفرة محليا تتمثل بالسمنت الحراري الالومينى المنتج في معمل سمنت الفلوجة وركام المولوكايت المنتج في معمل سمنت السدة ، وتمت مطابقة خواص الخرسانة مع حدود المواصفة القياسية الامريكية ASTM C46 واظهرت الدراسة ان تغيير نسبة السمنت يؤدي الى الحصول على انواع مختلفة من الخرسانة الحرارية وبخواص متغيرة حسب المواصفات المطلوبة عمليا،كما تختلف هذه الخواص بتغير نسبة الماء في الخلطة وطرق المعالجة ومدتها ،كما تمكن الباحثون الحمداني ،فائزة،2000 [11] من انتاج مصبوبات حرارية عازلة من مواد مصنعة محليا مطابقة للمواصفات العالمية بكثافة كلية جافة $1.42\ gm/cm^3$ وبتقلص خطي قيمته 1.1% عند الحرق بدرجة حرارة °1260C.

4.الجانب العملي

1.4.تهيئة المواد الاولية

1.1.4. ركام مخلفات الطابوق الالومينـي

استخدم في البحث مخلفات الطابوق الالومينـي كركام حراري اذ تتمثل الجدوى من استخدامه اقتصاديا حيث يتم الاستغناء عن الاف الاطنان منه سنويا بعد انتهاء العمر التشغيلي له عند استخدامه كبطانة لافران المعامل الصناعية التي تحتاج الى درجة حرارية عالية تتعدى °1000C ويرمى كمخلفات عند تبديل بطانات هذه الافران مما يجعله عبأ على البيئة بالرغم من احتفاضه بخواصه الحرارية والتي تؤهله للاستخدام مرة اخرى[12]، وقد بلغت نسبة الالومينا فيه 49.76% وبكثافة ($1.77gm/cm^3$)، وتم تهيئته بالتدرج الحبيبي المطابق لمتطلبات المواصفة الامريكية ASTM C330 [13] ،اجري التحليل الكيميائي له لتحديد نسبة الالومينا وباقي مركباته الكيميائية ويبين الجدولين رقم (1) و(2) التدرج الحبيبي والتحليل الكيميائي لمخلفات الطابوق الالومينـي.

جدول رقم (1) التدرج الحبيبي لمخلفات الطابوق الالومينـي

مقاس فتحة المنخل	نسبة المار %	حدود المواصفة ASTM C330
9.5mm	100	100
4.75mm	100	85 -100
1.18mm	60	40 -80
300µm	10	10 – 35
150µm	5	5 – 25

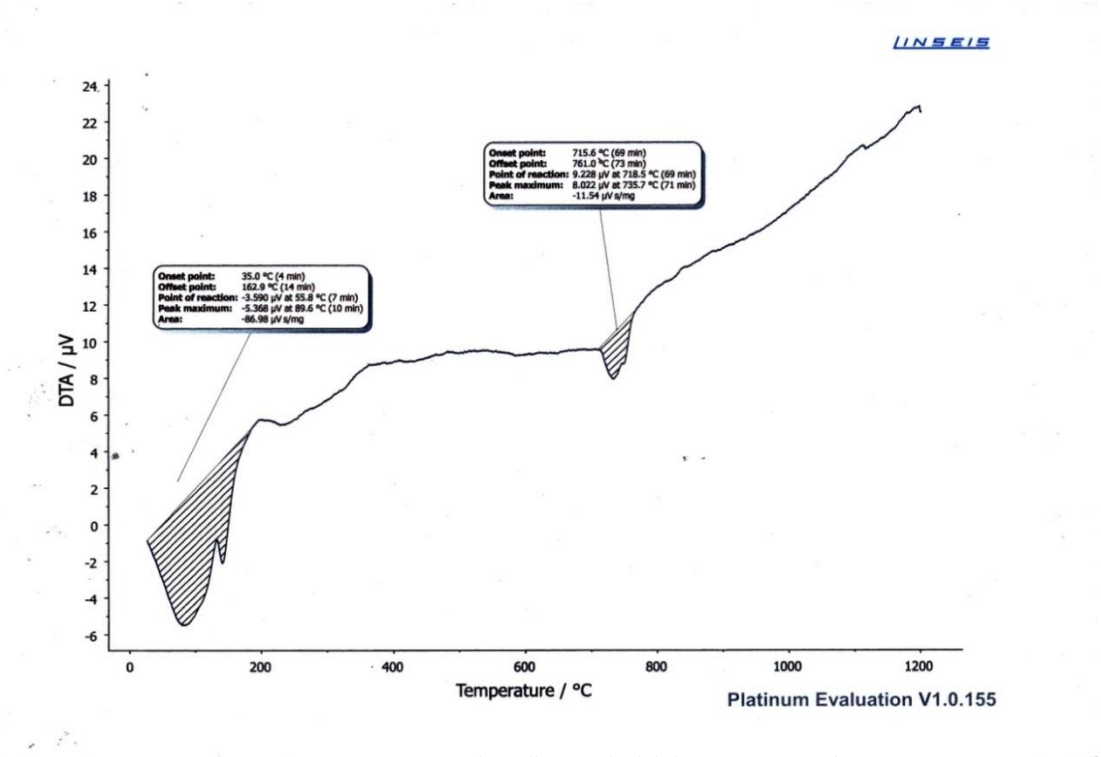
جدول رقم (2) التحليل الكيميائي لمخلفات الطابوق الالومينـي

الاكاسيد	مخلفات الطابوق الالومينـي%	البورسلينايت %
L.O.I	1.02	22.44
SiO_2	43.70	43.91
Al_2O_3	49.76	10.16
Fe_2O_3	1.28	2.43
SO_3	0.01	2.86
CaO	2.29	13.66
MgO	1.93	4.53

