



تحضير حراريات الالومينا النفاذة

رسالة تقدم بها

حكمت عدنان جواد المسلماوي

إلى مجلس كلية العلوم – جامعة بابل

وهي جزء من متطلبات نيل درجة ماجستير

علوم في الفيزياء

إشراف

د. غالب عبد الوهاب الدهش

د. فاضل عبد رسن

تموز ٢٠٠٦

رجب ١٤٢٧



Preparation of Permeable Alumina Refractories

A Thesis Submitted by

Hekmat Adnan Jawad Al-Musslimawi

To the Council of College of Science

University of Babylon

In Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Master of Physics

Supervisor

Dr. Fadhil A. Rasin

Dr. Galib A. Al-Dahesh

June ٢٠٠٦

Rajab ١٤٢٧

الإهداء

الى اختي العزيزة
د.كبرى عدنان السلساوي

حكيت

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

((هو الذي جعل الشمس ضياءً والقمر
نوراً وقدره منازل لتعلموا عدد السنين
والحساب ما خلق الله ذلك إلا بالحق يفصل
الآيات لقوم يعلمون))

صدق الله العلي العظيم

سورة يونس

(الآية ٥)

شكر وتقدير

اللهم لك الحمد حمداً يصعد اوله ولا ينفذ اخره، اللهم لك الحمد حمداً سرمداً لا انقطاع له ولك ينبغي واليك ينتهي فيّ وعليّ ولديّ ومعني وقبلي وبعدي وامامي وفوقي ، ولك الحمد على حلمك بعد علمك ولك الحمد على عفوك بعد قدرتك ، ولك الحمد باعث الحمد ولك الحمد وارث الحمد ولك الحمد قديم الحمد، اللهم فكما باركت لحبيبيك محمد في عترته وامته وكما غبنا عن ذلك ولم نشهده و أمنا به ولم نره صدقاً وعدلاً ان تصلي على محمد وال محمد وان تبارك على محمد وآل محمد كفضل ما صليت وباركت على ابراهيم وال ابراهيم انك حميد مجيد.

في البديء مالي الان اتقدم بجزيل شكري الى كل من الاستاذين

الدكتور فاضل عبد رسن و الدكتور غالب عبد الوهاب الدهش

لاشرفهما على رسالتى وافتحهما الابواب امامي بكل ما اوتيا من علم وصبر فلهم جزيل الشكر مني بالاصالة ومن جميع من يهتمهم امري، كما اشكر اهلي الذين احتضنوني في السراء والضراء واحرقوا انفسهم لينيروا لي الدرب امي وابي واخوتي

ولا يسعني الا ان اتقدم بالشكر الى العاملين في قسم الفيزياء رئيساً وكادراً، وبالخصوص اساتذتي الافاضل الذين رشفت منهم ما انا عليه الان، وكذلك زملائي من طلبة الدراسات العليا لدعمهم لي في جميع الظروف. كما اتقدم بالشكر الى كلية الهندسة-جامعة بابل وقسم العلوم التطبيقية-الجامعة التكنولوجية وكلية العلوم-جامعة النهريين و الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين لمدهم يد المساعدة لي لاتمام البحث. كذلك شكري الى الصديقين الاخوين محمد غانم وخضير عباس لما قدماه لي من العون خلال رحلة البحث. كما أشكر أخي الذي لم تلده أمي حسنين صاحب وأخيراً اود ان اشكر الست سهى لطباعتها هذه الرسالة

وعذراً لمن نسيت.....

حكمت

٢٣-٠٧-٢٠٠٦

الخلاصة

تم تحضير حراريات نفاذة باستعمال طورين من اطوار الالومينا (Alumina): (الكورندم و الكالساييد) ورمل الزجاج (Glass sand) فضلاً عن البنتونايت كمادة رابطة. استعملت نسب مختلفة من الالومينا في الخلطات بينما بقيت نسبة كل من رمل الزجاج والبنتونايت ثابتة. كان المقاس الحبيبي بالنسبة لنوعي الالومينا موزع على صنفين صنف خشن (Coarse) وصنف ناعم (fine) حيث تم تقسيم الخلطات المجموعتين متشابهتين بنسب الخلط مجموعة تحتوي على المقاس الخشن وسميت بالخلطات الخشنة والآخرى ذات المقاس الحبيبي الناعم وسميت بالخلطات الناعمة .

تم تشكيل النماذج بضغوط تشكيل مختلفة وهي (psi ٢٠١١ , ٤٠٢٣ , ٦٠٣٤ , ٨٠٤٥) وتم تجفيفها وبعد ذلك احترقت بدرجة 1400°C ولمدة اربع ساعات.

اجريت قياسات النفاذية (Permeability) والمسامية (Porosity) ونصف القطر الهيدروليكي (Hydraulic radius) كما تم قياس التوصيل الحراري (Thermal conductivity) ومتانة الانضغاط (Compressive strength)، ووجد بان النفاذية النوعية والمسامية تقل دائماً بزيادة ضغط التشكيل (وان الخلطات الخشنة ابدت نقصاناً بالنفاذية اكبر من الخلطات الناعمة بزيادة الضغط) بينما لا توجد علاقة واضحة بين ضغط التشكيل ونصف القطر الهيدروليكي الذي يعتبر مقياساً للتوزيع الحجمي المسامي للعينات. اما تأثير الحجم الحبيبي فوجد بان الخلطات الناعمة ابدت نفاذية ومسامية اكبر من الخلطات الخشنة، كما تزداد كل من النفاذية والمسامية بزيادة طفيفة بزيادة نسبة الكالساييد ونقصان الكورندم في النماذج، و لوحظ ان اكبر قيم للنفاذية والمسامية كانت centedarcy ٩٢.٤٦ و ٣٣% على التوالي.

اما من حيث خاصية التوصيل الحراري فوجد بانه يزداد بزيادة المسامية، بينما يقل التوصيل الحراري للعينات بزيادة ضغط التشكيل، اما تأثير الحجم الحبيبي فوجد بان الخلطات الناعمة قد ابدت توصيلاً اكبر من الخلطات الخشنة و تراوحت قيم التوصيل الحراري للحراريات النفاذة المحضرة بين (١ و ٥) W/mK لجميع الخلطات.

تم حساب متانة الانضغاط لجميع النماذج ووجد انها تتراوح ما بين ٥٠٠٠psi و ١١٠٠٠psi . ان الخلطات الناعمة اظهرت متانة انضغاط اعلى من الخلطات الخشنة. و ازدادت متانة الانضغاط بزيادة ضغط التشكيل وكانت هذه الزيادة اكبر في الخلطات الناعمة منها في الخلطات الخشنة

تمت اضافة ١% من مادة فلوريد الليثيوم (LiF) الى قسم من الخلطات ولوحظ تحسن في خواص الحراريات المحضرة حيث لم تتأثر النفاذية كثيراً بينما ازدادت قيم متانة الانضغاط في الخلطات المعالجة الى الضعف تقريباً.

وقد حللت النتائج التي حصلنا عليها وقورنت مع ما توفر لدينا من بحوث ودراسات منشورة.

Abstract

Permeable refractories have been prepared by using two phases of alumina (corundum and calcined), glass sand and bentonite as binder material. The alumina ratio was varied in mixtures but both of glass sand and bentonite stay constant. The grain size of both phases of alumina used was classified into two classes, coarse and fine. With respect to these classes the mixtures were divided into two groups, both are identical in mixing ratio, where the first groups contain the coarse grains that were named coarse mixtures, and the other groups contain the fine grains that were named fine mixtures.

The specimens have been shaped by using different pressing pressures (2011, 4023, 6034, 8045) psi, then they were dried and fired at 1400°C for 4 hr.

The specimens were tested for permeability, porosity, hydraulic radius, thermal conductivity and compressive strength.

It was found that the specific permeability and porosity always decrease with increasing of shaping pressure (in coarse mixtures the permeability decreasing is greatest), but there was no distinguish relationship between the shaping pressure and the hydraulic radius that is considered as an indicator for the pore size distribution of specimens.

On the other hand, it was found that the permeability and porosity of fine mixtures were greater than those of coarse mixtures, whereas they increased with the increasing of calcined ratio and the decreasing of corundum in mixtures. The largest values of the permeability and porosity were obtained to be 92.46 centedarcy and 33.3% respectively.

Thermal conductivity was found to increase with increasing of porosity whereas it decreased with increasing of shaping pressure. It was found that the thermal conductivity of fine mixtures was greater than that of coarse mixtures. The values of the thermal conductivity of the refractories used varied between 1-9 W/mK.

The compressive strength for all specimens were measured and found to vary between 9000-11000 psi. The fine mixtures have greater values of compressive strength than the coarse mixtures. The increasing of the shaping pressure leads to an increase of the compressive strength and this increasing was highest in the fine mixtures.

1% of LiF was added to some of the specimens. It was found that the properties of the prepared specimens improve, where the specific permeability does not affected markedly while the compressive strength is doubled.

قائمة المحتويات

I	قائمة المحتويات
IV	قائمة الأشكال
VII	قائمة الجداول
IX	قائمة الرموز

الفصل الأول: المقدمة

٢	الحراريات	١-١
٤	أنواع الحراريات	٢-١
٥	الحراريات الحامضية	١-٢-١
٦	الحراريات القاعدية	٢-٢-١
٨	الحراريات المتعادلة	٣-٢-١
٩	خواص الحراريات	٣-١
١٠	المقاومة الحرارية	١-٣-١
١٠	الروابط السيراميكية	٢-٣-١
١١	الاستقرارية البعدية	٣-٣-١
١١	المسلك التكنولوجي لصناعة الحراريات	٤-١
١٧	الحراريات النفاذة	٥-١
٢٠	الدراسات السابقة	٦-١
٢٣	الهدف من البحث	٧-١

الفصل الثاني: الجسم المسامي

٢٥	تعريف الجسم المسامي	١-٢
٢٧	المسامية	٢-٢
٣٠	التوصيلية الحرارية للأجسام المسامية	٣-٢
٣٤	الخواص الميكانيكية للجسم المسامي	٤-٢

الفصل الثالث: جريان الموائع في الأجسام المسامية

٣٧	معادلة الحركة	١-٣
٣٧	قانون دارسي	١-١-٣

٣٩	٢-١-٣	تعميم قانون دارسي
٣٩	١-٢-١-٣	في الوسط المتساوي الجريان
٤٠	٢-٢-١-٣	الوسط غير متساوي الجريان
٤٠	٢-٣	طبيعة الجريان
٤٠	١-٢-٣	الحدود القصوى
٤٣	٢-٢-٣	الحدود الدنيا
٤٤	٣-٢-٣	الجريان المضطرب
٤٥	٤-٣	النفاذية
٤٩	٥-٣	ظاهرة الانزلاق

الفصل الرابع: الجانب العملي

٥٢	١-٤	المواد الأولية
٥٢	١-١-٤	الكورندم (تايلر الومينا)
٥٣	٢-١-٤	كالساييد الومينا
٥٤	٣-١-٤	رمل زجاج أرضمة
٥٤	٤-١-٤	البيتونايت
٥٥	٢-٤	تحضير النماذج
٥٨	٣-٤	القياسات
٥٨	١-٣-٤	النفاذية
٧٣	٢-٣-٤	المسامية
٧٣	٣-٣-٤	التوصيل الحراري
٧٥	٤-٣-٤	مقاومة الانضغاط
٧٧	٤-٤	أضافة فلوريد الليثيوم

الفصل الخامس: النتائج والمناقشة

٧٩	١-٥	النفاذية والمسامية
٩١	٢-٥	التوصيل الحراري
٩٨	٣-٥	مقاومة الانضغاط
١٠٣	٤-٥	تأثير المضافات
١٠٤		الاستنتاجات

١٠٥

المقترحات

١٠٦

المصادر

قائمة الأشكال

٤	مديات درجات الحرارة للتطبيقات الصناعية للمواد الحرارية	١-١
١٠	عدد من المخاريط المختبرة	٢-١
١٢	المسلك التكنولوجي لصناعة الحرارية	٣-١
١٦	التغيرات الحاصلة في شكل وحجم كل من المسامات والحبيبات والتقلص اثناء التليد	٤-١
١٨	مخطط توضيحي للسداد المثبت في أسفل المغرفة	٥-١
٢٨	الرسم التوضيحي لأنواع المسامات	١-٢
٣٢	التركيب الهندسي للجسم المسامي حسب نموذج وحدة الخلية	٢-٢
٣٧	مرور الماء خلال مرشح رملي	١-٣
٤٢	تصنيف الجريان خلال الوسط المسامي	٢-٣
٤٤	الحدود الدنيا للجريان في الوسط المسامي	٣-٣
٤٥	العلاقة العملية بين معدل الجريان والانحدار J	٤-٣
٥٨	صورة فوتوغرافية لمنظومة النفاذية	١-٤
٧٤	صورة فوتوغرافية لجهاز قرص لي	٢-٤
٧٦	صورة فوتوغرافية لجهاز قياس مقاومة الانضغاط	٣-٤
٧٦	مراحل الاجهادات الميكانيكية التي تمر بها العينة	٤-٤
٨١	تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_1 بمعدل حرق $1400^{\circ}C/4hr$	١-٥
٨١	تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_2 بمعدل حرق $1400^{\circ}C/4hr$	٢-٥
٨٢	تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_3 بمعدل حرق $1400^{\circ}C/4hr$	٣-٥
٨٢	تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_4 بمعدل حرق $1400^{\circ}C/4hr$	٤-٥
٨٣	تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_5 بمعدل حرق $1400^{\circ}C/4hr$	٥-٥
٨٣	تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_6 بمعدل حرق $1400^{\circ}C/4hr$	٦-٥
٨٤	تغير النفاذية النوعية مع تغير نسب المكونات بثبوت ضغط التشكيل ٢٠١١ psi	٧-٥

٨٩	يمثل تأثير نسب المكونات في المسامية بثبوت ضغط التشكيل ٢٠١١ psi	٨-٥
٩٢	تغير التوصيل الحراري مع المسامية	٩-٥
٩٣	يمثل تأثير نسب الخلط في التوصيلية الحرارية للخلطات بثبوت ضغط التشكيل عند القيمة ٢٠١١ psi	١٠-٥
٩٤	تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_1 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١١-٥
٩٥	تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_2 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١٢-٥
٩٥	تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_3 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١٣-٥
٩٦	تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_4 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١٤-٥
٩٦	تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_5 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١٥-٥
٩٧	تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_6 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١٦-٥
٩٩	تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_1 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١٧-٥
١٠٠	تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_2 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١٨-٥
١٠٠	تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_3 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	١٩-٥
١٠١	تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_4 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	٢٠-٥
١٠١	تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_5 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	٢١-٥
١٠٢	تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_6 بمعدل حرق $1400^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$	٢٢-٥
١٠٢	تغير نسب المكونات في مقاومة الانضغاط عند ضغط تشكيل (٢٠١١ psi)	٢٣-٥

قائمة الجداول

٣	بعض الحرارية ودرجات انصهارها	١-١
٥٦	الحجم الحبيبي المختار للألومينا	١-٤
٥٧	نسب الخلط ونوع الخلطة للخلطات المحضرة	٢-٤
٦١	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{1a}	٣-٤
٦٢	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{1b}	٤-٤
٦٣	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{2a}	٥-٤
٦٤	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{2b}	٦-٤
٦٥	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{3a}	٧-٤
٦٦	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{3b}	٨-٤
٦٧	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{4a}	٩-٤
٦٨	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{4b}	١٠-٤
٦٩	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{5a}	١١-٤
٧٠	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{5b}	١٢-٤
٧١	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{6a}	١٣-٤
٧٢	حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{6b}	١٤-٤
٨٥	حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_1	١-٥
٨٦	حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_2	٢-٥
٨٦	حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_3	٣-٥
٨٧	حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_4	٤-٥
٨٧	حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_5	٥-٥
٨٨	حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_6	٦-٥
١٠٣	تأثير إضافة ١% LiF على الحرارية النفاذة	٧-٥

قائمة الرموز

δ	Pore Radius	قطر المسامة
k'	Thermal conductivity of porous media	معامل التوصيل الحراري للجسم المسامي
T	Temperature	درجة الحرارة
p	The pressure of pore fluid	ضغط المائع في المسامة
n	Porosity	المسامية
Q	Flow rate of fluid through porous media	معدل الجريان للمائع عبر الجسم المسامي
K	Hydraulic conductivity	التوصيلية الهيدروليكية
ρ	Fluid density	كثافة المائع
J	Hydraulic gradient	الانحدار الهيدروليكي
q	Specific discharge	الجريان النوعي
V	Fluid velocity	سرعة المائع
R_e	Reynolds number	عدد رينولد
μ	Fluid viscosity	لزوجة المائع
k	Permeability	النفاذية
m	Hydraulic Radius	نصف القطر الهيدروليكي
P	Piezometric pressure	الضغط البيزومتري
k_p	Specific permeability factor	معامل النفاذية النوعية
$C.S$	Compressive strength	مقاومة الانضغاط

الفصل الأول

المقدمة

الفصل الأول

المقدمة

Refractories

١-١ الحراريات

الحراريات هي مواد تحافظ على استقرارية خواصها المختلفة عند درجات الحرارة العالية، وهي قادرة على مقاومة التلف الفيزيائي والتآكل بوساطة المواد الكيميائية المهاجمة. وتمتاز الحراريات بدرجة انصهارها العالية، وتكون أغلبها عازلة عند درجات الحرارة المرتفعة كذلك لها القابلية للصمود أمام التلف الميكانيكي الناتج عن الحمل، هذا فضلاً عن أن مواردها الأولية متوفرة بشكل كبير في الطبيعة وخاصة الأكاسيد مثل CaO , MgO , SiO_2 . ويوضح الجدول (١-١) بعض المواد الحرارية مع درجات انصهارها ^[١].

تعد الأكاسيد من أهم الحراريات المعروفة، و تكون خاملة عندما تسخن بوجود الهواء، وهناك عدد كبير من المواد الحرارية مثل الكاربيدات (Carbides) والنتريدات (Nitrides) والبوريدات (Borides) هي مواد ذات مقاومة جيدة للحرارة، ولكن استعمالها قليل جداً وذلك بسبب كلفتها العالية وعدم استقراريتهما تجاه الأوكسجين ^[٢].

هنالك تصنيفان أساسيان للحراريات هي الحراريات الطينية (Clay) وغير الطينية (Nonclay). تنتج الحراريات الطينية من الطين الناري (Fireclay) والالومينا بنسبة (٥٧ إلى ٨٧.٥) %، وهناك مواد طينية أخرى تستعمل في إنتاج الحراريات تتضمن الكاؤولين، البنتونايت، الطين الكروي (Ballclay) وغيرها، أما الحراريات غير الطينية فهي تنتج من مركبات الالومينا بنسبة أكثر من ٨٧.٥ % والمولايت والكرومايت والمغنسايت والسليكا وكاربيد السليكون والزركون والمواد غير الطينية الأخرى ^[٣].