2.1.4. ركام خام البورسلينايت

وهو عبارة عن صخور معدنية ذات كثافة منخفضة استخدم في البحث كركام خفيف الوزن كبديل جزئي عن ركام مخلفات الطابوق الحراري وتم جلبه من منطقة طريفاوي ،اجريت عليه عملية تهيئة اذ تم تكسيره بواسطة كسارة فكيـة وطحـن ثم غربل بالتدرج الحبيبي ليطـابق متطـلبات المواصـفة الامـريكية ASTM C330 [13] الخاصة بالركام خفيف الوزن وتم قياس كثافته الجافة بعد الغربلة حسب المواصفة الامريكية ASTM C29 [14] وبلغت قيـمتـها $0.73\ gm/cm^3$ ويبـين الجـدولان رقم (2) و(3) التحليل الكيمـيائي والتدـرج الحبيبي للبورسلينايت ،كما اجري فحص DTA لمعرفة السلوك الحراري له عند الحرق ،اذ يظهر منحني السلوك الحراري المبين في الشكل رقم (1) انحدارا الى الاسفل مشيرا الى خروج الماء الحر وانبعاث للغازات عند درجات الحرارة الاقل من

250C° ،ويؤكد ذلك القيمة المرتفعة للفقدان في الوزن والبالغة (22.44)% كما تبدا المعادن بالتفكك عند درجات الحرارة الاقل من 700C° مثلما تشير القمم نحو الاسفل للمنحني والتي تعني امتصاص للطاقة الحرارية بعدها يبدا المنحني بالارتفاع نحو الاعلى مع ظهور بعض القمم الصغيرة وهذه العملية تكون مصحوبة بانبعاث للطاقة وتكون اطوارا جديدة تكسب الجسم قوته ومقاومته.



شكل رقم (1) منحني السلوك الحراري للبورسلينايت

جدول رقم (3) التدرج الحبيبي للبورسلينايت

مقاس فتحة المنخل	نسبة المار %	حدود لمواصفة ASTM C330
9.5mm	100	100
4.75mm	100	85 -100
1.18mm	60	40 -80
300µm	10	10 – 35
150µm	5	5 – 25

3.1.4 .السمنت الابيض

وهو نوع من انواع السمنت البورتلاندي يمتاز بانخفاض اوكسيد الحديد فيه وهو الاوكسيد الذي يسبب انخفاض درجة انصهار المادة التي تحتويه وهذا ما ساعد على استخدامه في الصناعات الحرارية بالرغم من انخفاض نسبة الالومينا فيه، ولقد استخدم السمنت الابيض المتوفر محليا في الاسواق كمادة رابطة في الخرسانة الحرارية المنتجة في هذا البحث وكبديل عن السمنت الالومينى الحراري كون الاخير لا ينتج داخل البلد حاليا اضافة الى كلفة استيراده العالية ،لذا وجد العديد من الباحثين في السمنت الابيض بديلا جيدا عنه لا سيما في انتاج الحراريات التي لا يتعدى

المدى الحراري لاستخدامها 1260C° كما في الخرسانة موضوع البحث وغيره من البحوث المحلية المنجزة في دائرة بحوث البناء من قبل استشاري ومهندسي الدائرة لانتاج الخرسانة والمونة الحرارية من مواد متوفرة محليا ،ويبين الجدول رقم (4) نتائج التحليل الكيميائي للسمنت الابيض والجدول رقم (5) خواصه الفيزيائية والمطابقة لمتطلبات المواصفة القياسية العراقية رقم 5 لسنة 1984[15] والتي تم اجراءها في مختبرات دائرة بحوث البناء.

جدول رقم (4) التحليل الكيميائي للسمنت الابيض والكاؤولين

الاكاسيد	السمنت الابيض %	الكاؤولين الابيض %
L.O.I	3.34	13.06
SiO_2	21.71	42.95
Al_2O_3	6.28	42.90
Fe_2O_3	0.02	0.32
SO_3	3.0	Nil
CaO	64.32	0.76
MgO	1.30	Nil
Total	99.97	99.99

جدول رقم (5) الخواص الفيزيائية للسمنت الابيض

الفحص	النتيجة	حدود المواصفة العراقية رقم 5 لسنة 1984
النعومة	4174	2300 كحد ادنى
غم/سم^2		
وقت التماسك		
الابتدائي(دقيقة)	50	45 كحد ادنى
النهائي (ساعة)	3:00	10 كحد اعلى
مقاومة الانضغاط		
نت/م^2		
عمر 3 ايام	27	15 كحد ادنى
عمر 7 ايام	34	23 كحد ادنى
الفقدان في الوزن%	3.34	4 كحد اعلى
محتوىSO_3 عند		
الومينات ثلاثي الكالسيوم >5%	3	3 كحد اعلى
عامل الاشباع الجيري %	0.91	1.02__0.66

4.1.4. الكاؤولين الابيض

وهو احد الاطيان ذو لون يميل الى الابيض وله درجة انصهار مرتفعة وذو مقاومة عالية للحرارة بسبب احتوائه على نسبة كبيرة من الالومينا ضمن تركيبه ، يدخل في صناعة الحراريات وذو لدونة عالية بسبب خلوه من المعادن غير اللدنة كحجر الكلس ،وقد تم اضافته في هذا البحث الى خليط المواد الاولية بنسبة وزنية 5% لجميع الخلطات الخرسانية وبمقاس حبيبي 150µm مار من منخل رقم 100 لغرض اكساب الخليط اللدونة اللازمة لتماسك النموذج المصبوب ،ويوضح الجدول رقم (4) التحليل الكيميائي لمادة الكاؤولين الابيض.