جدول (١-١) بعض الحرارية ودرجات انصهارها [١]

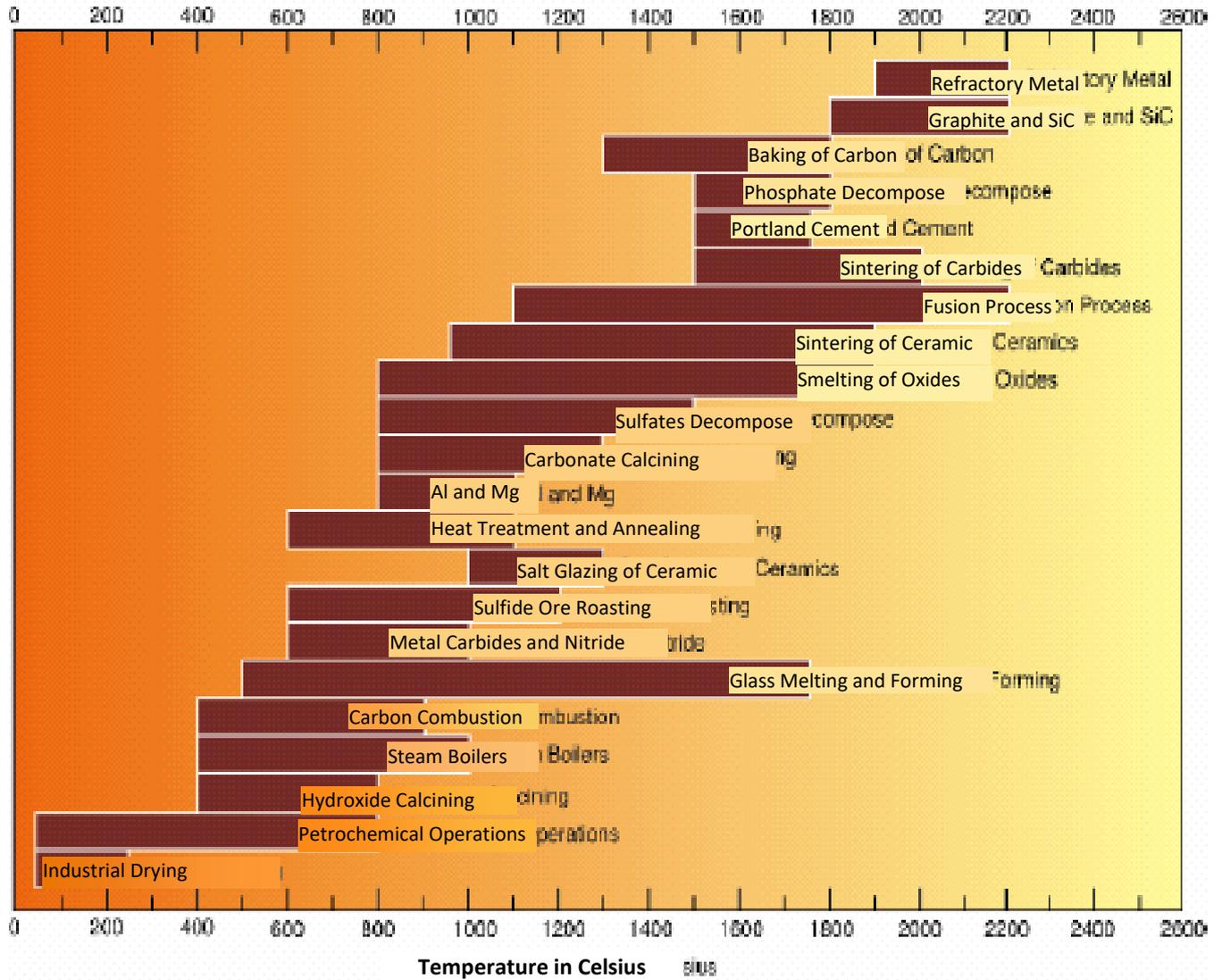
Cristobalite	SiO _٢	١٧١٠ °C
Corundum	Al _٢ O _٣	٢٠٥٠ °C
Periclase	MgO	٢٨٠٠ °C
Lime	CaO	٢٥٧٠ °C
Mullite	٣Al _٢ O _٣ .٢SiO _٢	١٨١٠ °C
Forsterite	Mg _٢ SiO _٤	١٨٩٠ °C
Spinel	MgAl _٢ O _٤	٢١٣٥ °C
Chromite	FeCr _٢ O _٤	٢١٨٠ °C
Carborundum	SiC	٢٢٠٠ °C
Graphite	C	٣٥٠٠ °C
Zircon	ZrSiO _٤	٢٥٥٠ °C
Zirconia	ZrO _٢	٢٧٢٠ °C
Beryllia	BeO	٢٥٢٠ °C
Thoria	ThO _٢	٣٠٣٠ °C

تصنف المواد الحرارية إلى ثلاث مجموعات بالاعتماد على المديات الحرارية لانصهارها وكالاتي:

١. مواد حرارية تنصهر عند ١٥٨٠ - ١٧٨٠ °C.
٢. مواد حرارية تنصهر عند ١٧٨٠ - ٢٠٠٠ °C.
٣. مواد حرارية تنصهر بأعلى من ٢٠٠٠ °C.

وداخل كل مجموعة من هذه المجموعات الثلاثة هنالك عدد من الأصناف الفرعية التي ترتب حسب تركيبها الكيميائي والوظيفة والخواص الفيزيائية مثل الكثافة والمسامية ... الخ [٤].

تستعمل المواد الحرارية في صناعة الأفران (Furnaces) والاتونات (Kilns) والمواقد (Stoves) والمجففات (Driers) والأجزاء الحرجة في المحركات النفاثة (Jet engines) [٤] ويبين الشكل (١-١) مديات درجات الحرارة للتطبيقات الصناعية للمواد الحرارية.



شكل (1-1) مدى درجات الحرارة للتطبيقات الصناعية للمواد الحرارية [1]

Refractories Types

٢-١ أنواع الحرارية

اعتماداً على الطبيعة الكيميائية للمكونات الأساسية للحراريات (غالباً ما تكون الأكاسيد ومركباتها). فإن الحرارية تصنف إلى ثلاث مجموعات هي: [1-3]

Acid Refractories

١-٢-١ الحرارية الحامضية

هي التي تتركب من مواد حامضية لذلك تكون ثابتة تجاه الحوامض لكنها تتفاعل مع القواعد، ومن الأمثلة على الحرارية الحامضية:

أ. حراريات سليكات الالومينا (Alumina Silicate)

تتكون هذه الحرارية عادة من الكاؤولينات ذات الصيغة الكيميائية $(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$ ومن نسبة قليلة من أكاسيد أخرى مثل أكسيد الحديد والمنغنيز وأكسيد التيتانيوم وغيرها.

ب. حراريات طابوق السليكا (Silica Bricks)

يحتوي طابوق السليكا الاعتيادي على حوالي (٩٥ - ٩٦)% من SiO_2 وكذلك كميات ضئيلة من الالومينا وشوائب أخرى من أطياف مصاحبة وتزداد مقاومته للحرارة عند إزالة الشوائب، إذ تغسل الصخور المستعملة لإزالة الطين العالق مما يؤدي إلى الحصول على طابوق السليكا بقدرة وكفاءة أداء عاليتين.

ج. حراريات الطين الناري (Fire Clay)

يدخل الطين الناري في جميع أنواع الحراريات الحامضية والمتعادلة والقاعدية وذلك حسب نسبة الالومينا الموجودة فيه فالحامضي منه يحتوي على أقل من ١٥% الومينا أما الباقي فهو في الأساس سليكا مع كمية ضئيلة من أكسيد الحديد والكلس والمغنيسيا والقلويات. يمكن أن تتحمل درجات حرارية تتراوح ما بين ١٦٠٠ - ١٧٠٠ م.

د. حراريات السليمانيت (Silimantic)

تمتلك الصيغة $\text{SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3$ وإذا كانت نقية تحتوي على ٦١% الومينا ودرجة انصهارها ١٨٥٠ م ويمكن أن تستعمل كمادة مقاومة للحرارة إلى حد حوالي ١٧٠٠ م.

٥. حراريات المولايت (Mullite)

يحتوي الميولايت على ٧٢٪ من Al_2O_3 ، أما صيغته الكيميائية فهي $2Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. يصنع طابوق المولايت بصهر المادة الغنية بالالومينا مثل البوكسايت مع الطين أو رمل السليكا بنسب تعطي تركيب المولايت وتستهلك حراريات المولايت كثيراً في معامل الزجاج. يمتلك طابوق المولايت مقاومة عالية تجاه الحمل المسلط كما يمتلك مقاومة عالية ضد التآكل الكيميائي.

٦. حراريات عالية الالومينا (High Alumina)

تحتوي هذه الحراريات على (٩٠ - ١٠٠)٪ الومينا وتصل درجة انصهارها إلى ٢٠٥٠ م°، وتتراوح درجة التشغيل القصوى لها بين (١٧٠٠ - ١٩٠٠) م°، وتعتمد على نسبة الالومينا في المحتوى، إن هذه الحراريات تكون ذات مقاومة شديدة للحرارة وصلابة ومتانة ميكانيكية عالية وتكون ثابتة أيضاً تجاه المهاجمات الكيميائية.

Base Refractories

١-٢-٢ الحراريات القاعدية

هي التي تتركب بصورة أساسية من مواد قاعدية لذلك فهي ثابتة تجاه المواد القاعدية ولكنها تتفاعل مع الحوامض ومن

الأمثلة:

أ. حراريات المغنسايت (Magnesite Refractory)

تحتوي حراريات المغنسايت على الأقل ٨٥٪ من أكسيد المغنيسيوم MgO ، الذي ينتج طبيعياً من المغنسايت الطبيعي (كربونات المغنيسيوم) $(MgCO_3)$ وكيميائياً من المغنيسيا الموجودة في مياه البحر. الشوائب الأساسية في هذا النوع من الحراريات هي الحديد والكالسيوم والسليكا. ينصهر أكسيد المغنيسيوم عند ٢٨٠٠ م° لكن الشوائب الموجودة فيه تضعف مقاومته العالية للحرارة.

ب. الكلس (Lime)

الكلس النقي هو أكسيد الكالسيوم CaO ومقاومته عالية ضد التآكل الناتج من الخبث (slag) إلا أنه قليل الاستعمال وذلك بسبب ميوله العالي للهدرجة مكوناً هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ عند درجة حرارة ٢٣٥٠ م، يمكن التخلص من هذه الحالة بإضافة مواد مقاومة للهدرجة إذ يستعمل أكسيد الحديد لزيادة مقاومة الهدرجة، أو التسخين بوجود غاز ثنائي أكسيد الكربون لتشكيل طبقة كربونات واقية.

ج. حراريات البريليا (Beryllia)

الصيغة الكيميائية للبريليا هي $(^3BeO.Al_2O_3.6SiO_2)$ ، و استعمال هذا النوع من الحراريات يكون محدود بسبب ميوله للتطاير خاصة بوجود بخار الماء، وقد يحدث التطاير حتى في درجات الحرارة الأقل من ١٠٠٠ م، كما يمتلك أكسيد البريليوم خواص ميكانيكية عالية وتوصيلية عالية للحرارة. ينبغي الانتباه عند تداول هذه المادة لأنها سامة.

د. حراريات الدولمايت (Dolomite)

صيغته الكيميائية $CaMg(CO_3)_2$ ، أغلب الدولمايت يتكون من إحلل أيونات المغنيسيوم محل الكالسيوم في الرواسب الكلسية نتيجة لملامسة المياه المعدنية بأيون المغنيسيوم، يتميز الدولمايت ببلوراته الخشنة، ووجود التجايف والفتحات الناتجة من آثار تفاعل المغنيسيوم مع كربونات المغنيسيوم. يمكن لحراريات الدولمايت أن تحتوي على المركبات الآتية: CaO و $CaO.SiO_2$ و $CaO.Fe_2O_3$ و $CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ و $CaO.Al_2O_3$.

٣-٢-١ الحراريات المتعادلة

Neutral Refractoris

وهي التي تكون ثابتة كيميائياً تجاه الحوامض والقواعد ومن أمثلتها:

أ. الحراريات الكروماتية (Chromatic Refractories)

الكرومايت (Chromite) مؤلف من أكسيد الحديد وأكسيد الكروم وصيغته الكيميائية $FeO.Cr_2O_3$ يحتوي على ٣٢٪ من أكسيد الحديد و٦٨٪ من أكسيد الكروم إذا كان نقياً، إذ يمكن أن يوجد في الطبيعة على الشكل $(Cr, Fe).Al_2O_3$ و يتوافر هذا الأخير في الطبيعة أكثر من الأول و يمكن استعمال حراريات الكرومايت كحاجز بين الحراريات الحامضية والقاعدية لمنع التفاعل المتبادل بينهما.

ب. حراريات الكروم-مغنيسايت (Chrome-Magnesite)

ينتج هذا النوع من الحراريات عند إضافة كاربونات المغنيسيوم إلى خام الكروم، وتعتمد نوعية المنتج على نسبة الكروم المضافة لذا يجب التمييز بين حراريات الـ (chrome-magnesite) وحراريات الـ (magnsite-chromite)، تحتوي حراريات الكروم-مغنيسايت على ١٥ - ٣٠٪ Cr_2O_3 و ٤٢ - ٥٠٪ MgO بينما في حراريات المغنيسايت-كرومايت هناك على الأقل ٦٠٪ MgO و ٨ - ١٨٪ Cr_2O_3 و كلا النوعين يستعمل في أفران صناعة الفولاذ.

ج. حراريات الزركونيا (Zirconia Refractories)

يوجد أكسيد الزركونيوم أو الزركونيا ZrO_2 في الطبيعة على نطاق ضيق ولكن يمكن الحصول عليه عادة من مادة سليكات الزركونيوم (الزركون $ZrSiO_4$). يعد الزركونيا عازل حراري جيد، يستعمل لصنع البنادق المقاومة للحرارة لأنه لا يتبل بالعديد من المعادن المنصهرة ويكون هذا الأكسيد أكثر استقراراً عند إضافة الجير.

د. كاربيد السليكون (Silicon carbide)

ينتج كاربيد السليكون SiC بتسخين رمل السليكا وفحم الكروك معاً، كاربيد السليكون مادة حرارية صلبة جداً ذات قدرة تحمل ميكانيكية جيدة في درجات الحرارة العالية ومستقرة كيميائياً ونظراً لصلابتها العالية فإنها تستعمل لأغراض التنعيم ولكونها موصل جيداً للحرارة فقد أصبحت ملائمة للاستخدام في الأفران والقضبان الحرارية كما تستعمل في صناعة أقطاب التسخين للأفران الكهربائية.

هـ. حراريات الكرافيت (Graphite)

يوجد الكرافيت في الطبيعة على شكل كاربون رخو ولكنه مقاوم جيد للحرارة ويقاوم بشدة التفاعلات الكيميائية كما يبدي ميلاً للتأكسد في درجات الحرارة العالية مكوناً ثنائي أكسيد الكربون، وهو موصل جيد للكهربائية وتمده الحرارة قليل ويمتاز بازدياد متانته بازدياد درجات الحرارة، يستعمل في العديد من الاستعمالات منها صنع البنادق، كما أن خصائصه الكهربائية تجعله ملائماً لإنتاج الأقطاب والفرشاة المستعملة في المحركات الكهربائية.

٣-١ خواص الحراريات

Properties of Refractories

تمتلك المواد الحرارية الخواص الآتية: [١٠، ٤]

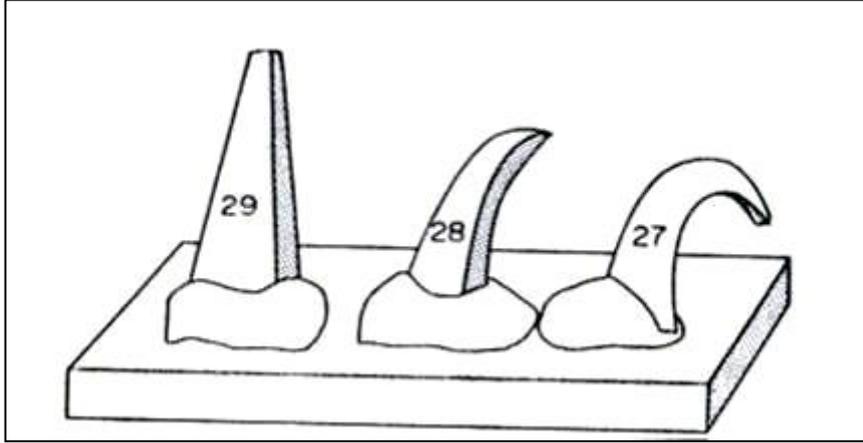
١. المقاومة الحرارية Refractoriness
٢. الروابط السيراميكية Ceramic bonds
٣. الاستقرار البعدية Dimensional stability

١-٣-١ المقاومة الحرارية

Refractoriness

هي قدرة المادة على الصمود أمام الحرارة دون حدوث أي تشوه تحت ظروف التشغيل، فبالاعتماد على درجات الحرارة فإن درجة حرارة نقطة التلين Softing point (أقل درجة حرارية تصبح المادة عندها قاسية rigid بالكامل) أو درجة حرارة نقطة الانصهار تعبر عن مقياس المقاومة الحرارية للمادة [1].

تقاس المقاومة الحرارية تطبيقياً بمقارنة تصرف المادة المشكلة على شكل مخروط صغير (Small cone) مع مخاريط من مادة أخرى، مخاريط قياسية تمتلك نقاط تلين معلومة، تسخن سوية تحت ظروف تشغيل مسيطر عليها. يتم تسجيل النتيجة بوساطة مقياس Pyrometric cone equivalent (PCE)، الذي يعني ببساطة رقم المخروط الذي يظهر أقرب تطابق للمخروط الخاضع للاختبار خلال زمن التلين، والشكل (٢-١) يوضح عدد من المخاريط المختبرة التي يمكن من خلالها أن نفهم المبدأ.



شكل (٢-١) يوضح عدد من المخاريط المختبرة [4]

Ceramic Bonds

٢-٣-١ الروابط السيراميكية

يمكن أن تُعرف على أنها الطور الزجاجي المتكون أثناء تبريد السائل المتكون من المركبات القابلة للانصهار داخل الخليط أثناء الحرق. إن زيادة هذه الروابط يزيد من الاستقرارية الحجمية (البعديّة) للمنتج عند استعماله بدرجات حرارية عالية.

إن وجود الروابط السيراميكية يؤدي إلى ازدياداً كبيراً في مقاومة الشد ويقلل من المقاومة الحرارية لذلك ففي التطبيقات التي تحتاج إلى مقاومة عالية لدرجات الحرارة يجب أن تكون كمية الطور الزجاجي أقل بالمقارنة مع الحرارية المستعملة في التطبيقات التي تكون فيها صفة مقاومة الشد هي المطلوبة. إن التحكم بالطور الزجاجي المتكون داخل المادة يكون بوساطة التحكم بمعدل التبريد للعينات المحروقة.

Dimensional Stability

٣-٣-١ الاستقرارية البعدية

يمكن تعريفها على أنها المقاومة التي تبديها المادة تجاه أي تغيير بالحجم عندما تتعرض إلى درجات حرارة عالية لفترة طويلة.

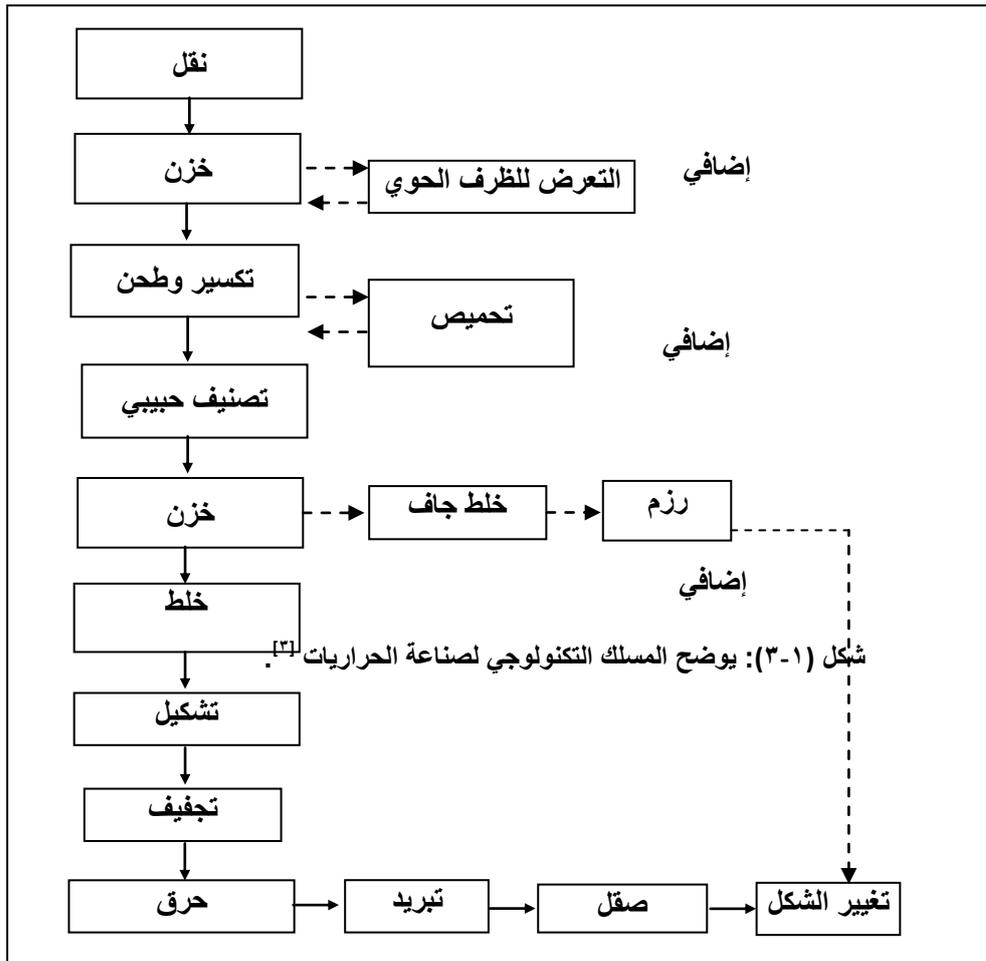
إن المواد الحرارية تميل إلى التقلص أو التمدد عند التسخين ليس فقط بسبب التصرف الفيزيائي الطبيعي لأي مادة مركبة ولكن كذلك بسبب التفاعلات الفيزيوكيميائية والتليد وأي تأثير يحصل خلال الحرق، وعملية التسخين والضغوط الناتجة عن وزن أجزاء الفرن والصدمة الحرارية (Thermal shock) الناتجة عن التسخين السريع أو التبريد السريع والاجهادات الأخرى الناتجة عن التغير في درجات الحرارة والتلف الميكانيكي الناتج عن حركة محتويات الفرن والتأثير الكيميائي بوساطة الأجسام (الصلبة أو السائلة أو الغازية) الساخنة، كل هذه الظروف تسهم في حصول تغيرات في أبعاد القطعة الحرارية، لذلك فإن المواد الحرارية يجب أن تمتلك مقاومة كافية تجاه تلك الظروف.

٤-١ المسلك التكنولوجي لصناعة الحرارية

Technological Procedure for Refractories Manufacture

تتضمن صناعة الحراريات أربع عمليات هي تهيئة المواد الأولية Raw Material Processing التشكيل Forming الحرق Firing والعمليات النهائية Final Processing والشكل (٣-١) يوضح خطوات صناعة الحراريات.

تتضمن تهيئة المواد الأولية التكسير Crushing والطحن Grinding، متبوعة بالتصنيف الحجمي size Classification أو ما يسمى بالنخل (Sieving) والتجفيف (Drying) إذا كان ضرورياً، أحياناً تخلط مع مواد ومركبات كيميائية أخرى بعد ذلك تكيس وتكون على شكل منتج، والعمليات التي تتبع النخل قد تكون غير مطلوبة في بعض أنواع الحراريات. أما التشكيل فيتضمن خلط المواد الأولية وتشكيلها بأشكال مرغوب بها، هذه العملية تحدث تحت ظروف الترطيب (under wet). في حين يتضمن الحرق تسخين المادة إلى درجات حرارية عالية لتشكيل الأواصر السيراميكية التي تعطي المنتج خواصه الحرارية^[٣].



يعرف المسار التكنولوجي لتشكيل الأجسام السيراميكية ومنها الحرارية بالخطوات التالية: [١٦-١١]

١. الطحن (Milling)

تعرف على أنها تقليل الحجم الحبيبي بواسطة قوى ميكانيكية لها دور أساسي في الحصول على توزيع حجم حبيبي مناسب للمنتج، وتأتي هذه العملية عادة بعد التكسير.

هنالك العديد من وسائل الطحن فمنها على سبيل المثال الطحن بالقضبان (rod mill) والطحن بالكرات (ball mill) والطحن بالالة الساحنة القرصية والطحن بالمطرقة وغيرها. تعد عملية الطحن بالكرات هي الأكثر استعمالاً لسهولة العمل بها، وطواحين الكرات هي عبارة عن أواني (حاويات) بورسلينية مزججة بداخلها كرات مصنوعة من الالومينا اسطوانية الشكل تدور بشكل أفقي محوري بواسطة قضيبين اسطوانيين يدوران بواسطة محرك كهربائي. إن ميكانيكية الطحن تتم من حركة سقوط الكرات على المادة المراد طحنها جراء دوران الحاوية، وللحصول على فعالية عالية ونتائج أفضل للطحن لا بد من اختيار حجم حاوية مناسب مع حجم المادة المراد طحنها وكذلك حجم وعدد كرات الطحن وسرعة الطحن، فضلاً عن الأخذ بعين الاعتبار بعضاً من العوامل المهمة عند الطحن منها مدة الطحن للوصول إلى الحجم الجسيمي المطلوب.

٢. النخل (Sieving)

تعرف هذه العملية على أنها عملية التصنيف الحجمي للجسيمات، إذ تستعمل تقنية النخل للسيطرة على مدى حجم الحبيبة. إن الحجم الحبيبي للمساحيق له تأثير كبير في تحديد خواص المنتجات الحرارية لأنه يؤثر في المساحة السطحية للتلامس بين الحبيبات التي تعد عاملاً مهماً في التفاعلات الكيميائية وعملية التلبيد، إذ يمكن التحكم بمسامية المنتج من خلال اختيار الحجم الحبيبي.

٣. الخلط (Mixing)

هي عملية خلط المواد الخام المختلفة بنسب ودرجة نعومة معينة، وإنتاج خليط يحتوي على نسبة من الماء والقوام المطلوبين. ويعد الخلط مرحلة مهمة من مراحل التصنيع وذلك كي تتجانس المواد الخشنة والمتوسطة والناعمة بشكل جيد وينسب معينة معطية الجسم الخواص الفيزيائية والميكانيكية الضرورية.

٤. الترطيب (Wetting)

تتطلب صناعة المواد الحرارية كصناعة الطابوق، والحراريات وغيرها إضافة الماء إلى الخلطة لتسهيل عملية تشكيلها. ولكل نوع من أنواع الخلطات حد معين لكمية الماء المضافة فإذا زادت عن هذا الحد تصبح العجينة أقرب إلى الحالة السائلة ويصعب تشكيلها فضلاً عن ظهور مشاكل التجفيف والحرق، إذ تحتاج هذه العمليات إلى طاقة إضافية تبخر الماء أثناء التجفيف. أما إذا قلت كمية الماء المضافة تصبح المادة ضعيفة التشكيل غير متماسكة. أما إذا أضيف الماء ضمن الحدود المسموح بها فحصل على لدونة جيدة (Plasticity)، تعرف اللدونة على أنها قدرة المادة الصلبة على التفاعل مع القوى الخارجية المؤثرة فيها بحيث يبقى التغيير الحاصل في شكل المادة ثابتاً شرط ألا تكون هذه التغييرات مصحوبة بتشققات.

٥. عملية الكبس (Compressing)

يقصد بعملية الكبس، عملية تصنيع الأجسام الحرارية والسيراميكية بشكل وأبعاد معينة، وهناك طرائق عدة لتحضير النماذج الحرارية من أهمها: (تمثل النسب ما بين القوسين نسبة الرطوبة في كل طريقة).

Plastic method	أ- الطريقة اللدنة (١٨ - ٢٢) %
Semi-dry pressing	ب- الطريقة شبه الجافة (٩ - ٤) %
Dry pressing	ج- طريقة الكبس الجاف (٤ - ٠) %
Slip casting	د- طريقة الصب الانزلاقي (٣٠ - ٢٥) %

تكمّن أهمية الكبس في تحديده مقدار رص الحبيبات المسؤولة عن الخواص الميكانيكية والفيزيائية.

٦. التجفيف (Drying)

هو معاملة الأجسام الرطبة حرارياً ولمدة زمنية معينة وفي درجات حرارة تتراوح بين (٥٠ - ١٠٥) م وبحسب نوع المادة الأولية ونسبة الرطوبة فيها إذ تكون نسبة الرطوبة في النماذج المجففة (٢ - ٢٥) % من الرطوبة الابتدائية.

يحدث التجفيف على مرحلتين، يتم في المرحلة الأولى فقدان الماء الموجود في المسامات فينقل الماء من خلال المسامات إلى سطح الحبيبات ليحل محل الماء الذي تبخر من السطح ويحل الهواء محل الماء الموجود في المسامات، أما في المرحلة الثانية ففيها يفقد الماء المشكل للطبقة العازلة بين دقائق المادة.

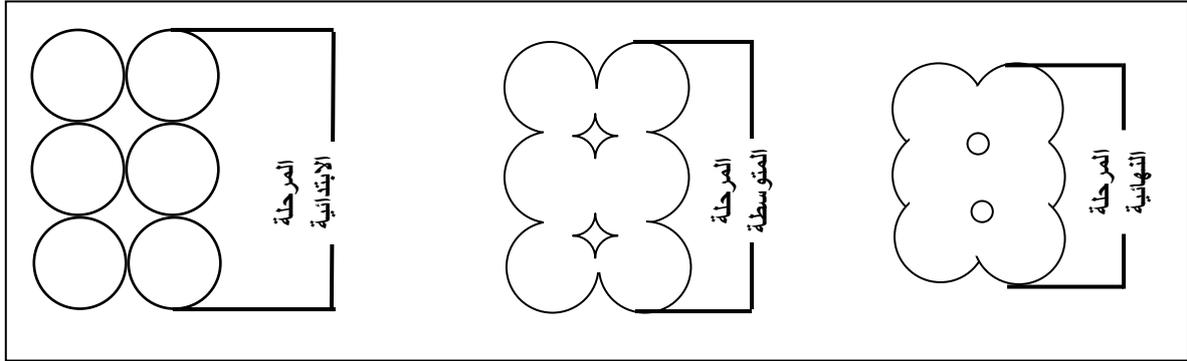
٧. التلييد (Sintering)

هي عملية معاملة حرارية تجري على المادة المتبلورة أو غير المتبلورة لتحويلها إلى مادة متماسكة واكتسابها خاصية مقاومة الانضغاط، ومن الظواهر التي تحصل في أثناء مرحلة التلييد هي: التقلص Shrinkage والنمو الحبيبي Grain Growth وتقلص المسامات Pore shrinkage.

إن عملية التلييد أهمية كبيرة في تأثيرها على خواص المنتج كالمتمانة والموصلية الحرارية ... الخ، فمثلاً المواد الحرارية تزداد مقاومتها الميكانيكية بعد عملية التلييد و التي تحدث بثلاث مراحل.

- المرحلة الابتدائية: وفيها يتغير شكل المسامة فتصبح على شكل قنوات أو كرات معزولة وهذا بسبب تكون الأعناق (Necks) على نقطة تماس الجسيمات، وليس من الضروري تغيير حجمها، وبعدها تصبح المسامات أكثر كروية في الشكل وأصغر في الحجم باستمرار عملية التلييد وتبقى الحبيبات المختلفة متميزة.
- المرحلة المتوسطة: وفيها تتسع الأعناق ويتكون تركيب له ثقب متواصلة.

- المرحلة النهائية: خلال هذه المرحلة تنعزل الثقوب ويتلاشى الاتصال بين الثقوب مما يؤدي إلى نهاية الانتقال عن طريق السطح أو التبخر. كما أن التحام الحبيبات والنمو الحبيبي يؤديان إلى تناقص الطاقة السطحية. ويوضح الشكل (٤-١) التغيرات الحاصلة في شكل وحجم كل من المسامات والحبيبات والتقلص.



شكل (٤-١) يوضح التغيرات الحاصلة في شكل وحجم كل من المسامات والحبيبات والتقلص أثناء التلييد^[١٦]

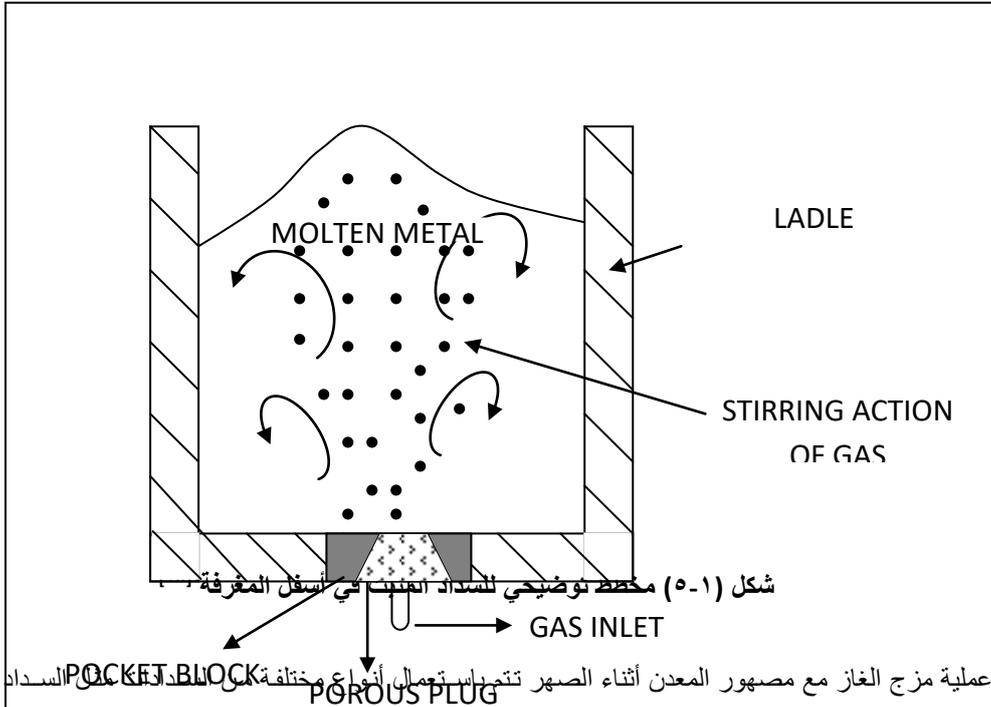
إن السبب الرئيس لحدوث التلييد يعود إلى التركيب الأساس للبلورة إذ أن الذرات على سطح المادة لها طاقة أعلى من تلك التي في كتلة المادة لأنها ترتبط من جهة واحدة بالذرات الأخرى ولذلك تكون في حالة غير متوازنة وكلما كانت المساحة السطحية للنموذج أكبر تكون النسبة بين الذرات على السطح إلى الذرات الداخلية أكبر وبذلك تكون الطاقة السطحية للمسحوق أكبر وبعد عملية الحرق تنخفض هذه الطاقة السطحية بشكل كبير. إن هذا الانخفاض في الطاقة هو القوة الدافعة لعملية التلييد^[١٧].

٥-١ الحراريات النفاذة

Permeable Refractories

هي المواد التي يتكون بداخلها مسامات تسمح بمرور الموائع عبرها وتكون هذه المسامات إما منفصلة أو متصلة إذ تدخل عوامل عديدة في عملية التصنيع تحدد سعة المسامات وعددها وطبيعتها، وتستعمل مثل هذه الحراريات بتقنيات معاملة الغاز مع مصهور المعدن، إذ يدخل الغاز عن طريق سداد (Plug) نفاذ يثبت في أسفل المغرفة (ladle) المحتوية على الفولاذ أو الحديد المصهور، والشكل (٥-١) يمثل مخطط توضيحي لهذا السداد المثبت في أسفل المغرفة، فعندما يعمل السداد كناشر للغاز، يكون مسارات من فقاعات الغاز الناعمة في سائل المعدن، فتؤدي الحركة التصاعدية لمسارات فقاعات الغاز امتزاج قوي لسائل المعدن محققة المميزات التالية: [٢٠٠١٨].

١. إزالة الغازات المحصورة في أصل المعدن.
٢. إزالة المحتويات غير المعدنية.
٣. تقليل زمن اتمام عملية الصهر.
٤. حصول تجانسية المصهور بالنسبة لدرجة الحرارة والتركيب الكيميائي.
٥. زيادة الطبقة السطحية الفاصلة بين المعدن والخبث (slag).
٦. تقليل تكون الخبث أثناء التسخين.
٧. تقليل التلف الحراري.
٨. تعمل الفقاعات كعامل مساعد في اخضاع المعدن.
٩. وصول النظام ككل إلى حالة التوازن بسرعة كبيرة.



إن عملية مزج الغاز مع مصهور المعدن أثناء الصهر تتم باستخدام أنواع مختلفة من السدادات المسامية (Porous Plug) والسدادات متعددة المداخل (Multi Hole Plug) والسداد مفرد الأنابيب (Single pipe plug). وتعد هذه التقنية الآن أكثر انتشاراً من الماضي إذ استعملت أولاً منذ أربعين سنة تقريباً في تقنيات تنقية الفولاذ فقط أما الآن تستعمل في صناعة الألمنيوم والنحاس فضلاً عن الحديد والفولاذ [٢٠].

وعلى الرغم من انتشار هذه التقنية في مختلف أرجاء العالم إلا أن الخلل الناتج من عمليات تركيب السدادات وكذلك فقر نوعية الحرارية المصنعة بما يخدم هذه التقنية أدى إلى ازدياد البحث في هذا المجال لجعل هذه التقنية متميزة اقتصادياً، إذ أن السدادات النفاذة يجب أن تمتلك على الأقل نفس عمر بطانة المغرفة ladle lining أي ١٥ إلى ٢٠ تشغيلاً لتطبيقات الفولاذ وحوالي ٥٠ تشغيلاً لتطبيقات الحديد، وكانت السدادات المصنعة في السبعينات من القرن الماضي تدوم لـ ٤ أو ٥ تشغيلات فقط.

إن حراريات الألومينا النفاذة المستعملة في مغرفة صهر الفولاذ والحديد يجب أن تمتلك نفاذية عالية لدخول كميات كافية من الغاز إلى المغرفة، كما إن حجم المسامات يجب أن يكون صغيراً بما فيه الكفاية لمنع تسرب سائل المعدن إلى داخل المسامات، و القطعة الحرارية يجب أن تكون قوية بما فيه الكفاية لمقاومة الاجهادات والتآكل على الأقل بعمر البطانة نفسه [١٨].

تستعمل الحراريات النفاذة ذات الحجوم الحبيبية الناعمة عندما تثبت في أسفل مغرفة الصهر في إزالة الكبريت من الحديد اللدن، وفي هذه العملية يضاف كاربيد الكالسيوم (Calcium carbide) إلى الحديد المصهور بينما يحرك المعدن بوساطة غاز النتروجين الذي يضخ خلال السداد المسامي، عندها سوف يتفاعل CaC_2 مع الكبريت الموجود في الحديد ليشكل CaS و CaO ، كل من CaS و CaO تذوب في الخبث بينما يذوب الكاربون الحر في الحديد. هذه العملية تحصل خلال ٢ - ٥ دقيقة [١٦].

ومن الاستعمالات الأخرى للحراريات النفاذة هي القلوب الرملية (Sand cores) إذ تستعمل هذه التقنية في مجال واسع في أغلب أنواع عمليات صب المعادن، فوجود القلب الرملي يسمح بحصول أشكال معقدة ورقيقة للصب، لذلك تعتبر نوعية القلب الرملي المحور الأساسي في الصناعات المعدنية الحديثة، يغطي هذا القلب عادة بطلاء حراري ليمنع اختراق القلب من قبل المعدن المنصهر وكذلك يتحمل التشوه أثناء التسخين كما يعطي للمعدن المصبوب صفة النعومة.

هذا الطلاء يكون عادة مزيج من مواد حرارية، روابط، سوائل حاملة (ماء أو كحول)، سليكا، ألومينا، زركون، كرومايت، ألومينا-سيليكات مثل الميولائيت، وكذلك البيروفيلايت كمركبات حرارية. بعض الروابط تزيد قوى التماسك والتلاصق قبل التجفيف، أما التقوية فتحصل بعد التجفيف وأثناء صب المعدن، بعد التجفيف يجب أن تمتلك طبقة الطلاء نفاذية كافية لتهرب الغازات المتكونة.

إن سمك هذا الطلاء ما بين (٠.٨٠ - ٠.٢٥) ملم، عند تصنيع هذا القلب الرملي تكون مادة الطلاء على شكل سائل أما القلب الرملي فما هو إلا مادة مسامية إذ تغمر هذه المادة المسامية في سائل الطلاء، إن المواد المكونة لسائل الطلاء سوف تتسرب إلى مسامات القلب الرملي وتحصل عملية التغطية Coating [٢١].