5.1.4 .الماء

استخدم ماء الاسالة لاغراض الخلط في تحضير الخلطات الخرسانية.

4 .2. تهيئة النماذج المختبرية

هيأت ستة انواع من الخلطات بنسب وزنية مختلفة من المواد الاولية وماء الخلط وتمت عملية الخلط والصب استنادا الى المواصفة الامريكية ASTM C862[16] ،حيث يتم خلط المكونات الجافة في خلاط كهربائي لضمان تجانس الخليط ثم يضاف ماء الخلط اللازم الى ان يتم الحصول على القوام القياسي ،بعدها يتم صب الخلطات في القوالب المزيتة مسبقا وتترك لتجف بعد تغطيتها بالنايلون لمدة 24 ساعة في درجة حرارة المختبر ، تفتح بعدها القوالب وتترك النماذج لتجف لمدة 24 ساعة في درجة حرارة المختبر ثم توضع في فرن تجفيف بدرجة حرارة (110±5)C° لمدة 24 ساعة ويتم اخراجها من الفرن وتترك لتبرد لتجرى عليها الفحوص الفيزيائية المطلوبة وتشمل (الكثافة ، مقاومة الانضغاط) كما تم اخذ الابعاد لفحص التقلص الخطي بعد الحرق، شكلت النماذج في قوالب قياسية بالابعاد (50*50*50)mm لفحص الكثافة ومقاومة الانضغاط ونماذج موشورية بالابعاد (160*40*40)mm لقياس فحص التقلص الخطي بعد الحرق في حين تم تهيئة نماذج بالابعاد (200*100*30)mm لقياس الموصولية الحرارية للخلطات الناجحة بالفحوص والمصنفة كخرسانة حرارية عازلة حسب متطلبات المواصفة ASTM C401[17] ويبين الجدول رقم (6) تفاصيل نسب مكونات الخلطات ونسب ماء الخلط.

جدول رقم (6) مكونات الخلطات

رمز الخلطة	مكونات الخلطة وزناً (%) ركام تالف الطابوق الالومينيي	ركام بورسلينايت	سمنت ابيض	كاؤولين	ماء الخلط
$1_{ref.}$	70	—	25	5	29
2	60	10	25	5	32
3	55	15	25	5	33
4	50	20	25	5	35
5	45	25	25	5	37
6	40	30	25	5	38

3.4 .حرق النماذج

حددت درجة حرارة الحرق الملائمة للنماذج استنادا الى نتائج فحص الكثافة الجافة لها قبل الحرق اذ يتم تحديد الدرجة حسب المتطلبات الواردة في المواصفة الامريكية ASTM C401/table2 والخاصة بالخرسانة الحرارية العازلة Insulating Castable Refractories ،وحسب نتائج فحص الكثافة تم تحديد درجة حرارة 1260C° لحرق نماذج جميع الخلطات وبعد الحرق وقياس التقلص الطولي للعينات المحروقة وجد عدم مطابقتها لحدود المواصفة اعلاه لذا تم اختيار الدرجة الاوطأ في المواصفة وهي 1150C° لحرق العينات المهيئة والمحتوية على ركام البورسلينايت وتم الحرق في فرن كهربائي عالي الحرارة وفقا لبرنامج حرق بمعدل.250C°/hr لضمان عدم حدوث تشققات في النماذج مع زمن انضاج حراري لمدة ساعتان، بعد الانتهاء من الحرق واخراج النماذج من الفرن تركت لتبرد لاكمال باقي الفحوص المطلوبة وهي فحص التقلص الخطي والموصولية الحرارية والصدمة الحرارية للخلطات الناجحة.

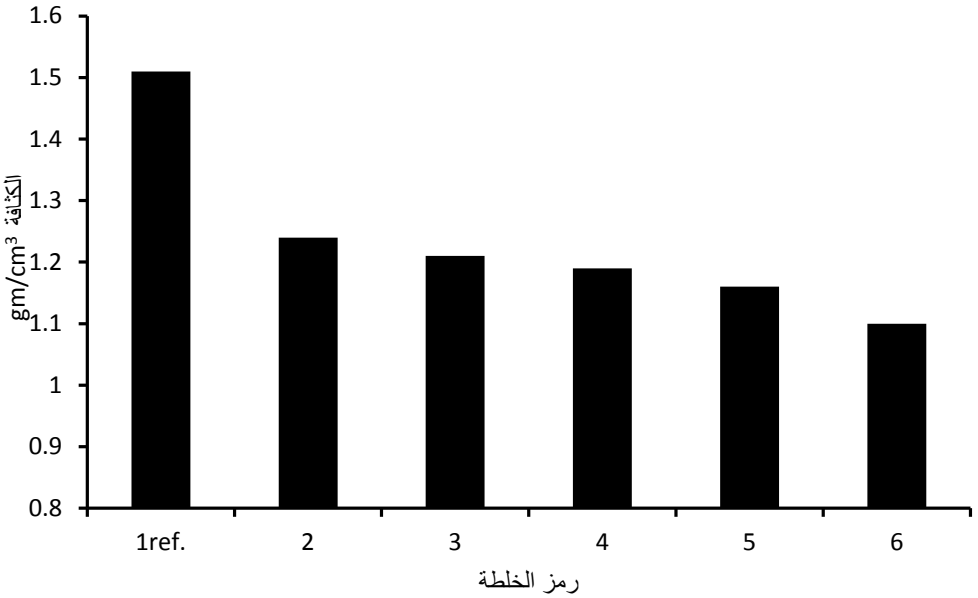
4.4 .الفحوص المختبرية

1.4.4 . *فحص الكثافة الحجمية*

يعتبر فحص الكثافة الجافة قبل الحرق من اهم الفحوص للمواد الحرارية المراد انتاجها اذ يتم تحديد درجة حرارة الحرق اللازمة لها اعتمادا على نتائج فحص الكثافة ، تم فحص النماذج حسب المواصفة ASTM[18] C134 وتمت مطابقة نتائج الفحوص للنماذج ولجميع الخلطات مع حدود المواصفة الامريكية ASTM C401 ويبين الجدول رقم (7) والشكل رقم (2) نتائج الفحوص المختبرية.