٦-١ الدراسات السابقة Literature Survey

قام كل من (Bakker) و (Snyder) عام (١٩٧٠) [١٨] بتحضير حراريات الالومينا النفاذة باستعمال الالومينا والسليكا كمواد أولية وبمدى واسع من الأحجام الحبيبية، كما درس تأثير زيادة كل من ضغط التشكيل وضغط الغاز على نفاذية ومسامية العينات والتركيب المجهري للحراريات المصنعة، واستنتج كذلك أن إضافة كمية قليلة من ملح فلوريد الليثيوم LiF يؤدي إلى تحسين نوعية العينات الحرارية المصنعة.

كما درس كل من (Zoback) و (Byerlee) عام (١٩٧٥) [٢٢] تأثير ضغط الاحتجاز (Confining Pressure) وضغط المسامة (Pore pressure) على خاصية النفاذية للوسط المسامي فوجدوا بأن زيادة ضغط الاحتجاز الناتج عن الإجهاد الخارجي الذي يسببه ضغط الغاز يؤدي إلى انخفاض قيم النفاذية، ولكن هذه الأخيرة تزداد مع زيادة ضغط المسامة، كما وأن ضغط المسامة يؤثر بشكل أكبر من تأثير ضغط الاحتجاز، إن ضغط المسامة يكون ناتج عن تأثير ضغط الغاز أيضاً والسبب في تأثيره الكبير على النفاذية هو اعتماده بصورة رئيسة على انضغاطية (compressability) الغاز.

في عام (١٩٨٧) قام Pulkrabek [٢٣] بدراسة تأثير درجة الحرارة في نفاذية المواد المسامية عملياً، ومدى درجات الحرارة المستعمل هو K (١٥٢٠ - ٢٥٥) تحت ضغط ١ atm، أما الوسط المسامي فكان أكسيد الالمنيوم (الالومينا) ذا مسامية تتراوح بين ٤٩.٨ - ٣٨.١ % والغازات المستعملة هي الهواء والنيتروجين والهيليوم والاركون. فوجد أن ظاهرة التسرب (Slip) هي المسؤولة عن التغيير في نفاذية الوسط المسامي، إذ تعتمد هذه الظاهرة على معدل المسار الحر للغاز المستعمل وهذا بدوره يتأثر بدرجات الحرارة، لذلك فإن زيادة درجات الحرارة تؤدي إلى زيادة النفاذية.

في عام (١٩٨٨) قام كل من Reed و Lukasiewics [٢٤] بتحضير حراريات نفاذة باستعمال أربعة أنواع من الالومينا مختلفة الحجم الحبيبي مع حامض الفوسفوريك H₃PO₄ بنسب تتراوح بين ١٪ - ١٣٪ wt ودراسة تأثير تغيير نوع الالومينا وتغيير نسبة الـ (H₃PO₄) وكذلك تغيير ضغط التشكيل على النفاذية والتوزيع الحجمي المسامي للعينات المنتجة. فوجدوا بأن زيادة ضغط التشكيل يؤدي إلى انخفاض قيم النفاذية كما يؤدي إلى اختزال العديد من الحجوم المسامية وتركيزها ضمن حجم واحد أو أحجام قليلة بينما يؤدي نقصان ضغط التشكيل إلى اتساع مساحة التوزيع الحجمي المسامي في الحراريات النفاذة.

وفي عام ١٩٩٦ طوّر Wang وجماعته [٢٩] استعمال السداد المسامي بوضعه في رأس الممر (Shroud) الذي ينقل المعدن المصهور من المغرفة الأولية (Ladle) إلى الحوض الثانوي (tundish) إذ يهيأ إلى عمليات الصب، وبذلك تحدث عملية التنقية بصورة أسرع، ولكن مساوئ التركيب والعوامل الهندسية تضاعفت. إن المنتج المصنع بهذه العملية لا يحتاج إلى حمل درجات حرارية عالية جداً لأن عملية التنقية لا تحدث أثناء الصهر.

وفي عام (٢٠٠٣) قام كل من (Filzwieser) و (Wallner) [٢٠] بدراسة المزايا المستحصلة من استعمال الأنواع الثلاثة للسدادات المسامية وهي porous plugs و multihele plugs و single pipe plugs في أنظمة أفران الـ COPKIN و AL-KIN الخاصة بمعالجة كل من النحاس والالمنيوم والمعتمدة استعمال أحد الغازات: النتروجين، الاركون، الهواء، النتروجين مع الهواء، النتروجين مع الهيدروجين، الاركون مع الكلورين، النتروجين مع الاركون كغاز مطهر ومنقي للمعدن المصهور فوجدوا بأن غاز الاركون أبدى أفضل النتائج.

كما درس Bao وجماعته (٢٠٠٣) [٢٥] تصرف الفقاعات الصغيرة داخل مصهور المعدن باستعمال نموذج (الماء-الهواء) فوجدوا بأن قطر الفقاعات يتراوح بين (٠.٥ - ١) mm وأقل من ٠.٥ mm عند معدلي الجريان ٠.٠٠٦ و ٠.٠١٢ m³/s على التوالي. وأوضحوا كيفية التصاق الفقاعات الصغيرة مع الشوائب الموجودة في المصهور وأخذها إلى سطح المعدن للتخلص منها وذلك عن طريق ضخها من خلال السداد الحراري المسامي المركب في أسفل المغرفة.

وفي عام (٢٠٠٣) طبق كل من (Bakhtiyarov) و(Overfelt) ^[٢١] نظرية حفظ الكتلة كنموذج رياضي لدراسة كيفية انتقال مكونات سائل الطلاء المستعمل لطلاء القلوب الرملية المستعملة في قوالب صب المعادن، إذ قاما بتطبيق معادلة حفظ الكتلة على كل مركبة من مركبات مواد الطلاء $\frac{\partial C_i}{dt} + \nabla \cdot (C_i V_i) = 0$ حيث C_i تركيز المركبة i ، V_i السرعة الحقيقية لجسيمات المركبة i .

واستعمل (Alexiadis) وجماعته (٢٠٠٤) ^[٢٦] نموذج (الماء-الهواء) لتخمين حجم الفقاعات الناتجة من سدّادات مسامية مختلفة، إذ استبدلوا مغرفة الصهر بحوض اسطواني قطره ٠.٥ m وارتفاعه ٠.٥ m وارتفاع الماء فيه ٤٠٠ mm وهو بديل عن مصهور المعدن، كما قاموا بتطبيق دالة الاحتمالية $f(V, x, t) dv$ على الأنموذج المستخدم لمعرفة وتحديد الموقع والحجم المحتمل للفقاعة عند زمن معين فوجدوا بأن في معدلات الجريان القليلة يكون حجم الفقاعة تقريباً أقل أو أكثر من ٢ mm ويقل هذا الحجم بزيادة معدل الجريان.

٧-١ الهدف من البحث

Aim of Study

١. تحضير نماذج حرارية نفاذة، تمتلك الخصائص الفيزيائية (النفاذية والمسامية) والخصائص الحرارية والميكانيكية المطلوبة للنماذج المستعملة في تنقية المعادن المصهورة (الفولاذ والحديد).
٢. إمكانية استعمال مواد محلية، وامتلاك الجهد المعرفي في تطويع المواد الأولية في التحضير.
٣. تعريف مفاهيم النفاذية ونصف القطر الهيدروليكي من خلال إجراء القياسات التي تعمق الفهم المرتبط بتشكيل الأجسام السيراميكية المسامية النفاذة.

الفصل الثاني

الجسم المسامي

الفصل الثاني

الجسم المسامي

١-٢ تعريف الجسم المسامي Definition of the Porous Media

الوسط المسامي هو جسم صلب يحتوي على مسامات، تعرف المسامات على أنها الفجوات الفارغة المرتبة داخل الجسم المسامي، الفراغات الصغيرة في الصلب تسمى الصدوع الجزيئية (molecular interstics)، والفراغات الكبيرة تسمى الكهوف أو الغارات (caverns)، في حين تدعى الفراغات التي تمتلك حجماً متوسطة ما بين الاثنين بالمسامات.

والمسامات في الأنظمة المسامية إما أن تكون متصلة (interconnected) أو منفصلة (non-interconnected) يمكن للمائع أن يمر خلال الجسم المسامي إذا كان على الأقل جزء صغير من الفضاء المسامي من نوع المسامات المتصلة والتي تسمى في النظام المسامي بالفضاء المسامي الفعال (effective pore space).

تتنوع الأنظمة المسامية مع تنوع المواد المكونة للجسم المسامي، فلا يمكن للجسم المسامي أن يمتلك نوع واحد من الأنظمة المسامية، وعليه تقسم الأنظمة المسامية إلى: الفراغات (voids) والأنابيب الشعرية (capillaries) والفضاءات الاقتحامية (force space).

إن جدران الفراغات لا تمتلك تأثير على ظاهرة الحركة المائية (hydrodynamic phenomenon)، بينما تؤثر جدران الأنابيب الشعرية على ظاهرة الحركة المائية وبدون الأخذ بنظر الاعتبار التركيب الجزيئي للمائع، أما في الفضاءات الاقتحامية فيؤخذ التركيب الجزيئي للمائع بنظر الاعتبار. فضلاً عن ذلك فإن الفضاء المسامي يمكن تقسيمه إلى مرتب (ordered) وغير مرتب (disordered) أو متفرق (disapers) كحوض ملحي ومتصل (connected) [٢٧-٢٩].

هناك طريقة واحدة لتحديد حجم المسامات الذي يعرف (بالتوزيع الحجمي المسامي) (pore size distributions) وهي بتحديد قطر المسامة (pore diameter) (δ) ويعرّف قطر المسامة لأي نقطة داخل الوسط على أنه قطر أكبر كرة تحتوي تلك النقطة والتي تبقى كلياً داخل الوسط المسامي وبوضع قطر مسامي لكل نقطة داخل الفضاء المسامي فإن التوزيع الحجمي المسامي يمكن أن يُعرّف بوساطة جزء الفضاء المسامي α الكلي الذي يمتلك أقطار مسامية تقع بين δ و $\delta + d\delta$ وبذلك يعطي التوزيع الحجمي المسامي بوساطة الدالة العيارية [٣٠]:

$$\int_{\delta}^{\infty} \alpha(\delta) d\delta = 1 \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

$$\text{or: } f(\delta) = \int_{\delta}^{\infty} \alpha(\delta) d\delta = 1 \quad , f(0) = 1 \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

إذ $f(\delta)$ هي دالة التوزيع الحجمي المسامي.

وبسبب عدم وجود بُعد منفرد يمكن أن يشار إليه بتحديد حجم أو شكل المسامات، ومن الملائم أن نتصور شكل المسامة كأنبوب شعري اسطواني قصير، وبذلك فإن الضغط اللازم لإجبار السائل غير المرطب (non wetting liquid) مثل الزئبق للدخول إلى فضاء المسامة يمكن أن يرتبط مع قطر المسامة δ بالعلاقة الآتية: [٣٧]

$$\delta = 4\sigma \cos \theta / P_c \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

إذ δ قطر المسامية المكافئ الذي يجتازه السائل غير المرطب.

θ زاوية التماس.

P_c الضغط اللازم لإجبار السائل على الاختراق.

σ قوة الشد السطحي للسائل وتقاس بوحدات dyen / cm.

وقد أعطى كل من Prake و Ritter^[36] لدالة التوزيع الحجمي $f(\delta)$ الصيغة الرياضية الآتية:

$$f(\delta) = \frac{2P_c}{\delta} \frac{d(U_v - U)}{dP_c} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

إذ U_v الحجم المسامي الكلي.

U حجم السائل المحقون.

Porosity

٢-٢ المسامية

تُحدّد المسامية خواص أخرى في الأجسام الصلبة كمقاومة الخبث (slag resistance) ومقاومة التقشر (spalling)، إذ تعد المسامية وقوة الشد الميكانيكي في الأجسام الصلبة بصورة عامة وفي الحرارية بصورة خاصة عوامل سيطرة نوعية من خلالها يمكن التحكم بباقي خواص العينات المنتجة. تعرّف المسامية على أنها النسبة بين حجم فراغ الهواء المحصور بين جسيمات المادة (void space) إلى حجم كتلتها^[34-32].

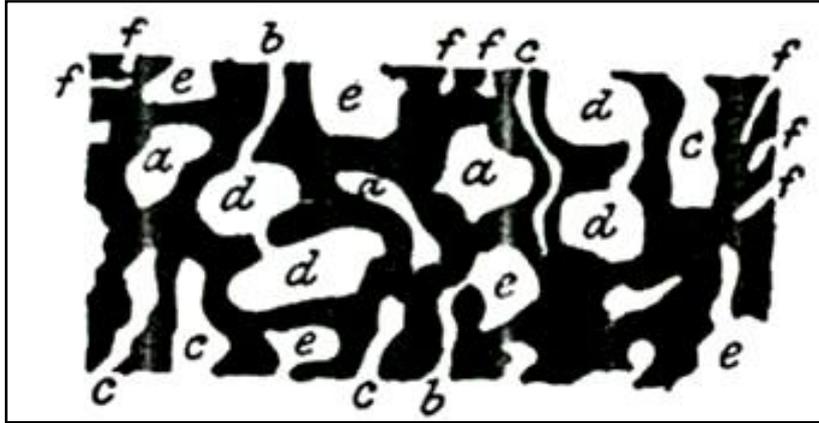
هناك نوعان من المسامات، المسامات المفتوحة (open pores)، والمسامات المسدودة (sealed or closed pores)، وتقسّم الأخيرة إلى نوعين: (i) المسامات المسدودة في الأصل، (ii) المسامات المفتوحة في الأصل ولكن سُدّت بالمواد المصهورة المتشكلة أثناء الحرق، وبالإمكان منع حدوث سد المسامات المفتوحة بواسطة التسخين البطيء.

المسامات المفتوحة هي المسامات التي تكون ظاهرة على الأقل على سطح واحد من أوجه العينة، وتنتج من (i) الفراغات الناتجة عن طرائق رص الحبيبات المفردة (ii) هروب الماء خلال التجفيف أو الغاز خلال الحرق، (iii) التشققات المجهريّة التي تتكون أثناء التجفيف أو الحرق كنتيجة للتقلص والتمدد^[34]. وحسب تصنيف (Washburn, 1921) فإن هناك ستة أنواع من المسامات:

- a. المسامات المغلقة أو المحكمة Closed or Sealed
- b. المسامات القنواتية المتصلة بالمسامات المعزولة Channel pores connecting separate pores
- c. المسامات غير النافذة Blind-Alley pores
- d. المسامات العقدية Loop pores
- e. المسامات الحبيبية أو التجوفية المرتبطة ببعضها البعض برقاب ضيقة

Pocket pores (some with narrow necks)

f. المسامات الدقيقة Micro pores التي تكون صغيرة جداً لا تملأ بالماء أو أي سائل في أي حالة. وهناك نوع آخر من المسامات يسمى المسامات المستمرة continuous التي تمتد بمسار معقد بأحد الأوجه الخارجية للجسم وإلى الوجه الآخر. يمكن توضيح أنواع المسامات بالشكل (١-٢):



شكل (١-٢) الرسم التوضيحي لأنواع المسامات [٣٤]

إن وجود هذه الأنواع المختلفة من المسامات في المواد يتطلب تعريف مفهومين لمسامية المادة هي: [٣٥]

- المسامية الحقيقية (True porosity): وهي النسبة بين الحجم الكلي للفجوات لكلا نوعي المسامات المفتوحة والمغلقة إلى حجم المادة.
 - المسامية الظاهرية Apparent porosity: ويمكن تعريفها على أنها النسبة بين حجم الماء أو السائل الممتص من قبل المادة إلى الحجم الكلي للمادة، أو هي المسامات المتصلة بالسطح أو المسامات المفتوحة.
- يمكن تقسيم المسامات حسب الحجم في الجدول الآتي [٣٧، ٣٦]

Pore	Width
Macropores	$d > 50 \text{ nm}$
Mesopores	$50 \text{ nm} > d > 2 \text{ nm}$
Micropores	$d < 2 \text{ nm}$
Ultramicropores	$d < \text{typical molecule diameter of the adsorptive} \approx 0.6 \text{ nm}$
Classification of macropores	

Rough pores	$d > 2 \text{ mm}$
Macrocapillaries	$2 \text{ mm} > d > 50 \text{ } \mu \text{ m}$
Capillaries	$50 \text{ } \mu \text{ m} > d > 2 \text{ } \mu \text{ m}$
Micro capillaries	$d < 2 \text{ } \mu \text{ m}$

ومن الجدير بالذكر أن معظم المسامات الموجودة قبل الحرق تكون على شكل مسامات مفتوحة، أما بعد الحرق فإن الكسر الحجمي للمسامية (نسبة حجم المسامات إلى حجم المادة) يقل، إذ أن بعض المسامات المفتوحة تزال مباشرة والبعض الآخر يتحول إلى مسامات مغلقة، نتيجة ذلك فإن الكسر الحجمي للمسامات المغلقة يزداد ابتدائياً ولكن يقل باتجاه نهاية عملية الحرق (زيادة درجات الحرارة) [١٦].

إن المسامية والمواد المختلفة تتأثر بالعوامل التالية: [٣٨]

١. شكل الحبيبات .Shape of the particles
٢. حجم الحبيبات .Size of particles
٣. تدرج الحبيبات .Grading of the particles
٤. طبيعة المادة المؤلفة للتسيج .Natural of the materials comprising the mixture
٥. المعاملة للمادة المستعملة خلال التصنيع .Manufacture
٦. الموقع النسبي للحبيبات .Relative position. أي مواقع الحبيبات المكبوسة أو المسافة فيما بينها.

إن أي مادة تشكل من مواد أولية مخلوطة بهيئة مسحوق ذات تدرج حجمي معين تكون حاوية على الفجوات، لأنه عملياً لا يمكن إنتاج جسم خالي من الفجوات، إلا أنه يمكن تقليل عدد المسامات بالتدرج الدقيق كما يمكن تقليل المسامية للحبيبات بالكبس تحت ضغط عالي لأن زيادة ضغط التشكيل يقلل المسامية إذ تكون الجسيمات أكثر اقتراباً فتقل الفجوات الناتجة [٣٩].

٢-٣ التوصيلية الحرارية للأجسام المسامية

Thermal Conductivity of Porous Media

التوصيلية الحرارية للأجسام المسامية تعتمد بصورة عامة على المعاملات الفيزيائية مثل حجم المسامية وشكلها، المسامية، وكذلك تعتمد على بعض الخواص مثل التوصيلية الحرارية للجزء الصلب من المادة وتوصيلية المائع الموجود بالمسامات [٤٠].

وتسهم ثلاثة عوامل في النهاية بنقل الحرارة داخل الجسم المسامي هي: التوصيل Conduction بالنسبة للمادة الصلبة والمائع الموجود بالمسامات، الإشعاع Radiation والتوصيل المسامي الذي يسمى Convection.

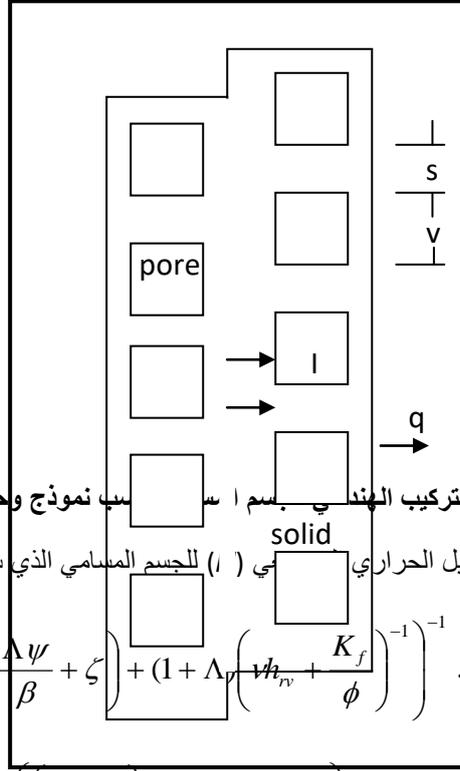
يعد نموذج وحدة الخلية (Unit cell model) الذي يصف المادة كجسم معتم وسطح المسامية كوحدة امتصاص للإشعاع (gray) أكثر النماذج نجاحاً للتنبؤ بالتوصيلية الحرارية للمواد المسامية [٤١، ٤٢]. إن نجاح هذا النموذج في التطبيق نابع من نجاحه في وصف المعادلات على أساس انتقال الحرارة بشكل إشعاعي، فضلاً عن ذلك أن وصف التوصيل الحراري عبر المائع المسامي يكون بوساطة معامل عددي خالي من الوحدات (ϕ) وهو يمثل النسبة بين الطول الفعال للتوصيل عبر المسامية effective length for conduction across a pore إلى حجم المسامية characteristic pore size [٤٣].