جدول رقم (7) نتائج الفحوص المختبرية

رمـــــز الخلطة	الكثافة الحجمية عند 110 C^o (gm/cm^3)	مقاومة الانضغاط قبل الحرق (N/mm^2)	التقلص الخطي للحرق عند 1260C° (%)	التقلص الخطي للحرق عند 1150C° (%)	الموصولية الحرارية ($w/m.k^\circ$)	الصدمة الحرارية (دورة)
$1_{ref.}$	1.51	8.3	1.20	0.87	0.91	—
2	1.24	5.5	1.57	1.22	0.562	20 <
3	1.21	4.9	1.61	1.38	0.522	20 <
4	1.19	4.1	1.69	1.57	—	—
5	1.16	3.4	1.80	1.61	—	—
6	1.10	2.5	2.43	1.80	—	—



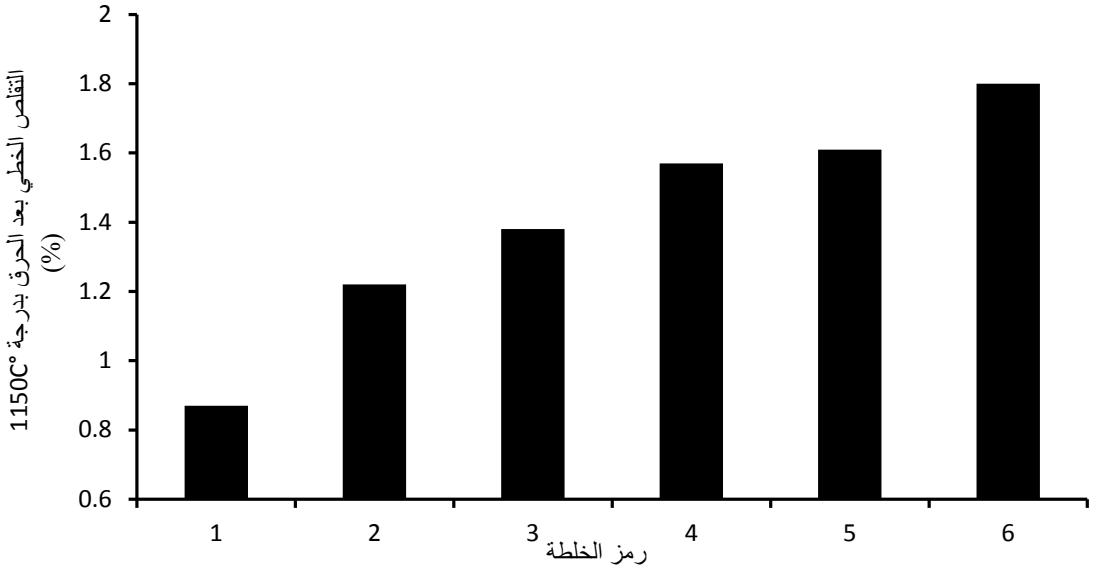
شكل رقم (2) نتائج فحص الكثافة بعد التجفيف

2.4.4 فحص مقاومة الانضغاط

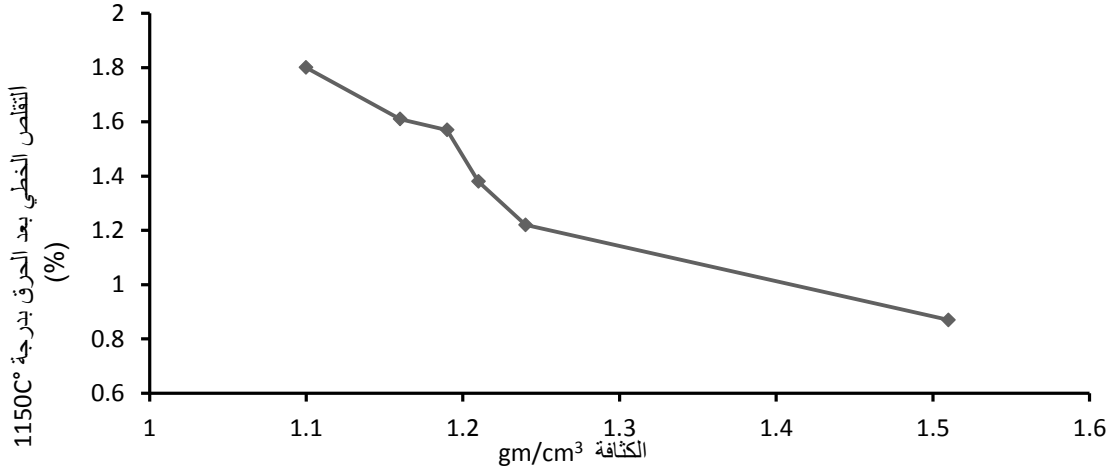
يعتبر فحص مقاومة الانضغاط قبل الحرق للمواد الحرارية مؤشرا على مدى ملائمتها للاستخدام في المنشات الحرارية كالافران او الجدران العازلة والمقاومة للحرائق ،ولا يمكن اعتبارها مقياسا لمقاومة تلك المواد لدرجات الحرارة العالية عند الحرق ولكن تعتبر مؤشرا على مدى تحمل المنتج اثناء النقل والاستخدام ،فحصت النماذج المهيئة وبمعدل 10 نماذج لكل خلطة واجري الفحص حسب المتطلبات والحدود القياسية الواردة في المواصفة الامريكية ASTM C133[19]والخاصة بمواصفات المصبوبات العازلة (Insulating Castable) ويبين الجدول رقم (7) نتائج الفحص للنماذج المجففة.