بما أن التراكيب الفيزيائية للأجسام المسامية تكون معقدة فإننا نستخدم مفهوم وحدة الخلية (Unit cell) الذي يحدد إمكانية تطبيق النموذج على عينة تحتوي على عدد يمكن تمييزه إحصائياً من المسامات.

إن معدل حجم المسامات يكون صغيراً جداً مقارنة بسمك العينة ككل، كما أن الأبعاد الهندسية يجب ألا تتغير مع الحرارة نظراً لأن الأجسام المسامية تمتلك معاملات تمدد حرارية واطئة، فإن التغير في هندسة الأبعاد مع درجات الحرارة يمكن إهماله. إن الشكل (٢-٢) يمثل الأبعاد الهندسية لنموذج الجسم المسامي.

في هذا النموذج، ν : هو حجم المسامية، s : المجال المملوء الموجود بين مسامتين متتاليتين. ويكون كل من ν و s منتظمة بالاتجاهين العموديين على خط اتجاه الحرارة بينما يكون وضع المسامات عشوائي في اتجاه جريان الحرارة بالأعمدة المتتابعة.

يمكن تمييز مسارين مميزين لجران الحرارة على طول الخط المرسوم في اتجاه جريان الحرارة تبدأ من سطح المسامية. المسار الأول (I) إذ يجتاز جزء من كل مسامية في معظم الأعمدة المتوالية للمسامات كما في الشكل (٢-٢)، أما المسار (II) فيخترق مسامية واحدة بعد مروره بمسافة ليست قصيرة في المجال المملوء بين المسامات (solid)



شكل (٢-٢) التركيب الهندسي باسم المسامات حسب نموذج وحدة الخلية [٤٣]

حسب هذا النموذج فإن التوصيل الحراري في الجسم المسامي الذي سمكه (t) يعطي بالعلاقة الآتية: [٤٣]

$$k' = \left(\zeta + \Lambda \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) + 1 \right) \left(\frac{1}{K_s} \left(\frac{\Lambda \psi}{\beta} + \zeta \right) + (1 + \Lambda) \left(\frac{h_{rv}}{\phi} + \frac{K_f}{\phi} \right)^{-1} \right)^{-1} \dots (٥-٢)$$

$$\zeta = \frac{\Delta}{v} = \frac{(1 + \beta) \left(\left(\frac{2 + \beta}{1 + \beta} \right) \text{Ln}(1 + \beta) + 1 \right)}{\beta \text{Ln}(1 + \beta)}$$

إذ:

أما ψ فهو معامل يوضح فيما إذا كانت المسامات في الوسط المسامي مسدودة أو مفتوحة وعلى النحو التالي:

$\psi = 1$ للجسم المسامي مسدود المسامات.

$\psi = 0$ للجسم المسامي مفتوح المسامات.

Λ : عدد المسامات الموجودة في المسار ا.

β : هي النسبة بين الحجم المسامي v إلى حجم الصلب s .

K_s : التوصيل الحراري للجزء الصلب s .

K_f : التوصيل الحراري للمائع الموجود في المسامات.

Δ : الطول الفعال للتوصيل خلال المجال بين المسامات على طول المسار (II).

h_{rv} : معامل انتقال الحرارة للإشعاع الحراري عبر مقطع المسامة.

إن k' لا يعتمد بصورة رئيسة على ϕ إذا كان انتقال الحرارة عبر المسامات يحدث بصورة رئيسة عن طريق الإشعاع

radiation [٤٤] ويعطي معامل انتقال الحرارة للإشعاع الحراري عبر مقطع المسامة [٤٥] بالعلاقة التالية:

$$h_{rv} = 4\epsilon\sigma T^3 \dots (٦-٢)$$

إذ:

ϵ : الانبعاثية نصف الكروية الكلية للمادة عند سطح المسامة.

T : معدل درجة الحرارة عند سطح المسامية.

إن قيمة التوصيل الحراري الموضعي المعطى في المعادلة (٢-٥) على كل الأجسام المسامية التي يكون فيها الترتيب المسامي عشوائياً بالنسبة للمسامات الواقعة على اتجاه جريان الحرارة التي يمكن تمييزها إحصائياً، والمعاملات λ و γ تحدد كل منهما الأهمية النسبية لانتقال الحرارة عبر λ و γ على التوالي [٤٣].

إن عملية انتقال الطاقة الحرارية في الوسط المسامي تحتوي على مضمونين اثنين وهما انتقال الطاقة الحرارية Thermal energy وانتقال الكتلة Mass التي تحدث في الوسط المسامي [٢٧].

إن التوصيلية للمواد الصلبة المسامية تعتمد بصورة كبيرة على الكثافة الحجمية ρ هذا التأثير توضحه الحقيقة القائلة إن التوصيلية الحرارية للهواء المائل للمسامات هي أقل بكثير من المكونات الأساسية للمادة.

بما أن الحرارة تنتقل عبر المسامات بطريقة الإشعاع لذلك فإن المسامات الكبيرة تؤدي إلى زيادة التوصيلية في درجات الحرارة العالية، أما المسامات الصغيرة فتعد حاجزاً جيداً لانتقال الحرارة وذلك لأن طاقة الإشعاع تتناسب مع فرق درجة الحرارة بين سطوح المسامية علاوة على حجم المسامية.

إن القيمة الحقيقية أو الفعلية للتوصيلية لا تعتمد فقط على المسامية الكلية، ولكن كذلك على حجم المسامات وطبيعتها فيما إذا كانت مغلقة أو متصلة، لأن المسامات المفتوحة تسمح بانتقال الغازات الساخنة مما يؤدي إلى زيادة التوصيلية الحرارية. أن قيم التوصيلية الحرارية للمواد ذات الحجوم المسامية الصغيرة هي أقل مما في الجسم ذي الحجوم المسامية الكبيرة والمساوي له في نسبة المسامية الكلية [٤٦].

٢-٤ الخواص الميكانيكية للجسم المسامي

Mechanical Properties of Porous Media

أن التعبير عن الإجهادات المؤثرة في الوسط المسامي يلاقي بعض الصعوبات، إذ لا يمكن إعطاء قيمة حقيقية للإجهاد مجهرياً stress microscopically لكل نقطة من نقاط الجسم المسامي من خلال وضع معادلة تحليلية لوصف السطح المحتوي على المسامات، لذلك فإن نظريات عدة طورت لوصف الإجهادات الحاصلة في الوسط المسامي عيانياً macroscopy، ومن أهم تلك النظريات تلك التي وصفها العالم Terzaghi، ١٩٥١ [٤٧] التي تفترض وجود نطاقين للإجهاد داخل الوسط المسامي هما: الأول ما يسمى بالإجهاد الحيادي neutral stress، وهو الإجهاد في المائع الموجود في المسامات، أما الآخر فيسمى الإجهاد الفعّال effective stress وهو الفرق بين الإجهاد الكلي السائد في الوسط المسامي والإجهاد الحيادي.

الإجهاد العياني في المائع يكون سكونياً ويمكن أن يرمز له بالرمز p ويمثل الضغط في مائع المسامية. الإجهاد الكلي

في الوسط المسامي (من ضمنه p) يرمز له بالرمز τ ويكتب بدلالة المركبات k, i ، τ_{ik} ، في معظم الحالات تكون المركبة السكونية هي السائدة وتساوي الضغط الكلي أو الفائض (over burden pressure).

أما الإجهاد الفعّال فيشار له بطرائق عدة:

الأولى: الإجهاد المؤثر موضعياً locally τ_{ik}^m ، وبذلك يكتب شرط التوازن بالصيغة:

$$\tau_{ik} = \tau_{ik}^m (1 - n) + pn \delta_{ik} \quad \dots\dots\dots (٧-٢)$$

إذ أن n هي المسامية، أما δ_{ik} فهو ثابت يسمى رمز كرونكر (Kronecker symbol) ويساوي ١ عندما $k = i$ ويساوي ٠ عندما $i \neq k$.

الثانية: الإجهاد المؤثر عيانياً macroscopically τ_{ik}^M وبذلك يصبح شرط التوازن:

$$\tau_{ik} = \tau_{ik}^M + pn\delta_{ik} \quad \dots\dots\dots (٨-٢)$$

الأخيرة: الإجهاد الزائف أو الخيالي (fictitious stress) τ_{ik}^F [٤٨] ويمثل الإجهاد المؤثر بين الحبيبات في الجسم المسامي وبذلك يكون شرط التوازن:

$$\tau_{ik}^F = \tau_{ik}^M - p(1-n)\delta_{ik} \quad \dots\dots\dots (٩-٢)$$

الفصل الثالث

جريان الموائع في الأجسام المسامية

الفصل الثالث

جريان الموائع في الأجسام المسامية

Equation of Motion

١-٣ معادلة الحركة

Darcy's Law

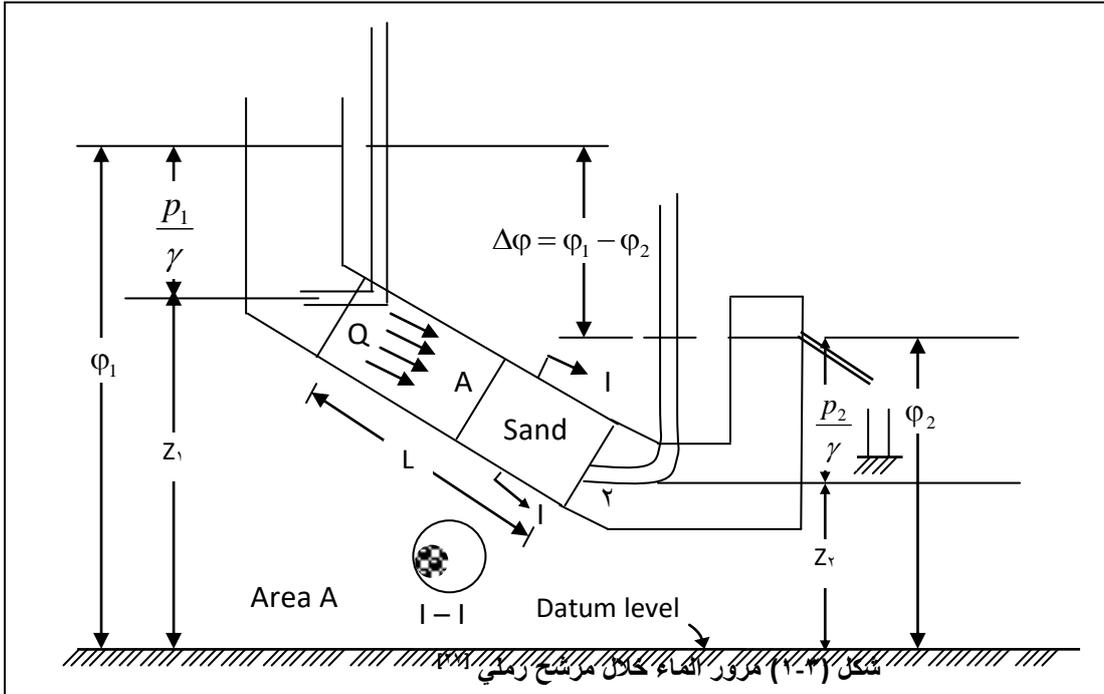
١-١-٣ قانون دارسي

درس العالم Darcy عام (١٨٥٦) تصرف الماء المار خلال مرشح رملي مسامي موضح بالشكل (١-٣)، فوجد بأن معدل الجريان الحجمي Q (حجم المائع في وحدة الزمن) للماء يتناسب:

أ- طردياً مع مساحة المقطع العرضي للمرشح (A).

ب- طردياً مع $(\phi_1 - \phi_2)$.

ج- عكسياً مع طول المرشح (L).



إذ ربطت هذه الاستنتاجات بعلاقة سميت بقانون Darcy الشهير الذي يعطى بالعلاقة [٢٧، ٤٩]

$$Q = KA(\phi_1 - \phi_2) / L \quad \dots\dots\dots (١-٣)$$

إذ أن K ثابت التناسب ويسمى التوصيلية الهيدروليكية (hydraulic conductivity) [٢٩].

أما $(\phi_1 - \phi_2)$ فتقاس بالنسبة لمستوى افتراضي أفقي، ويسمى ϕ بالارتفاع أو الجهد البيزومتري (piezometric head) ويساوي:

$$\phi_i = z + p_i / \gamma \quad ; \quad \gamma = \rho g$$

إذ p_i : الضغط الهيدروستاتيكي، ρ : كثافة المائع، g : التعجيل الأرضي.

يسمى المقدار $(\varphi_1 - \varphi_2) / L$ بالانحدار الهيدروليكي (hydraulic gradient) ويرمز له (J)، بينما يعرّف التدفق النوعي (specific discharge) (q) على أنه الجريان الحجمي مقسوماً على مساحة المقطع العرضي العمودي على اتجاه الجريان وبذلك تصبح المعادلة (١-٣):

$$q = KJ \quad ; \quad J = (\varphi_1 - \varphi_2) / L \quad \dots\dots\dots (٢-٣)$$

تمثل المعادلة (٢-٣) شكل آخر لمعادلة Darcy [٥٠].

إن الفرق بالطاقة لوحدة الوزن $\Delta\varphi = \Delta(z + p / \rho g)$ الذي يسمى بالارتفاع البيزومتري، يمكن أن يعبر عنه بدلالة الفرق بالطاقة لوحدة الكتلة $\Delta\varphi' = \Delta(gz + p / \rho)$ ويسمى بالجهد المسبب للتدفق (driving head)، وحسب هذا المفهوم يكون الانحدار الهيدروليكي J هو J' ويساوي $J' = gJ = g((\varphi_1 - \varphi_2) / L)$ ويسمى بالقوة المسببة للتدفق (driving force)، والذي يقود المائع إلى النقطة الأوطأ بالطاقة [٥١].

أما معدل السرعة للمائع المار في المرشح يمكن التعبير عنها بالعلاقة:

$$V = Q / nA \quad = q / n \quad \dots\dots\dots (٣-٣)$$

إذ أن n تمثل مسامية الوسط [٥٢، ٥٣].

٣-١-٢ تعميم قانون دارسي Generalization of Darcy's Law

Isotropic Medium

٣-١-٢-١ في الوسط المتساوي الجريان

تعطى معادلة Darcy لوسط متساوي الجريان ومتجانس لجريان ثلاثي الأبعاد بالصيغة التفاضلية الآتية: [٥٤]

$$q = KJ = -K \text{ grad } \varphi \quad \dots\dots\dots (٤-٣)$$

إذ q هو متجه التدفق النوعي بمركباته q_x و q_y و q_z ، وأن $J = - \text{ grad } \varphi$ هو الانحدار الهيدروليكي بمركباته:

$$J_x = - \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad J_y = - \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad J_z = - \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

وبما أن المقدار K هو كمية عددية فإن المعادلة (٤-٣) يمكن كتابتها على شكل ثلاث معادلات:

$$\left. \begin{aligned} q_x &= KJ_x = -K \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \\ q_y &= KJ_y = -K \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \\ q_z &= KJ_z = -K \frac{\partial \varphi}{\partial z}; \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (٥-٣)$$

وبصورة عامة، للجريان بأي اتجاه معطى بواسطة متجه الوحدة S فإن:

$$J_s = -K \frac{\partial \varphi}{\partial s}$$

يمكن كتابة المعادلة (٤-٣) بصيغة اخرى [٢٨] تعطى بالمعادلة:

$$q = -grad (K\varphi) = -grad \Phi; \quad \Phi = K \varphi \quad \dots\dots\dots (٦-٣)$$

تسمى Φ في المعادلة (٦-٣) بجهد التدفق النوعي (specific discharge potential).

أما في حالة الوسط متساوي الجريان وغير متجانس (inhomogeneous and isotropic) فإن $K = K(x,y,z)$ وبذلك تصبح المعادلة (٦-٣):

$$q = -K grad \varphi - \varphi grad K \quad \dots\dots\dots (٧-٣)$$

وهذا يعني إذا كان φ ثابت على سبيل الفرض فإن الجريان يحصل بسبب تغير K ، إذ لا يمكن حصول الجريان بدون مصدر للطاقة [٢٧].

٢-٢-١-٣ في الوسط غير متساوي الجريان Anisotropic medium

إن معادلة الحركة الموضحة في المعادلة (٥-٣) تمثل العلاقة الخطية بين مركبات الجريان النوعي ومركبات الانحدار الهيدروليكي لوسط متساوي الجريان، والتي يمكن أن تطور لتشمل الوسط غير متساوي الجريان بواسطة علاقة خطية أكثر عمومية بين مركبات الجريان (q) والانحدار الهيدروليكي ($J = -grad \varphi$)، المعادلات الآتية تمثل العلاقة الخطية لوسط غير متساوي الجريان: [٢٩، ٢٨]

$$\left. \begin{aligned} q_x &= K_{xx}J_x + K_{xy}J_y + K_{xz}J_z \\ q_y &= K_{yx}J_x + K_{yy}J_y + K_{yz}J_z \\ q_z &= K_{zx}J_x + K_{zy}J_y + K_{zz}J_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (٨-٣)$$

إذ تمثل K_{xx} و K_{xy} و K_{zz} تسعة معاملات ثابتة.

States of Flow

٢-٣ طبيعة الجريان

The Upper Limit

١-٢-٣ الحدود القصوى

في حالة جريان المانع في الأنابيب، يمكن تمييز نوعين من الجريان: الجريان الطباقى (laminar flow) الذي يحصل عند السرعة الواطئة، والجريان المضطرب (turbulent flow) الذي يحصل عند السرعة العالية، للتمييز بين هذين النوعين توجد قيمة عددية تسمى عدد رينولد (Reynolds number) ويرمز لها R_e ويمثل النسبة بين القصور الذاتي (inertial)، وقوى اللزوجة (Viscosity forces) [٤٩]، القيمة الحرجة بين الجريان الطباقى والمضطرب في الأنابيب يساوي تقريباً (٢١٠٠).

يعرف R_e للجريان خلال الوسط المسامي بالعلاقة: [٥٢، ٢٤]

$$R_e = qd / \mu \quad \dots\dots\dots (٩-٣)$$

إذ أن μ تمثل لزوجة المائع، و d تمثل بعد معين في الوسط المسامي، إذ بالمقارنة مع R_e في الأنابيب يكون d قطر الأنبوب.

افترض Collins عام (١٩٦١) [٥٥] أن $d = (k/n)^{1/2}$ حيث k تمثل النفاذية، و n المسامية، أما Ward عام (١٩٦٤)

[٥٦] فقد افترض $d = k^{1/2}$ كطول نموذجي يستعمل في العلاقة (٩-٣).

نموذجياً، فإن قانون Darcy يكون قابل للتطبيق عندما تكون قيمة R_e تتراوح بين (١٠ - ١) [٥٧]. مع مقارنة جريان الموانع في الوسط المسامي مع الجريان خلال الأنابيب فإن الجريان يُعبر عنه بالعلاقة ما بين معامل الاحتكاك (friction factor) و (R_e). يعطى معامل الاحتكاك بالعلاقة الآتية:

$$f = 2gdJ / V^2 \quad \dots\dots\dots (١٠-٣)$$

$$= 2d(\Delta\phi / L)(\gamma / \rho V^2)$$

$$J = (\Delta\phi / L) \quad ; \quad \gamma = \rho g \quad \text{إذ}$$

تسمى العلاقة (١٠-٣) بصيغة (Darcy-Weisbach) و (f) يسمى معامل احتكاك (Darcy-Weisbach)، في الوسط المسامي تبدل (V) بوساطة (q) [٢٤]. استعمال Fanning [٢٧] تعريفاً آخر لمعامل الاحتكاك، يعطى بالعلاقة الآتية:

$$f = 2gmJ / V^2 \quad \dots\dots\dots (١١-٣)$$

$$= 2m(\Delta\phi / L)(\gamma / \rho V^2)$$

إذ m هو نصف القطر الهيدروليكي Hydraulic radius الذي يعرف على أنه حجم المسامات المتصلة n مقسوماً على مساحتها السطحية S [٥٧].