3.4.4. فحص التقلص الخطي بعد الحرق

يعتبر هذا الفحص المؤشر الوحيد على نجاح المواد الحرارية بعد تعرضها للحرق كما يحدد مدى مطابقتها لمتطلبات المواصفات العالمية الخاصة بها، اجري الفحص للنماذج المحروقة بدرجة حرارة °1150C,1260C° وتمت مطابقة النتائج مع حدود المواصفة ASTM C401 / table2 والتي تسمح بتقلص اقصى مقداره 1.5% ويبين الجدول رقم (7) والشكل رقم (3) نتائج الفحوص بمعدل ثلاث نماذج لكل خلطة والتي تظهر مطابقة الخلطات (1،2،3) لحدود المواصفة اعلاه.



شكل رقم (3) نتائج فحص التقلص الخطي بعد الحرق



شكل رقم (4) العلاقة بين الكثافة بعد التجفيف والتقلص الخطي بعد الحرق

4.4.4 . فحص الموصولية الحرارية

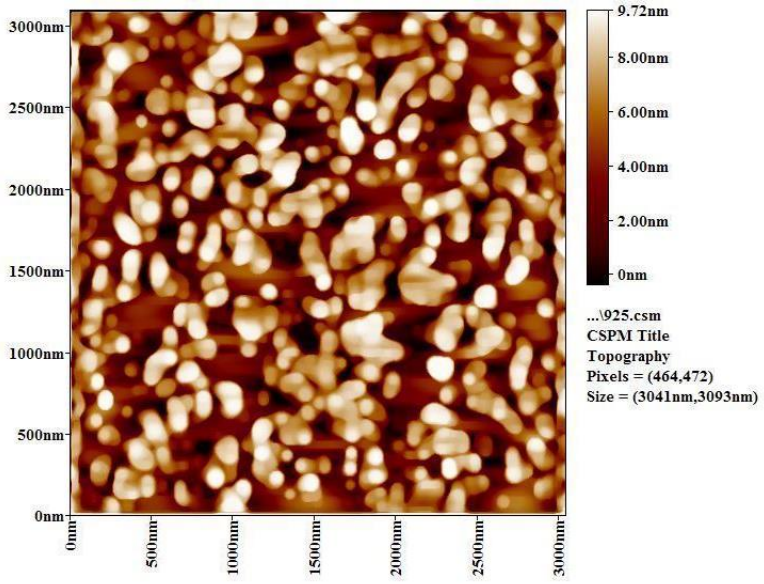
اجري الفحص للنماذج المحروقة بدرجة حرارة 1150C° بابعاد (200*100*30)mm باستخدام تقنية السلك الساخن وبواقع 3 نماذج للخلطات المصنفة حسب المواصفة ASTM C401 كمصبوبات حرارية عازلة (الصنف P (Class P) Insulating Castable Refractories) والتي اظهرت تقلصا خطيا اقل من الحد المطلوب في المواصفة وهو 1.5% وهي الخلطات (3,2) كما تم فحص الخلطة المرجعية رقم (1) للمقارنة ،ويبين الجدول رقم (7) نتائج فحص النماذج.

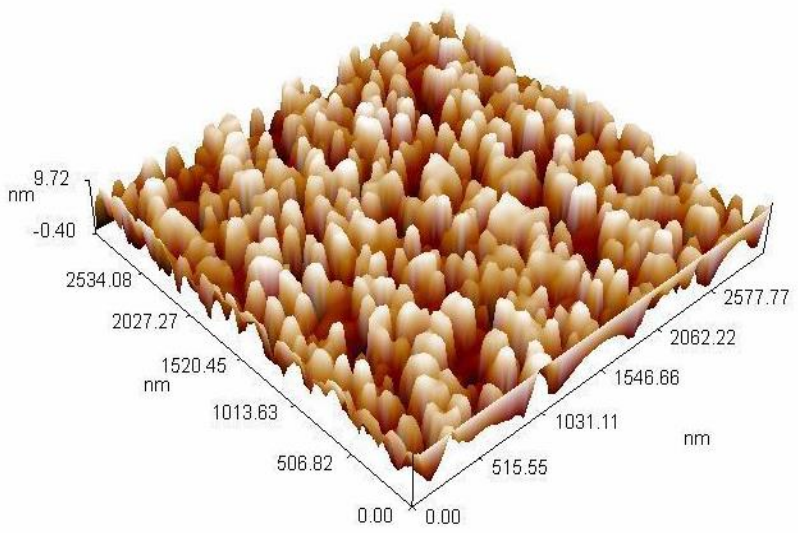
5.4.4 .فحص الصدمة الحرارية

تعتبر قابلية التحمل لدرجات الحرارة العالية للمواد الحرارية هي مفتاح تحديد اختيارها للتطبيقات الهندسية والمعملية المختلفة ،وعند استخدامها تتعرض هذه المواد الى تغير مفاجئ في درجات الحرارة نتيجة لعملية التسخين والتبريد المستمرة اضافة الى فرق درجات الحرارة بين داخل وخارج الفرن ،وان مقدار تحمل الحراريات لهذه التغيرات هو علامة على مدى بقاء المادة محافظة على خواصها بدون فشل او تحطم اي مقياس لعمرها التشغيلي ،لذا يتم فحص الصدمة الحرارية للمواد السيراميكية والتي تعتبر عامل حرج لتحديد ديمومة المواد تحت تاثير الظروف الحرارية المتغيرة ،يعتبر هذا الفحص مقياس لمدى مقاومة المواد للاجهادات المتولدة نتيجة التغير الحراري المفاجئ والتي اذا زادت عن اجهادات التحمل للمادة تسبب ظهور تشققات فيها وبالتالي فشلها وتقليل عمرها التشغيلي ، وقد تم فحص الخلطات المصنفة كخرسانة حرارية عازلة (2 , 3) والمحروقة بدرجة حرارة (1150C°) لفحص الصدمة الحرارية وحسب المواصفة الالمانية DIN51068[20] باستخدام اسلوب التبريد بالماء ، ويبين الجدول رقم (7) نتائج الفحص.