وبرسم الجريان خلال الوسط المسامي كعلاقة بين معامل احتكاك Fanning و R_e ، فإن المنحني يكون كما في الشكل (٢-٣)، أن الخط المستقيم في هذا المنحني يمكن التعبير عنه بالعلاقة:

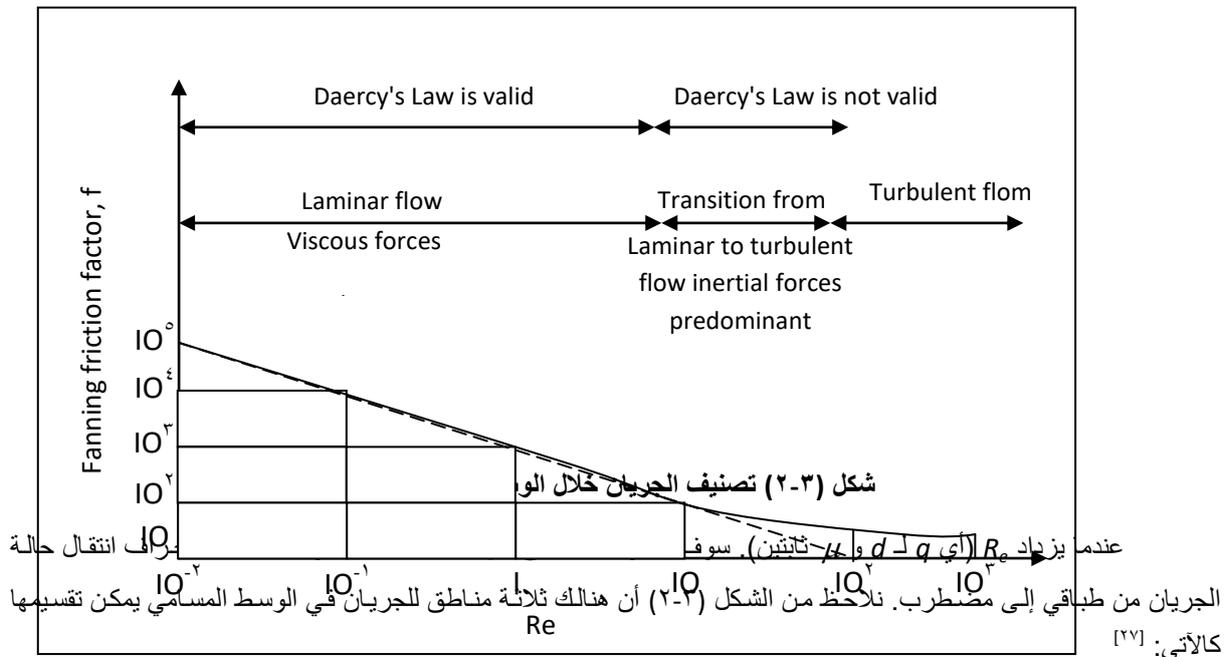
$$f = c/R_e \quad ; \quad c: \text{constant}$$

هذه العلاقة يمكن كتابتها:

$$\left[\begin{aligned} 2dg(\Delta\phi / L) / q^2 = c\mu / qd \\ \Rightarrow q = KJ \end{aligned} \right] \quad \dots\dots\dots (١٢-٣)$$

$$J = \Delta\phi / L \quad \quad K = (2 / c) dg^2 / \mu \quad \text{إذ:}$$

إن العلاقة (١٢-٣) ما هي إلا قانون Darcy الخطي بين q و J.



a. عندما يكون R_e صغير (أي لسرع قليلة عند d و μ ثابتين) فإن الجريان يكون طباقى، أي قوى اللزوجة تكون هي المسيطرة (predominant) على طبيعة الجريان، ويكون قانون Darcy قابل للتطبيق. إن الحدود القصوى لهذه المنطقة هي عند قيم R_e (تساوي 10).

b. بزيادة R_e يدخل المنحني منطقة الانتقال، عند بداية هذه المنطقة يكون قد مرَّ المنحني من منطقة الجريان الطباقى حيث قوة اللزوجة هي المسيطرة، إلى منطقة الجريان الطباقى أيضاً حيث قوى القصور الذاتى هي المسيطرة على حالة الجريان، وعند نهاية هذه المنطقة يكون المنحني قد دخل في حالة الجريان المضطرب.

بعض العلماء فرضوا بأن الحدود القصوى للجريان الطباقى في الجسم المسامى هي عندما يكون $R_e = 100$. تسمى هذه المنطقة عادة بمنطقة الجريان الطباقى غير الخطى [٥٢].

c. عند قيم عالية لـ R_e يكون المنحني في منطقة الجريان المضطرب. إن قانون Darcy يكون قابل للتطبيق في المنطقة (a) فقط.

The Lower Limit

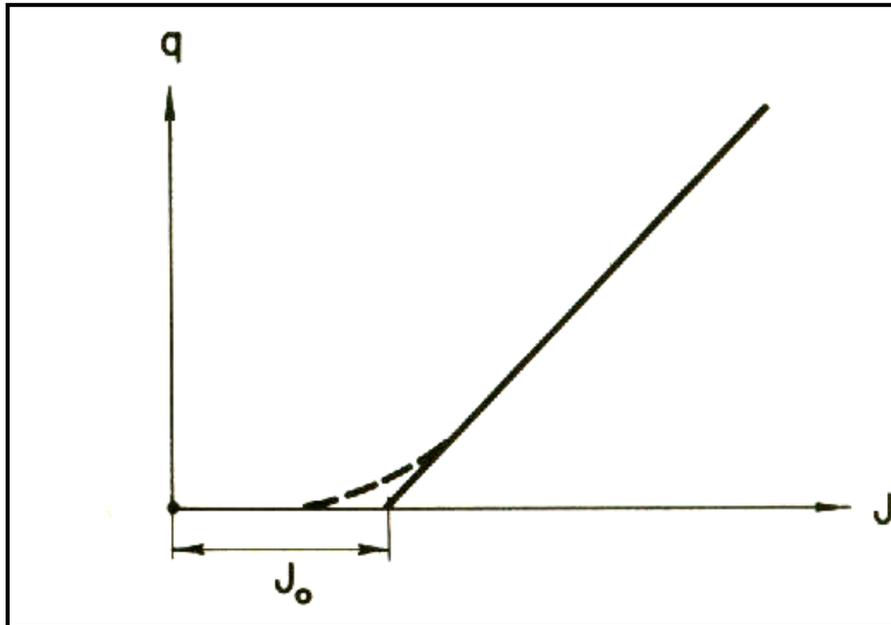
٢-٢-٣ الحدود الدنيا

حدد Irmay (١٩٦٨) [٥٨] وجود قيمة صغرى للانحدار الهيدروليكي J وهي J_0 التي لا يمكن حصول جريان تحت هذه القيمة، للتربة الطينية. J لا تزيد عن ٣٠. وأعزى Irmay هذه الظاهرة إلى ميكانيكية تصرف الماء خارج حدود نيوتن (non-Newtonian behavior). وعليه يكون قانون Darcy حسب هذا المفهوم:

$$q = 0 \quad \text{for } J \leq J_0$$

$$q = kj(J - J_0) / J \quad \text{for } J \geq J_0; J = |j| \quad \dots\dots\dots (١٣-٣)$$

والشكل (٣-٣) يوضح الحدود الدنيا للجريان.



شكل (٣-٣) يوضح الحدود الدنيا للجريان في الوسط المسامى [٢٧]

Turbulent Flow

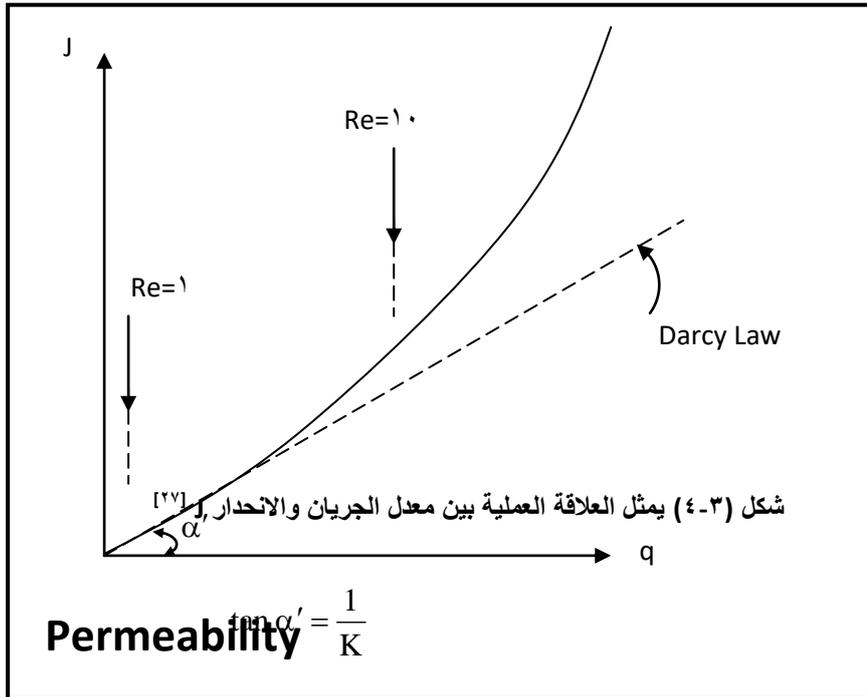
٣-٢-٣ الجريان المضطرب

عند القيم الكبيرة لـ (Re) فإن النسبة J/q سوف تزداد أيضاً، والشكل (٤-٣) يوضح الانحراف عن قانون Darcy عند زيادة Re [٥٩].

أول من اقترح علاقة لاخطية بين J و q عند القيم الكبيرة لـ Re هو (Forchheimer, ١٩٠١) [٦٠] وقد أخذت معادلته اللاخطية الشكل الآتي:

$$J = Wq + bq^2 = (W + bq)q \quad \dots\dots\dots (١٤-٣)$$

إذ كل من W و b ثوابت.



٤-٣ النفاذية

تشير النفاذية إلى توصيلية الوسط المسامي وقابلية الاختراق للمائع عبر الجسم المسامي، لذلك تعد خواص مائع الاختراق وميكانيكية الجريان عوامل مسيطرة على طبيعة الجريان. أما النفاذية النوعية (specific permeability) تمثل العامل الذي يقيس اسهام الوسط المسامي لتلك التوصيلية.

من الواضح إن النفاذية النوعية هي دالة للمسامية، إلا أن العلاقة بينهما ليست سهلة نظراً لأن جسمين مساميين يمتلكان أحياناً المسامية نفسها إلا أنهما مختلفان بالنفاذية النوعية. إن استنباط العلاقة بين النفاذية ومعاملات التركيب المسامي يتطلب خطوات تفصيلية للترتيب والتوزيع الحجمي للقنوات المسامية.

يعطى قانون Darcy باستبدال مفهوم الانحدار البيزومتري ϕ بمفهوم الضغط البيزومتري Pressure gradient P بالعلاقة الآتية: [٢٩، ٢٥]

$$Q = \frac{KA \Delta P}{L} \quad \dots\dots\dots (١٥-٣)$$

يمكن معايرة معادلة Darcy مع المائع بتقسيم الطرف الأيمن للمعادلة على معامل اللزوجة (μ) للمائع [٢٨] فتصبح المعادلة:

$$Q = K_p A \frac{\Delta P}{\mu L}$$

إذ K_p هو معامل النفاذية النوعية، ويعطى حسب المعادلة (٢٠-٣):

$$K_p = Q \mu L / A \Delta P \quad \dots\dots\dots (١٦-٣)$$

يمكن وصف الجريان الطبقي خلال قناة مستقيمة مفردة ذات طول (L) وفقاً لنموذج الأنابيب الشعرية (Capillary model) بوساطة معادلة (poiseuille) التي تعطى بالعلاقة الآتية: [٢٠]

$$Q = \pi \frac{\Delta P r_c^4}{8 \mu L} \quad \dots\dots\dots (١٧-٣)$$

إذ r_c هو نصف قطر القناة.

وبفرض وجود N من الأنابيب في وحدة المساحة، فإن المعادلة (١٧-٣) تصبح:

$$Q = N \pi \frac{r_c^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad \dots\dots\dots (١٨-٣)$$

بما أن المسامية n تعطى بالعلاقة: [٢٤]

$$n = N \pi r_c^2 \quad \dots\dots\dots (١٩-٣)$$

فإن مقارنة المعادلتين (١٨-٣) و(١٩-٣) بقانون Darcy ينتج أن النفاذية النوعية تساوي:

$$K_p = n r_c^2 / 8 \quad \dots\dots\dots (٢٠-٣)$$

نفرض أن ثلث الأنابيب هي في أحد الاتجاهات الثلاثة المتعامدة لذلك فإن الثابت سيصبح ٢٤. ويجعل النموذج أكثر مطابقة للواقع نفرض أن أقطار الأنابيب غير متساوية وبذلك تصبح المعادلة (٢٠-٣) بالصورة الآتية:

$$K_p = (n / 24) \int_0^{\infty} r^2 f(r) dr \quad \dots\dots\dots (٢١-٣)$$

إذ $f(r)$ هي دالة التوزيع الحجمي المسامي [٢٧].

افترض Scheidegger عام (١٩٦٠) [٢٠] أن القنوات تكون متعرجة tortuous وذات أقطار مختلفة (x) فوضع علاقة تعطى بموجبها النفاذية النوعية:

$$K_p = \frac{n \left(\int_0^{\infty} f(x) \frac{dx}{x^2} \right)^2}{\left(96 T' \int_0^{\infty} f(x) \frac{dx}{x^6} \right)} \quad \dots\dots\dots (٢٢-٣)$$

إذ T' هو معامل التعرجية Tortuosity factor.

استبدل Kozeny (١٩٢٧) [٢١] أنصاف أقطار القنوات الشعرية بمفهوم نصف القطر الهيدروليكي (Hydraulic radius, m)، إذ افترض أن الوسط المسامي يتكون من حزمة من القنوات المتوازية، المتعرجة وغير المتصلة ذات طول L_e وعليه فإن معادلة (Poiseuille) تصبح:

$$v = m^2 \Delta P / Z \mu L_e \quad \dots\dots\dots (23-3)$$

إذ Z هو عامل الشكل و v سرعة المائع في القناة

افترض Carman عام (1938) [61] أن سرعة المائع في القناة الواحدة تساوي سرعة المائع في المرشح V مضروبة بالنسبة بين طول القناة L_e إلى طول المرشح L .

$$v = V \frac{L_e}{nL} \quad \dots\dots\dots (24-3)$$

وبذلك تصبح معادلة (Poiseulle) بالشكل الآتي:

$$V = nm^2 \frac{\Delta P}{\mu L} \left(\frac{L^2}{L_e^2 Z} \right) \quad \dots\dots\dots (25-3)$$

يسمى العامل $\frac{ZL_e^2}{L^2}$ بثابت Kozeny ويرمز له k'_0 وتكون أفضل قيمة له هي (5) [69].

بمقارنة المعادلة (25-3) بقانون Darcy فإن النفاذية النوعية ستكون:

$$K_p = nm^2 / k'_0 \quad \dots\dots\dots (26-3)$$

ومن تعريف m (النسبة بين المسامية الحجمية إلى مساحة سطح القناة لكل وحدة حجم للجزء الفارغ $S(v)$) [67]

$$m = n / S(v) \quad \dots\dots\dots (27-3)$$

تكون النفاذية النوعية:

$$K_p = n^3 / k'_0 S(v)^2 \quad \dots\dots\dots (28-3)$$

ترتبط $S(v)$ مع $S(s)$ وهي مساحة سطح القناة لكل وحدة حجم للجزء المملوء (الصلب) بالعلاقة الآتية: [74]

$$S(v) = (1 - n) S(s)$$

وبذلك يكون التعبير المكافئ الثالث للنفاذية النوعية:

$$K_p = n^3 / k'_0 (1 - n)^2 S(s)^2 \quad \dots\dots\dots (29-3)$$

٥-٣ ظاهرة الانزلاق

Slip Phenomenon

لقد وجد عملياً أن المعادلات النظرية لحساب النفاذية قد فشلت عند تطبيقها على الغازات عند ظروف معينة، على سبيل المثال، فإن قيم k تكون أكبر عند استعمال الغازات منها عند استعمال السوائل وكذلك تتغير k عند استعمال غازات مختلفة للوسط المسامي نفسه.

هذا الاختلاف يعزى إلى عوامل الانزلاق (Slipcondition) الموجودة في جريان الغازات في قنوات شعرية في الأوساط واطئة المسامية، حتى عند ظروف الضغط الجوي، فإن ظاهرة الانزلاق تحدث أيضاً عندما تكون المسامات صغيرة بما فيه الكفاية، هذا يعني وجود مسارات حرة مرتبة للغاز (mean free path of gas)

إن الانزلاق slip لا يحدث في جريان السوائل، لذلك تكون k صغيرة. مع الأخذ بنظر الاعتبار ظاهرة الانزلاق فإن النفاذية الحقيقية في المعادلات (١٦-٣ و ٢٢-٣ و ٢٩-٣) يجب استبدالها بمفهوم النفاذية الظاهرية K_a (apparent permeability).^[٢٣]

$$K_a = K(1 + C_1 \lambda) \quad \dots\dots\dots (٣٠-٣)$$

إذ λ هو معدل المسار الحر للغاز mean free path و C_1 هو ثابت.

ومن النظرية الحركية للغازات^[٥١] فإن λ يعطى بالعلاقة التالية:

$$\lambda = C_2 \frac{\mu}{P} \sqrt{\left(\frac{T}{M}\right)} \quad \dots\dots\dots (٣١-٣)$$

إذ T درجة الحرارة ، P الضغط المسلط ، M الوزن الجزيئي للغاز ، C_2 ثابت.

باستعمال المعادلة (٣١-٣) لغاز معين عند ضغوط مختلفة وبثبوت درجة الحرارة وتعويضها في المعادلة (٣٠-٣) ينتج^[٥٥]

$$K_a = K \left(1 + \frac{C_3}{P} \right) \quad \dots\dots\dots (٣٢-٣)$$

$$C_3 = C_1 C_2 \mu \sqrt{\left(\frac{T}{M}\right)} \quad \text{إذ}$$

أما لدراسة تأثير تغير درجات الحرارة بثبوت الضغط، نأخذ أنواع مختلفة للغازات عند ضغط ١ atm و بدرجات حرارية مختلفة، فتصبح المعادلة (٣٠-٣):

$$K_a = K \left(1 + C_4 \mu \sqrt{\frac{T}{M}} \right) \quad \dots\dots\dots (٣٣-٣)$$

$$C_4 = \frac{C_1 C_2}{P} \quad \text{إذ}$$

الفصل الرابع الجانب العملي

الفصل الرابع الجانب العملي

Raw Material

٤-١ المواد الأولية

٤-١-١ الكورندم (تابلر الومينا) Corundum (Tabular Alumina)

يعد الكورندم الشكل الوحيد من أشكال الالومينا الذي يبقى مستقراً عندما يحرق بدرجات حرارية أعلى من 1000°C وهو يعرف كذلك بـ (الفا-الومينا) أو $(\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3)$ وينصهر عند 2050°C يستخلص عادةً من البوكسايت (Bauxite) والكالسايند (Calcined). يوجد الكورندم في الطبيعة بشكل نقي أو مشوب، أما مقاومته للحرارة (مقاسة بوساطة مقياس الـ PCE) فإنها تتغير من 1860°C إلى 2030°C حسب نوع وكمية الشوائب المضافة، يحتوي الكورندم على ٩٥ % Al_2O_3 أو أكثر وخواصه واستعمالاته تعتمد على الشوائب الأخرى ونوعيتها التي تشكل ٥٪ المتبقية، يعطي التركيب الكيميائي للـ (Tabular) حسب شركة (Almatis) على النحو التالي.