6.4.4 .فحص مجهر القوة الذرية

تم استخدام مجهر القوة الذرية AFM وهو عبارة عن مجهر الكتروني يزودنا بالتفاصيل والمعلومات عن شكل وتضاريس سطح المادة ونسب وحجم مكوناتها بدقة متناهية تصل الى المستوى الذري لتلك المكونات ويكون ذلك عن طريق المسح ثلاثي الابعاد للسطح وبعمق يتراوح من 10-20 مايكروميتر للبعد Z ، تم اختيار العينة رقم (3) والمصنفة كخرسانة حرارية عازلة ذات معامل التوصيل الحراري الاقل والذي يصل الى(0.522w/m.k°) لاجراء المسح المجهري لها وفحص النموذج المطحون بمقاس 150µm للعينة ويبين الشكلين رقم (6,5) صور وتفاصيل وحجم الدقائق على سطح العينة.



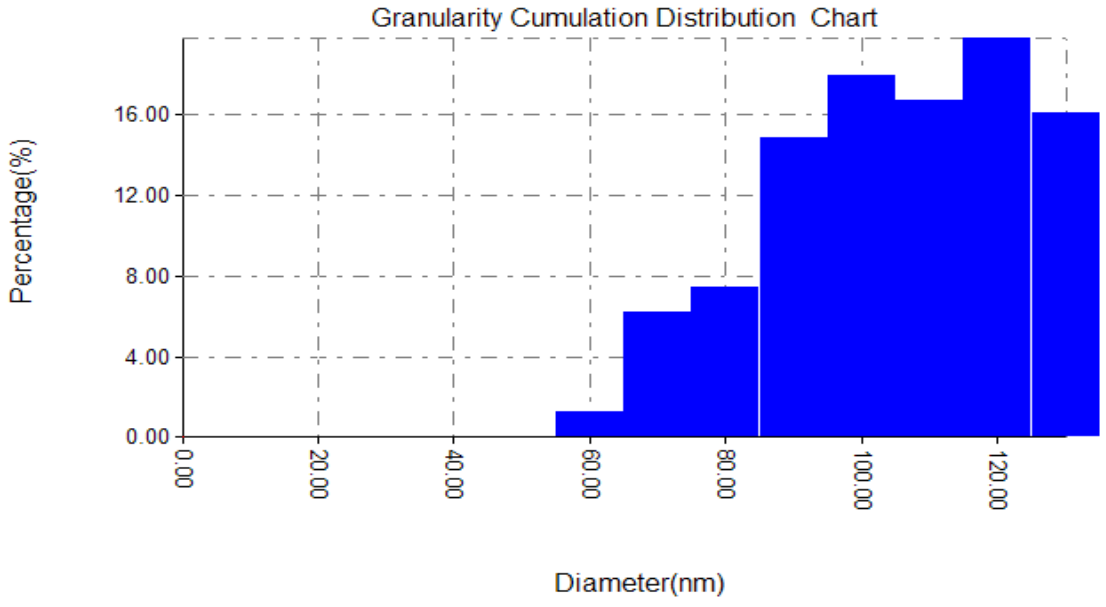


شكل رقم (5) مجهر القوة الذرية

توزيع التدرج الحبيبي التراكمي

القطر<=10%: 70.00 nm	**معدل القطر: 100.31 nm**
القطر<=90%: 120.00 nm	**القطر<=50%: 100.00 nm**

القطر<(nm)	الحجم(%)	التراكمي(%)	القطر<(nm)	الحجم(%)	التراكمي(%)	القطر<(nm)	الحجم(%)	التراكمي(%)
60.00	1.23	1.23	90.00	14.81	29.63	120.00	19.75	83.95
70.00	6.17	7.41	100.00	17.90	47.53	130.00	16.05	100.00
80.00	7.41	14.81	110.00	16.67	64.20			



شكل رقم (6) تقرير توزيع التراكيب الحبيبية

5. النتائج والمناقشة

تم تقييم ومناقشة النتائج للفحوص المختبرية والمبينة تفاصيلها في الجداول والاشكال اعلاه لتحديد نوع الخرسانة الحرارية التي تم تصنيعها والمصنفة في هذا البحث استنادا للشروط الواردة في المواصفة القياسية الامريكية ASTM C401 وكما مبين ادناه:

1.5 .الكثافة

تشير نتائج الفحص المبينة في جدول رقم (7) قيم الكثافة للنماذج بعد التجفيف بدرجة حرارة 110C° والتي على اساسها تم تحديد درجة حرارة الحرق الملائمة لها ،ويظهر من النتائج ان زيادة نسبة البورسلينايت في الخلطة يؤدي الى انخفاض في الكثافة ويعود ذلك الى الهيكل المسامي له حيث تظهر النتائج ان كثافة الخلطات (6,5,4,3,2) تنخفض بنسبة (37.3, 30.2 , 26.9 , 24.8, 21.8)% على التوالي عن كثافة الخلطة المرجعية الخالية من ركام البورسلينايت والذي يكسب الجسم خفة في الوزن.