Al_2O_3	٩٥.٣١
Na_2O	٢.٠٩
SiO_2	١.٨٣
Fe magnetic	٠.٧٧

يمتاز الكورندم بمقاومة حرارية عالية، مقاومة ميكانيكية عالية، استقرارية حجمية كبيرة، كثافة حجمية عالية تصل إلى 3.5 g/cm^3 وصلادة عالية تصل إلى ٩٠ (Rockwell hardness) يستعمل الكورندم عادةً في تطبيقات صناعة الفولاذ والحديد، صناعة المعادن غير الحديدية، الصناعات البتروكيميائية، الصناعات الكيميائية، صناعة الأكاسيد السيراميكية وصناعة الأفران [٤٠].

Calcind Alumina

٤-١-٢ كالسايند الومينا

ينتج هذا النوع من خلال استخلاص الألمنيوم بوساطة عملية (Bayer)، فيعد تدوير المواد الأولية الالومينية مع محلول الصودا الحارق (Caustic soda) تتشكل الومينات الصوديوم في المحلول، تبقى الشوائب في الحالة غير الذائبة وتزال بعد ذلك على شكل فضلات (residue). في هذه المرحلة تمت تنقية محلول الالومينات، بعد ذلك يُرسب هيدروكسيد الألمنيوم النقي ويحرق (يكلسن) إلى درجة $(1100 - 1220)^{\circ}\text{C}$ للحصول على مسحوق أبيض اللون وهو الـ (Calcind Alumina).

إن الكثافة الحجمية لهذا النوع تحددها درجة حرارة الحرق، فعلى سبيل المثال تكون الكثافة الحجمية 0.86 g/cm^3 عندما تحرق بدرجات الحرارة المذكورة أعلاه، وعندما تحرق إلى درجة 1500°C ترتفع الكثافة إلى 1.2 g/cm^3 ، وتكون 1.6 g/cm^3 عندما تحرق إلى 1760°C [٤١].

التركيب الكيميائي للـ (calcind) يعطى وفقاً لشركة (Almatis) على النحو التالي:

Al_2O_3	~	٩٩.٧٪
Na_2O	~	٠.٢٤٨٪
MgO	<	٠.٠٠٢٪
SiO_2	~	٠.٠٢٪
CaO	~	٠.٠٣٪

٤-١-٣ رمل زجاج أرضية

Ardhoma Sand Glass

رمل زجاج أرضية الموجود في الطبيعة يتكون من ٩٧٪ كوارتز (Quartz) والشوائب الرئيسية فيه الألومينا (Al_2O_3) وأوكسيد الحديد (Fe_2O_3) وأقل من ٠.٥٪ من القلويات، أو يوجد بهياً حصى رملية منتظمة الحبيبات تتكون من حبيبات صغيرة جداً من الكوارتز نسبته ٩٢٪ مع كميات قليلة من المواد الطينية وصخور الرمل (sandston)، ويتكون أيضاً في الطبيعة على شكل حصى الفلنت (Flint peddle) المتكونة من بلورات الكوارتز الخفيفة المرتبطة بجزيئات الماء، وتكون نسبة الكوارتز فيه ٦٥٪ والشوائب الرئيسية الموجودة فيه هي كربونات الكالسيوم. ويعد رمل زجاج أرضية من المواد الأولية غير اللدنة (Non-plastic Raw material) المستعملة في صناعة الحرارية، كما يدخل في صناعة الحرارية لتخفيف لدونة الأيطان وتقليل تقلص هذه المواد، ولوجود فراغات بين الحبيبات تسهل عملية خروج الغازات المتحررة من داخل المواد أثناء عملية الحرق التي تؤدي إلى المحافظة على المنتج من التشققات المتأتية من خروج تلك الغازات. كما أنها تتحد مع الأكاسيد القاعدية المتواجدة في المواد الأولية أثناء عملية الحرق مكونة جزءاً زجاجياً مما يكسب المنتج القوة والصلابة [٦٣].

٤-١-٤ البنتونايت (المادة الرابطة)

Bentonite

يوجد نوعان رئيسيان من مسحوق البنتونايت في العالم وهما مونتيمورليونيت الصوديوم ومونتيمورليونيت الكالسيوم. تكون أغلب انواع الخامات الموجودة في العالم هي من نوع الكالسيوم وهو ذو قابلية انتفاخ قليلة وتعالج كيميائياً بإضافة كربونات الصوديوم لتنشيطه وتحويله إلى نوع الصوديوم الشديد الانتفاخ ذي الفائدة التطبيقية الواسعة. إن التركيب الكيميائي للمونتيمورليونيت هو $Al_2O_3 - 4SiO_2 - XH_2O$. أكتشف البنتونايت العراقي في أماكن عدة من العراق وتم إجراء فحوصات عليه ومقارنة الخواص التي تم الحصول عليها مع خواص البنتونايت العالمي ووجد أنه يتكون من مونتيمورليونيت الكالسيوم [٦٤، ٦٥].

يتكون البنتونايت العراقي كيميائياً من المواد: [٦٦]

SiO_2	٥٦.٧٧٪	K_2O	٠.٦٪
Al_2O_3	١٥.٦٧٪	P_2O_5	٠.٦٥٪
Fe_2O_3	٥.١٢٪	SO_2	٠.٥٩٪
CaO	٤.٤٨٪	Cl	٠.٥٧٪
MgO	٣.٤٢٪	$L.O.I.$	٩.٤٩٪
Na_2O	١.١١٪	$C(total)$	٠.٥٦٪
SiC	٠.٩٧٪		

٤-٢ تحضير النماذج

Preparation of Specimens

تم تحضير الخلطات في قسم علوم الفيزياء والتابع لجامعة بابل، وقد استعملت الألومينا بنسبة ٩٠٪ في جميع الخلطات لتحضير هذا النوع من الحرارية وذلك بسبب مقاومتها العالية للمؤثرات الخارجية. استعمل نوعا الألومينا Calcined Alumina و Tabular Alumina كمحتوى الموميني في الخلطات وذلك بمدين من الحجم الحبيبية مدى خشن ومدى ناعم إذ تم طحن نوعي الألومينا في طاحونة ميكانيكية وصنفت حبيبياً باستعمال مناخل ذات حجوم مختلفة والجدول (٤-١) يوضح التصنيف الحبيبي للألومينا المستعملة بنوعيهما. ومن أجل الحصول على منتج عالي النفاذية يجب استعمال مدى واسع من الحجوم الحبيبية في الخلطة الواحدة وذلك للتقليل قدر الامكان من تعرجية القناة المسامية [٦٨]، وأضيف رمل زجاج أرضية للخلطات بنسبة ٧٪ كمحتوى سيليك في الخلطة، كما أضيفت كمية قليلة من البنتونايت كمادة رابطة (Binder)، تم ترطيب الخلطات بحامض الفوسفوريك المخفف إلى نسبة وزنية ٢٪ لرفع مقاومة الحرق علماً أن الحجم الحبيبي لرمل الزجاج والبنتونايت كانت أقل من ٢٠٠ mesh.

جدول (٤-١) الحجم الحبيبي المختار للالومينا

Crain size (μm)	Coarse mix %	Fine mix %
١٧٠٠ - ٢٣٦٠	١٦.٧	
١١٨٠ - ١٧٠٠	٣٣.٨	
٨٥٠ - ١١٨٠	١٩.١	
٦٠٠ - ٨٥٠	٤.٥	٠.٢
٤٢٥ - ٦٠٠	١	٧.١
٣٠٠ - ٤٢٥	٠.٥	٤١.١
٢١٢ - ٣٠٠	٠.٣	١٩.٦
١٥٠ - ٢١٢	٠.٣	٣.٢
١٠٦ - ١٥٠	٠.٢	١.٠
٧٥ - ١٠٦	٠.٢	٠.٨
٤٥ - ٧٥	٠.٥	١.٢
< ٤٥	٢٢	٢٥.٧

ويبين الجدول (٤-٢) نسب الخلط ونوع الخلطة من حيث الحجم الحبيبي للخلطات المحضرة.

جدول (٢-٤) نسب الخلط ونوع الخلطة للخلطات المحضرة

Group no.	Grain size	Raw material % used			
		Tabular	Calcind	Sand glass	Bentonite
M _{١a}	Fine	٩٠	٠	٧	٣
M _{١b}	Coarse	٩٠	٠	٧	٣
M _{٢a}	Fine	٧٠	٢٠	٧	٣
M _{٢b}	Coarse	٧٠	٢٠	٧	٣
M _{٣a}	Fine	٥٠	٤٠	٧	٣
M _{٣b}	Coarse	٥٠	٤٠	٧	٣
M _{٤a}	Fine	٤٠	٥٠	٧	٣
M _{٤b}	Coarse	٤٠	٥٠	٧	٣
M _{٥a}	Fine	٢٠	٧٠	٧	٣
M _{٥b}	Coarse	٢٠	٧٠	٧	٣
M _{٦a}	Fine	٠	٩٠	٧	٣
M _{٦b}	Coarse	٠	٩٠	٧	٣

أما عملية التشكيل فتم إجراؤها في مختبر المواد اللامعدنية الواقع في هندسة المواد ضمن كلية الهندسة التابع لجامعة بابل، وذلك بواسطة مكبس كهربائي ويزن كبس مقداره ١ min للنموذج، إذ شكلت من كل خلطة أربع مجاميع كل مجموعة مشكلة بضغط كبس ١٠٠٠، ٢٠٠٠، ٣٠٠٠، ٤٠٠٠ kg أي ما يعادل ٢٠١١، ٤٠٢٣، ٦٠٣٤، ٨٠٤٥ بوحدات psi على التوالي علماً أن قطر القالب المستعمل في التشكيل ٣٠ mm [١ Mpa = ١٤٥ psi].

تم تجفيف النماذج في قسم علوم الحياة التابع لكلية العلوم في جامعة بابل وذلك بواسطة مجفف كهربائي بدرجة ٧٠°C لمدة ٢٤ ساعة و ١٠٠°C لمدة ٢٤ ساعة أخرى.

أحرقت النماذج في الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين التابعة لوزارة الصناعة باستعمال فرن كهربائي ولدرجة حرارة ١٤٠٠°C لكل نموذج ولمدة ٤ ساعات وبمعدل تسخين ٤ درجة مئوية/دقيقة من ٠ - ٤٠٠°C ومن ٤٠٠ - ١٤٠٠°C بمعدل ١٠ درجة مئوية/دقيقة.

وبذلك أصبح لدينا ٤٨ نموذجاً موزعاً فيها النسب والأحجام الحبيبية كما في الجداول (١-٤ و ٢-٤) ومكبوسة بأربعة مديات من ضغط التشكيل.

Testing

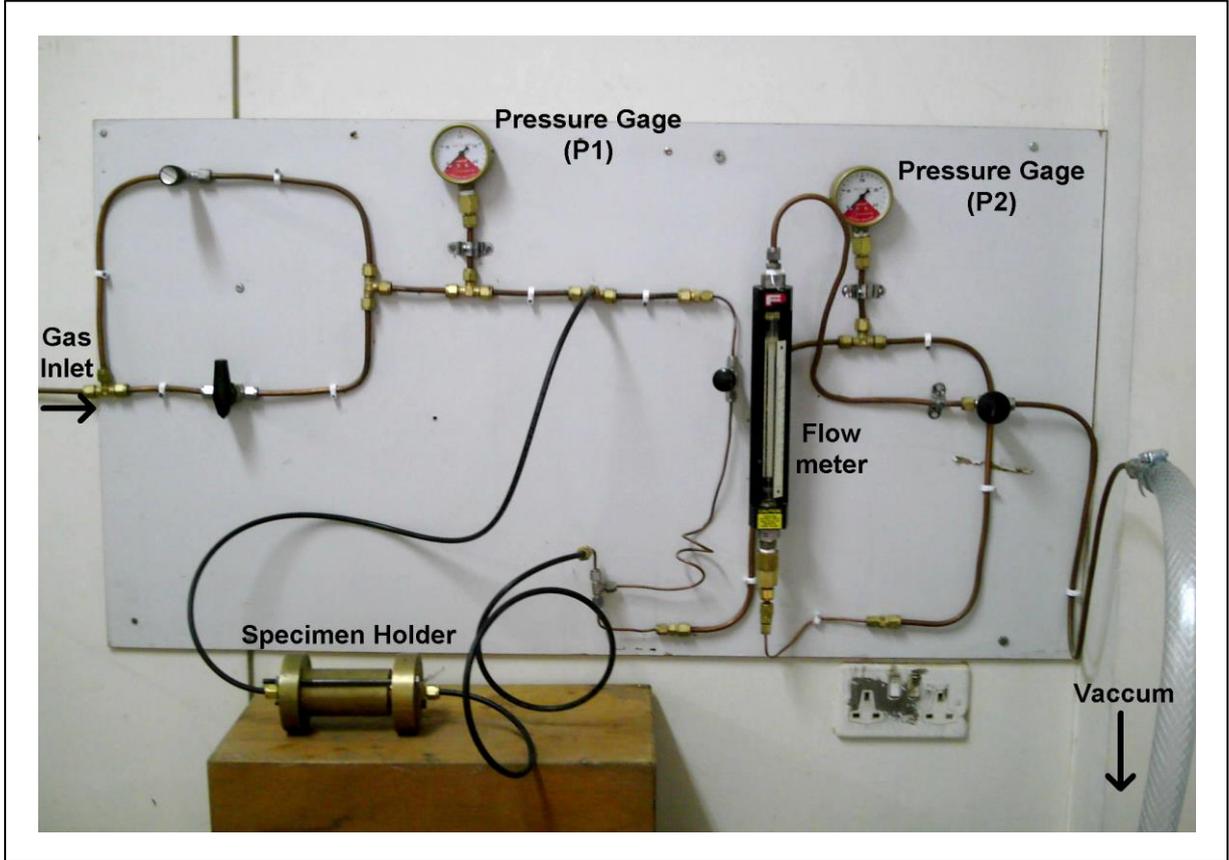
Permeability

٣-٤ القياسات

١-٣-٤ النفادية

تم حساب النفاذية النوعية لجميع النماذج باستعمال منظومة قياس النفاذية في مختبر المواد المتقدم في قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة بابل [٦٧]، ويبين الشكل (١-٤) أجزاء المنظومة التي تتكون من:

١. منظم لدخول الغاز.
٢. مقياسي ضغط لقياس الضغط الداخل والضغط الخارج.
٣. مقياس لمعدل الجريان.
٤. حامل للعينات.
٥. مضخة رجوع.



شكل (١-٤) صورة فوتوغرافية لمنظومة النفاذية (٦٧)

تحسب النفاذية النوعية (K_p) من المعادلة (١٦-٣) التي تختزل إلى الصيغة:

$$K_p = (slope) \frac{\mu L}{A} \quad \dots\dots\dots (١-٤)$$

$$\text{where slope} = \frac{Q}{\Delta p}$$

إذ:

μ : تمثل لزوجة الغاز المستعمل (الهواء بدرجة حرارة الغرفة = centiposi 1.81×10^{-2}), L : سمك العينات 0.5 cm , A : مساحة سطح العينة الظاهرة للغاز (فتحة حامل العينات) وتساوي هنا (1.767 cm^2) .

وعليه يصبح الثابت المعطى في المعادلة (١-٤)

$$\frac{\mu L}{A} = 0.511 * 10^{-2} \frac{\text{centeposi.cm}}{\text{cm}^2}$$

وبذلك تصبح المعادلة (١-٤)

$$K_p = (\text{slope}) 0.511 * 10^{-2} \text{ darcy}$$

$$\text{or } K_p = (\text{slope}) 0.511 \text{ centedarcy}$$

يعرف الـ (Darcy) بالقانون التالي: [٢٧]

$$1 \text{ Darcy} = \frac{\text{cm}^3/\text{s}}{\text{atm}} \frac{\text{centeposi.cm}}{\text{cm}^2}$$

يوضع النموذج في حامل العينات ثم يسقط عليه الغاز بضغط (P_١) ويغير الضغط بمعدل خمس مرات لكل نموذج، يُقاس

$$\left(\frac{Q}{\Delta p} \right) \text{ . المقابله كل من } (P_1) \text{ و } (Q) \text{ ثم يحسب الـ (slope) الذي يمثل}$$

تبيين الجداول من (٣-٤) إلى (١٤-٤) حسابات الميل لكل نموذج وبظروف التشكيل المذكورة آنفاً.

جدول (٣-٤) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{1a}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٢٤٨٥	٠.٢٣٥	٧٧.٣٥	٨١.٣٢
	١.٩٣٤	١.٦٧٥	٠.٢٥٩	٩٨.٦٥	
	٣.٨٦٨	٣.٢٤٣	٠.٦٢٥	١٢٦.٥٤	
	٥.٨٠٢	٤.٦٥٢	١.١٥	١٥٠.٣٢	
	٧.٧٣٦	٦.٤٧٢	١.٢٦٤	١٨٠.٢٦	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.١٦٧٩	٠.٣١٥٦	٧٩.٤	٧٥.٠٥
	١.٩٣٤	١.٤٧٦	٠.٤٥٨	٨٥.٦٤	
	٣.٨٦٨	٢.٨١٤	١.٠٥٤	١٠٠.١٢	
	٥.٨٠٢	٤.٥٦٧	١.٢٣٥	١٤٦.٢	
	٧.٧٣٦	٦.٣١٣	١.٤٢٣	١٧٠.٥٦	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٠٤١	٠.٣٧٩٤	٧٨.٣٢٥	٥٢.١٥
	١.٩٣٤	١.٢٨	٠.٦٥٤	٨٦.٣٥٤	
	٣.٨٦٨	٢.٨٦٩٦	٠.٩٩٨٤	٩٩.٢٩	
	٥.٨٠٢	٤.٥٥٢	١.٢٥	١٢٢.٩٤	
	٧.٧٣٦	٥.٨٨	١.٨٥٦	١٥٢.٣	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٠١٤	٠.٣٨٢١	٧٦.٥٣	٤٨.٢٦
	١.٩٣٤	٠.٩٤٨	٠.٩٨٦	٨٥.٣٤	
	٣.٨٦٨	٢.٧٤٣	١.١٢٥	٩٩.٣٥	
	٥.٨٠٢	٤.٤١٨	١.٣٨٤	١٢٩.٣٤	
	٧.٧٣٦	٥.٧٢٤	٢.٠١٢	١٤٨.٥٩	

جدول (٤-٤) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{1b}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٣٢٤٩	٠.١٥٨٦	٨٠.٣٥	٨٦.٥٧
	١.٩٣٤	١.٦٧	٠.٢٦٤	١٠٠.٦٤	
	٣.٨٦٨	٣.١٧٩	٠.٦٨٩	١٣٤.٨	
	٥.٨٠٢	٤.٧٤٨	١.٠٥٤	١٦١.٧٩	
	٧.٧٣٦	٦.٤٧٦	١.٢٦	١٨١.٣	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.٢١٨٨	٠.٢٦٤٧	٨١.٥٦	٥٩.١٦
	١.٩٣٤	١.٣٩٥١	٠.٥٣٨٩	٩٤.٢٨	
	٣.٨٦٨	٣.١٠٣	٠.٧٦٥	١١٥.٤	
	٥.٨٠٢	٤.٧٧٨	١.٠٢٤	١٢١.٨	
	٧.٧٣٦	٦.١٧٦	١.٥٦	١٥٨.٤١	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.٣٢٧٥	٠.١٥٦	١٥٠	٢٢٣.٩٥
	١.٩٣٤	١.٨٠٩	٠.١٢٥	١٥٤.٣٦	
	٣.٨٦٨	٣.٦٦٣	٠.٢٠٥	١٨٠.٤٥	
	٥.٨٠٢	٥.٤٧٦٦	٠.٣٢٥٤	١٩٩	
	٧.٧٣٦	٧.٣٨٨	٠.٣٤٨	١٩٩	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٢٧١	٠.٣٥٦٤	٨٥.٤٧	٢٩.٨٦
	١.٩٣٤	٠.٨٨	١.٠٥٤	٩٤.٤٥	
	٣.٨٦٨	٢.٤٤٧	١.٤٢١	١١٦.٤٨	
	٥.٨٠٢	٣.٨٣٨	١.٩٦٤	١٢٥.٧	
	٧.٧٣٦	٥.١٦٩	٢.٥٦٧	١٥٠.٤	