2.5. مقاومة الانضغاط

يكتسب الجسم الخرساني مقاومته للانضغاط قبل الحرق نتيجة عملية الاماهة للسمنت وذلك بعد اتحاده بالماء الحر(Free Water) المتمثل بماء الخلط ،اذ يعمل بعد تصلبه وتكون الاواصر الهيدروليكية على ربط مكونات الخلطة والتي تشمل ركام مخلفات الطابوق الالومينيي والبورسلينايت لتعطي هيكل قوي ومتماسك ،كما يساعد الكاؤولين المضاف بنسبة 5% على اكساب الخلطة اللدونة اللازمة لتشكيل هيكل مترابط ،وعلى الرغم من عدم وجود محددات لمقاومة الانضغاط بعد التجفيف الا ان المواصفة ASTM C133 والتي تم الفحص بموجبها للنماذج بالابعاد(5*5*5)سم وحسب الجدول الخاص بالحراريات العازلة تعطي قيمة تقريبية للمقاومة وتبلغ هذه القيمة 3MPa وهي اقل من النتائج التي تم الحصول عليها من فحص العينات المصنعة في البحث وكما مبين في الجدول رقم (7) وهذا يشير الى ان نسبة الاضافة للسمنت الابيض وهي 25% كانت كافية للحصول على المقاومة التي تجعل الخرسانة المنتجة ذات قوة مناسبة تؤهلها لعملية النقل والاستخدام بأمان حيث لا يتعرض هذا النوع من الخرسانة الى اي نوع من القوى التي تحتاج الى مقاومة عالية.

3.5. التقلص الخطي بعد الحرق

من ملاحظة النتائج التي تم الحصول عليها في فحص التقلص الخطي بعد الحرق وجد ان انخفاض الكثافة الحجمية للنماذج قبل الحرق والمرتبطة بنسبة البورسلينايت فيها تؤدي الى زيادة قيم التقلص الخطي وهذا يرجع الى انخفاض نسبة ركام مخلفات الطابوق الالومينيي الفاقد للدونة كما يتضح في النسبة المنخفضة للفقدان في الوزن (1.02)%، في حين يعاني البورسلينايت من التقلص اثناء الحرق ويؤكد ذلك النسبة العالية للفقدان في الوزن للبوسلينايت (22.44)% كما مبين في الجدول رقم (2) مسببا تقلصا في الجسم الخرساني ،ويتضح من نتائج الفحص ان جميع النماذج المحتوية على البورسلينايت والتي تم حرقها بدرجة حرارة1260C° اظهرت فشلا في فحص التقلص الخطي حسب حدود المواصفة ASTM C401 وهذا يشير الى حدوث انصهار للمكونات الاولية وهي ركام البورسلينايت والذي يحتوي على نسبة من الالومينا (10.16)% حيث انها غير كافية لرفع درجة انصهاره ،اضافة الى وجود السمنت الابيض ذو النسبة المنخفضة من الالومينا (6.28)% حيث تملأ المواد المنصهرة المسامات في الجسم مسببة تقلصا فيه، وعند خفض درجة حرارة الحرق الى1150C° اظهرت الخلطتان (2,3) تقلصا مسموح به حسب المواصفة اعلاه بسبب انخفاض نسبة الالومينا فيها وقد ارتفعت قيم التقلص الطولي بنسبة (36, 28)% على التوالي لهاتين الخلطتين عن تقلص الخلطة المرجعية والبالغ قيمته (0.87)%،وبذلك يمكن تصنيف الخلطتين كخرسانة حرارية عازلة (Class P) ،في حين فشلت الخلطات (6,5,4) في هذا الفحص نتيجة ارتفاع نسبة ركام البورسلينايت فيها وقد كان لها قيم تقلص خطي تعدى الحد المسموح به في المواصفة وهو (1.5)%.

4.5. الموصولية الحرارية

اظهرت نتائج الفحص للنماذج المصنفة كخرسانة حرارية عازلة وهي الخلطات(3,2) تحسنا في خواص العزل الحراري عن الخلطة المرجعية اذ انخفضت قيم الموصولية الحرارية لهذه الخلطات بنسبة (42.6,38.2)% عن موصولية الخلطة المرجعية وكما مبين في جدول رقم (7) ويعود ذلك الى الابدال الجزئي لركام مخلفات الطابوق الالومينى ذو الكثافة العالية ($1.77gm/cm^3$) بركام البورسلينايت ذو الهيكل المسامي وبكثافة ($0.73gm/cm^3$) حيث تعمل الفجوات الهوائية الموجودة ضمن هيكل البورسلينايت على خفض معدل انتقال الحرارة عبر الجسم وبالتالي تقليل موصوليته الحرارية وزيادة عزله الحراري مما يجعله ملائما للاستخدام كعازل في اجزاء من الفرن كالسقوف والجدران للمحافظة على حرارته من التسرب وبالتالي يكون جو التسخين داخل الفرن اكثر ثباتا وتجانسا ويقلل من الكلف اللازمة لتسخين الفرن.

5.5. الصدمة الحرارية

اظهرت نتائج فحص مقاومة الصدمة الحرارية التي تم اجرائها لنماذج الخلطات (3,2) المصنفة كخرسانة حرارية عازلة قدرتها على تحمل التغير المفاجئ للحرارة لاكثر من 20 دورة اذ تعمل المسامات الهوائية الموجودة ضمن هيكل البورسلينايت على تقليل انتقال الحرارة بالحمل داخل الجسم الخرساني وبالتالي تحد من الاجهادات المتولدة داخله نتيجة التغيير المفاجيء للحرارة وترفع درجة مقاومته لها وبالتالي الحفاظ على جسم متماسك وقوي.

6.5. مجهر القوة الذرية

من نتائج الفحص المبينة في الشكل (5) نلاحظ ظهور واضح لدقائق الركام المتمثل بمخلفات الطابوق الالومينى وركام البورسلينايت والتي تكون ذات مقاس كبير مقارنة مع دقائق السمنت الابيض والكاؤولين ،ويوضح الجدول في الشكل (6) معدل حجم الحبيبات وهي بقيمة 100.31nm اذ ادى وجود النسبة العالية للدقائق الصغيرة والمتمثلة بالسمنت الابيض والكاؤولين والبالغة 30% ضمن الخلطة الكلية للخرسانة الى انخفاض في معدل حجم الحبيبات والتي تؤثر في خواص المنتج من حيث قيم التقلص الخطي بعد الحرق والكثافة والمقاومة قبل الحرق .

6. الاستنتاجات

من نتائج الفحوص المختبرية التي تم اجراءها على نماذج الخلطات المهيئة في البحث تبين الاتي:

1. امكانية استخدام البورسلينايت كركام خفيف الوزن بديلا جزئيا عن الركام الالومينى المتمثل بركام مخلفات الطابوق الحراري لانتاج خرسانة حرارية عازلة.
2. تم انتاج خرسانة حرارية عازلة مطابقة لمتطلبات المواصفة الامريكية ASTM C401/Class P بتقلص خطي لا يزيد عن 1.5% عند الحرق بدرجة حرارة 1150C° للخلطات المحتوية على ركام البورسلينايت بنسبة (10،15)%.
3. تم الحصول على خرسانة حرارية عازلة للخلطات المحتوية على ركام البورسلينايت بنسبة (15,10)% من مكونات الخلطة وبمعامل توصيل حراري قيمته (0.522,0.562)w/m.k° على التوالي.
4. كانت نسبة السمنت الابيض 25% المستخدم كبديل عن السمنت الحراري مناسبة لربط المكونات واكساب المنتج القوة اللازمة عند الاستخدام وبمعدل قيمته ($5(N/mm^2$) لمقاومة الانضغاط قبل الحرق.

7.االمراجع

1.Budnikov.p.p,(1964)."*The Technology of ceramics and Refractories*"،The M.I.T. press Massachusetts Institute of Technology, ch1, pp 109-111.

2. وليد ،خليفة،(2012)،"*الحراريات المتالورجية:الانواع والتركيبات الكيميائية*"، https://www.marefa.org.

3. *Accurate,(2014) . "Aluminum Oxide, Al_2O_3 Ceramic Properties"*.

4.L.A.D.Diaz,(2009)."*Hot bending strength and greep behavior at 1000-1400 C^0 Of hig alumina refractory Castables with Spinel, periclase and dolomite additions*", Journal of the European Ceramic Society,Vol 29,Issue 1,pp 53-58.

5.Morsy,Salah,Naje,(2011). *"Phase composition of bauxite-based refractory castables"*، Journal of Ceramics International,Vol 37,pp411-418.

6.Jose Manuel,Beatriz Gonzaleaz,Jacinto Alonso,(2017)."*Manufacturing of lightweight aggregate with Carbon fiber and mineral wastes"*, Journal of Cement and Concrete Composites,DOI:10.1016/j.cemconcomp,pp335-348.

7. W.N.dos،Santos,(2003)."*Effect of Moisture and Porosity on the Thermal Properties of conventional Refractories Concrete "* ,journal of the European Ceramic Society, pp745-755.

8.R.Demirboga,R.Gul,(2003)."*Thermal conductivity and Compressive Strength of Expanded Perlite Aggregate Concrete with Mineral Admixture"* ,Energy and Buildings ,pp 155-159.

9. I.A.Alton, (2001)."*Effect of Temperature on the Mechanical Properties of self – Flowing Low Cement Refractory Concrete",*Cement and Concrete Research, pp 1233- 1 237.

10. الجباري ،صبحي ،فيصل فراس ،عبد القادر فائزة،(1992). "الخرسانة الحرارية"،مركز بحوث البناء.

11. الحمداني ،فراس فيصل ،فائزة،(2000)."*انتاج المصبوبات الحرارية العازلة من مواد مصنعة محلي*" ، المؤتمر الاول للمواد السيراميكية وتطبيقاتها الهندسية ، ص 258- 271 .

12.S.B.Frade,G.Gomes,S.L.Correia,A.M.Segadaes,(2018)."Characterization of Refractory Ceramic Pressed Body Containing Industrial Waste", Materials Science Forum,ISSN1662-9752,Vol.912,pp 71-76.

13. ASTM C330،(2004)." *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete",ASTM* International,USA .

14. ASTM C29/C29M،97(2003)." *Standard Test Method for Bulk Density ,Unit Weight, and Voids in Aggregate"[1].ASTM* International,USA.

15. المواصفة القياسية العراقية رقم 5،(1984) ."*السمنت البورتلاندي*" .

16. ASTM C862،(1977) ."*Standard Practice for Preparing Refractories Concrete Specimen by Casting",* ASTM Internationa Standard,Vol.15.01,USA .

17. ASTM C401،(1991)." *Standard Classification of Alumina and Alumina-Silicate Castable Refractories"[1],* ASTM International Standards,Vol 15.01,USA.

18. ASTM C134،1995(1999)." *Standard Test Methods for Size, Dimensional Measurements, and Bulk Density of Refractory Brick and Insulating Firebrick"[1]*, ASTM International Standard, Vol 15.01,USA.

19. ASTM C133 ، (1997)." *Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories"* ,ASTM International,USA.

20. DIN 51068,(1976)." *Testing of Ceramic Materials, Determination of Resistance to Thermal Shock ,Water Quenching Method of Refractory Bricks "*,part 1.