جدول (٤-٥) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{ra}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٣٥٨٥	٠.١٢٥	٨٥.٥	٩٥.١٣
	١.٩٣٤	١.٦٩٩	٠.٢٣٥	١١٢.٤	
	٣.٨٦٨	٣.٣٨١	٠.٤٨٧	١٤٣.٢٨	
	٥.٨٠٢	٤.٩٠٨	٠.٨٩٤	١٥٩.٧	
	٧.٧٣٦	٦.٧٨	٠.٩٥٦	١٧٨.٦١	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.٢١٦٥	٠.٢٦٧	٨٠.٧٦	٩٣.٨٩
	١.٩٣٤	١.٣٥٥	٠.٥٧٩	١٠٩.٥٤	
	٣.٨٦٨	٣.١٨٤	٠.٦٨٤	١٤٠.٦	
	٥.٨٠٢	٤.٨٥٤	٠.٩٤٨	١٤٩.٧	
	٧.٧٣٦	٦.٦١١	١.١٢٥	١٦٠.٢	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٥٨١	٠.٣٢٥٤	٧٧.٦	٨٣.٢٥
	١.٩٣٤	٠.٩٩٢	٠.٩٤٢	١٠٠.٥	
	٣.٨٦٨	٢.٧٣٣	١.١٣٥	١٢٢.٤٧	
	٥.٨٠٢	٤.٥٦٨	١.٢٣٤	١٥٢.٦٤	
	٧.٧٣٦	٦.٣٧٢	١.٣٦٤	١٦٨.٢٧	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٠٤١	٠.٣٧٩٤	٧٩.٣١	٦٦.٧٧
	١.٩٣٤	١.٣٧	٠.٥٦٤	٩٥.٨٧	
	٣.٨٦٨	٢.٩٠٤	٠.٩٦٤	١١٠.٢١	
	٥.٨٠٢	٤.٨١٦	٠.٩٨٦	١٣٢.٢٦	
	٧.٧٣٦	٦.٣١	١.٤٢٦	١٥٠.١٩	

جدول (٦-٤) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{r_b}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٢١٩٥	٠.٢٦٤	٩٠.٢٥	٩٦.١٧
	١.٩٣٤	١.٦٠٨	٠.٣٢٦	١٢٦.٤٣	
	٣.٨٦٨	٣.٤١٢	٠.٤٥٦	١٥٠.١٢	
	٥.٨٠٢	٥.٠٧٠٨	٠.٧٣١٢	١٦٩.٢٤	
	٧.٧٣٦	٦.٦٠١	١.١٣٥	١٨٨.٣٤	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.١٨٤٨	٠.٢٩٨٧	٩١.٦	٦٢.٨٣
	١.٩٣٤	١.٤٣٦	٠.٤٩٨	١٢٣.٦٦	
	٣.٨٦٨	٣.٢٣	٠.٦٣٨	١٣٩.٧٨	
	٥.٨٠٢	٤.٨٣٨	٠.٩٦٤	١٥٦.٧٣	
	٧.٧٣٦	٦.٢٠٢	١.٥٣٤	١٧٦.٥٥	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٧٢٥	٠.٣١١	٨٥.٤٨	٤٣.٤٩
	١.٩٣٤	٠.٩٦١	٠.٩٧٣	١١٩.٨	
	٣.٨٦٨	٢.٦٠٤	١.٢٦٤	١٢٢.٤١	
	٥.٨٠٢	٤.١٥٤	١.٦٤٨	١٤٦.٥٧	
	٧.٧٣٦	٥.٧١٢	٢.٠٢٤	١٦٠.٤٩	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٤٩٥	٠.٣٣٤	٨٠.٢١	٣١.١٩
	١.٩٣٤	١.٠٤	٠.٨٩٤	١٠٠.١١	
	٣.٨٦٨	٢.٣٣٤	١.٥٣٤	١٢١.٣١	
	٥.٨٠٢	٣.٧٤٦	٢.٠٥٦	١٣٩.٧٨	
	٧.٧٣٦	٤.٩٨٢	٢.٧٥٤	١٥٤.٢٨	

جدول (٧-٤) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{ra}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٢٨٢٣	٠.٢٠١٢	٨٩.٥٦	١٠٩.٢٥
	١.٩٣٤	١.٦٣٧٦	٠.٢٩٦٤	١٢٩.٣٤	
	٣.٨٦٨	٣.٤١٢	٠.٤٥٦	١٤١.١	
	٥.٨٠٢	٥.١٠٥	٠.٦٩٧	١٧٥.٦	
	٧.٧٣٦	٦.٦٧٧	١.٠٥٩	١٩١.٦	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.١٣٨٥	٠.٣٤٥	٨٤.٤١	٨١.٠٥
	١.٩٣٤	١.٥٣٧٦	٠.٣٩٦٤	١٢٦.٥٦	
	٣.٨٦٨	٣.٤٣٣	٠.٤٣٥	١٤٣.٢	
	٥.٨٠٢	٥.٢٣٥	٠.٥٦٧	١٦٦.٩٧	
	٧.٧٣٦	٦.٥٦٩	١.١٦٧	١٧٧.٧	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٤٧٩	٠.٣٣٥٦	٨٥.٤٦	٧٨.٢٥
	١.٩٣٤	١.١٤٥	٠.٧٨٩	١٢٣.٤	
	٣.٨٦٨	٢.٩٣٦	٠.٩٣٢	١٣٣.٦	
	٥.٨٠٢	٤.٦٣٤	١.١٦٨	١٥٠.١١	
	٧.٧٣٦	٦.٣١٤	١.٤٢٢	١٧١.٤	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.٠٨٦٤	٠.٣٩٧١	٨٠.٠٩٧	٧٣.١٤
	١.٩٣٤	١.١٨٩	٠.٧٤٥	١٠٠.١٦	
	٣.٨٦٨	٢.٨١٤	١.٠٥٤	١٣٠.٤٩	
	٥.٨٠٢	٤.٥٠٨	١.٢٩٤	١٤٢.٥٨	
	٧.٧٣٦	٦.١٨٤	١.٥٥٢	١٦٣.٤	

جدول (٨-٤) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{rb}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.١٥٧٥	٠.٣٢٦	٩٢.٦٤	١٠١.٢٣
	١.٩٣٤	١.٥٩٨	٠.٣٣٦	١١١.٦	
	٣.٨٦٨	٣.٢٣	٠.٦٣٨	١٤٦.٨	
	٥.٨٠٢	٤.٩٤٦	٠.٨٥٦	١٦٩.٣	
	٧.٧٣٦	٦.٥٨٣	١.١٥٣	١٨٠.٢٦	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.٢٤٧١	٠.٢٣٦٤	٨٧.٤٦	٧١.٢٤
	١.٩٣٤	١.٣٧٠٢	٠.٥٦٣٨	١٠٢.٤٣	
	٣.٨٦٨	٣.٠٣٢	٠.٨٣٦	١٢٩.٣٦	
	٥.٨٠٢	٤.٦٧٦	١.١٢٦	١٥٤.٩	
	٧.٧٣٦	٦.١٧٢	١.٥٦٤	١٧٦.٨٨	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١١٥٥	٠.٣٦٨	٨١.١٩	٤٨.٠٧
	١.٩٣٤	١.١٠١	٠.٨٣٣	٩٩.٣٣	
	٣.٨٦٨	٢.٧٣٦	١.١٣٢	١٢٠.٥	
	٥.٨٠٢	٤.١٤٧	١.٦٥٥	١٣١.٢٩	
	٧.٧٣٦	٥.٧٦٨	١.٩٦٨	١٦٣.٣٨	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٠٢	٠.٣٨١٥	٨٠.٦٤	٣٧.٢٥
	١.٩٣٤	١.٠٣٧٦	٠.٨٩٦٤	١١٠.٤٢	
	٣.٨٦٨	٢.٦٠٤	١.٢٦٤	١٢٥.٦٧	
	٥.٨٠٢	٤.١٣٨	١.٦٦٤	١٢٩.٣٨	
	٧.٧٣٦	٥.٦	٢.١٣٦	١٥٠.١٦	

جدول (٩-٤) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{ϵ_a}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٣٥٠٥	٠.١٣٣	١٠٠.٣٦	١٢٢.٦
	١.٩٣٤	١.٦٧	٠.٢٦٤	١٢٠.٣٥	
	٣.٨٦٨	٣.٥٧١٢	٠.٢٩٦٨	١٥٤.٦٨	
	٥.٨٠٢	٥.٣٧٣	٠.٤٢٩	١٧٦.٦٦	
	٧.٧٣٦	٦.٩٠٩٦	٠.٨٢٦٤	١٩٠.٢١	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.٢٥٧٥	٠.٢٢٦	٩٠.٢٥	١١٣.٣٢
	١.٩٣٤	١.٤٤٣	٠.٤٩١	١٢٢.٣	
	٣.٨٦٨	٣.٣٠١	٠.٥٦٧	١٤٣.٨٩	
	٥.٨٠٢	٥.١٥٤	٠.٦٤٨	١٥٩.٧٨	
	٧.٧٣٦	٦.٧٤٠٤	٠.٩٩٥٦	١٧٥.٣	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١١٨٥	٠.٣٦٥	٩٠.١٥	٩٧.٣٢
	١.٩٣٤	١.٤٠٢٩	٠.٥٣١١	١١٥.٤٦	
	٣.٨٦٨	٣.٢٠٥٩	٠.٦٦٢١	١٢٩.٣٥	
	٥.٨٠٢	٤.٨٨٩٦	٠.٩١٢٤	١٤٢.١٢	
	٧.٧٣٦	٦.٦١٣	١.١٢٣	١٧٠.٢٣	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٠٢٣	٠.٣٨١٢	٨١.٢٦	٩٣.٤٨
	١.٩٣٤	١.١٥	٠.٧٨٤	١٠٦.٣٧	
	٣.٨٦٨	٢.٩٦٥٦	٠.٩٠٢٤	١١٠.٥٦	
	٥.٨٠٢	٤.٨٠٥٦	٠.٩٩٦٤	١٣٠.٥٥	
	٧.٧٣٦	٦.٥٤	١.١٩٦	١٦١.٢٤	

جدول (٤-١٠) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة $M_{\epsilon B}$

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٢٤٩	٠.٢٣٤٥	٩٨.٦٥	١٤٩.٢٤
	١.٩٣٤	١.٦١٧	٠.٣١٦٥	١٢٨.٣٦	
	٣.٨٦٨	٣.٢٣٤	٠.٦٣٤	١٤٣.٦٤	
	٥.٨٠٢	٥.٢٠٥	٠.٥٩٦١	١٧٠.٣٦	
	٧.٧٣٦	٦.٩٧	٠.٧٥٨	١٩١.٢٦	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.١٨٧	٠.٢٩٦٤	٩٦.٣٤	٩٣.٩٢
	١.٩٣٤	١.٤٩٨	٠.٤٣٦	١١١.٢٢	
	٣.٨٦٨	٣.٠٩٩	٠.٧٦٩	١٢٩.٥٨	
	٥.٨٠٢	٤.٨٧١	٠.٩٣١	١٥٩.٤٨	
	٧.٧٣٦	٦.٥٣٩	١.١٩٧	١٨١.٤٩	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٦٨	٠.٣١٥	٩٠.٥	٥٣.١٠
	١.٩٣٤	١.١٤٤	٠.٧٩	٩٩.٢٣	
	٣.٨٦٨	٢.٧٠٤	١.١٦٤	١٢٦.٨٩	
	٥.٨٠٢	٤.٢٤٢	١.٥٦	١٥٥.٢٦	
	٧.٧٣٦	٥.٧٧٢	١.٩٦٤	١٧١.٢٦	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٠٣	٠.٣٨٠١	٨٨.٩٧	٣٩.٢١
	١.٩٣٤	١.٢٩٣	٠.٦٤١	١٠٠.٥	
	٣.٨٦٨	٣.٠٢٦	٠.٨٤١٢	١١٢.٧٨	
	٥.٨٠٢	٤.٢٤١	١.٥٦١	١٢٩.٦٥	
	٧.٧٣٦	٥.٧٧٢	١.٩٦٤	١٥٦.٣	

جدول (١١-٤) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{0a}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٣٤٨٥	٠.١٣٥	٩٩.٣٥	١٤٦.٦٧
	١.٩٣٤	١.٧٣٧٦	٠.١٩٦٤	١٣٥.٦	
	٣.٨٦٨	٣.٥٥٣	٠.٣١٥	١٦٢.١٥	
	٥.٨٠٢	٥.٣٠٤	٠.٤٩٨	١٨١.٢	
	٧.٧٣٦	٧.٠١١	٠.٧٢٥	١٩٥.٦٥	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.٢٥٧١	٠.٢٢٦٤	٩٦.٢٤	١٣٠.٦٦
	١.٩٣٤	١.٤٠٢٢	٠.٥٣١٨	١٢٥.٤٨	
	٣.٨٦٨	٣.٢٣٣٢	٠.٦٣٤٨	١٤١.٢٧	
	٥.٨٠٢	٤.٩٧٨	٠.٨٢٤	١٦٩.٣٣	
	٧.٧٣٦	٦.٧٨٥	٠.٩٥١	١٩٠.٥٢	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٣١١	٠.٣٥٢٤	٨٩.٤٦	١٠١.٧٣
	١.٩٣٤	١.٤١	٠.٥٢٤	١١٩.٤٥	
	٣.٨٦٨	٣.٠١٧	٠.٨٥١	١٣١.١٢	
	٥.٨٠٢	٤.٧٦٢	١.٠٤	١٥٨.٢	
	٧.٧٣٦	٦.٥٨٧	١.١٤٩	١٨١.٩١	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٠٣٣	٠.٣٨٠٢	٧٦.٢	٨٣.٦٥
	١.٩٣٤	١.٣٠٨	٠.٦٢٦	٩٨.١٦	
	٣.٨٦٨	٢.٧٧٢	١.٠٩٦	١١٨.٩٤	
	٥.٨٠٢	٤.٥٥٢	١.٢٥	١٤٥.٦١	
	٧.٧٣٦	٦.٣٧٢	١.٣٦٤	١٦٨.٢١	

جدول (٤-١٢) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{٥٥}

Forming pressure (psi)	P _١ (atm)	P _٢ (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ^٣ /s)	Slope Q/ΔP (cm ^٣ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٢٨٧١	٠.١٩٦٤	١٠٥.٣٢	١٢٥.٣١
	١.٩٣٤	١.٧١٩	٠.٢١٥	١٣١.١	
	٣.٨٦٨	٣.٤٧٤	٠.٣٩٤	١٦٢.٥٧	
	٥.٨٠٢	٥.٣٢١	٠.٤٨١	١٧٩.٤٤	
	٧.٧٣٦	٦.٩٣٩٩	٠.٧٩٦١	١٨٨.٣١	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.٢٤٧٩	٠.٢٣٥٦	١٠١.٢٤	٨١.٨٧
	١.٩٣٤	١.٤٧٣	٠.٤٦١	١١٦.٥٨	
	٣.٨٦٨	٣.١٣٩	٠.٧٢٩	١٢٩.١٩	
	٥.٨٠٢	٤.٩٦	٠.٨٤٢	١٥٢.٦٧	
	٧.٧٣٦	٦.٥٩٨	١.١٣٨	١٧٤.٣	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٧٧١	٠.٣٠٦٤	٩٢.٣١	٥٥.٨٠
	١.٩٣٤	١.٢٢١٧	٠.٧١٢٣	١٠٤.٣٧	
	٣.٨٦٨	٢.٨٨٧	٠.٩٨١	١١٩.١٩	
	٥.٨٠٢	٤.٥٣٩	١.٢٦٣	١٣٦.٤	
	٧.٧٣٦	٦.٢٠٩	١.٥٢٧	١٦١.٢٧	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٥٩٥	٠.٣٢٤	٨٦.٢٦	٤٠.٦٠
	١.٩٣٤	١.٠٢٢	٠.٩١٢	٩٦.٥١	
	٣.٨٦٨	٢.٥٠٨	١.٣٦	١١٢.١٥	
	٥.٨٠٢	٤.٠٦١	١.٧٤١	١٣٩.٣١	
	٧.٧٣٦	٥.٧٣٦	٢	١٥٢.٦٣	

جدول (٤-١٣) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{1a}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٣٥٨٥	٠.١٢٥	١٠٣.٣٥	١٦٧.٢١
	١.٩٣٤	١.٧٣٩٨	٠.١٩٤٢	١٢٩.٢٦	
	٣.٨٦٨	٣.٦٧٢٩	٠.١٩٥١	١٥٩.٧٢	
	٥.٨٠٢	٥.٤٧٤	٠.٣٢٨	١٧٥.٦٦	
	٧.٧٣٦	٧.١٢٣٢	٠.٦١٢٨	١٩٨.١٣	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.٢٤٥٥	٠.٢٣٨	١٠٠.٢١	١٤٠.٣٤
	١.٩٣٤	١.٥٦٥	٠.٣٦٩	١٣٠.٦١	
	٣.٨٦٨	٣.٣٥١	٠.٥١٧	١٤٣.٨٧	
	٥.٨٠٢	٥.١٦٨	٠.٦٣٤	١٦١.٩	
	٧.٧٣٦	٦.٩٢	٠.٨١٦	١٨٤.٦٩	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٩٤٥	٠.٢٨٩	٩٠.٣٧	١٢٧.٣١
	١.٩٣٤	١.٣٧٣	٠.٥٦١	١١٢.٢١	
	٣.٨٦٨	٣.١٣٣	٠.٧٣٥	١٣٩.٧٨	
	٥.٨٠٢	٤.٩١١	٠.٨٩١	١٥٨.٥٩	
	٧.٧٣٦	٦.٧٧٥	٠.٩٦١	١٧٧.٥٦	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١١٢٢	٠.٣٧١٣	٨٤.١١	١٠٢.٠٥
	١.٩٣٤	١.٢٧٣	٠.٦٦١	١٠١.٣	
	٣.٨٦٨	٣.٠١٩	٠.٨٤٩	١٢٥.٨٣	
	٥.٨٠٢	٤.٧٨٥٥	١.٠١٦٥	١٣٩.٩١	
	٧.٧٣٦	٦.٥٨٣	١.١٥٣	١٦٥.٣٤	

جدول (٤-٤) يمثل حسابات معدل الجريان والميل للخلطة M_{7b}

Forming pressure (psi)	P_1 (atm)	P_2 (atm)	ΔP (atm)	Q (cm ³ /s)	Slope $Q/\Delta P$ (cm ³ /s .atm)
٢٠١١	٠.٤٨٣٥	٠.٣١٥	٠.١٦٨٥	١٠٢.٢	١٨٠.٩٣
	١.٩٣٤	١.٧٣٩٧	٠.١٩٤٣	١٣١.٥٧	
	٣.٨٦٨	٣.٦١٠٧	٠.٢٥٧٣	١٦١.٨٤	
	٥.٨٠٢	٥.٣٥١	٠.٤٥١	١٧٩.٨٦	
	٧.٧٣٦	٧.١٤٥	٠.٥٩١	١٩٢.٣٢	
٤٠٢٣	٠.٤٨٣٥	٠.٢٧٩٩	٠.٢٠٣٦	٩٥.٦٧	١٠١.٨٣
	١.٩٣٤	١.٥٤٣	٠.٣٩١	١٢٢.٤٢	
	٣.٨٦٨	٣.٣٥٢	٠.٥١٦	١٤٦.٧٣	
	٥.٨٠٢	٤.٩٠٨	٠.٨٩٤	١٦٣.٥٣	
	٧.٧٣٦	٦.٨٢	٠.٩١٦	١٧٨.٩١	
٦٠٣٤	٠.٤٨٣٥	٠.١٦٨٥	٠.٣١٥	٩٤.١٨	٧١.٦٢
	١.٩٣٤	١.٣٠٨	٠.٦٢٦	١٠٩.٢٦	
	٣.٨٦٨	٣.٠١٦	٠.٨٥٢	١٣١.٢٢	
	٥.٨٠٢	٤.٧٤٢	١.٠٦	١٥٠.٤٤	
	٧.٧٣٦	٦.٣٧٥	١.٣٦١	١٦٤.٨٩	
٨٠٤٥	٠.٤٨٣٥	٠.١٠٣٤	٠.٣٨٠١	٩١.١٦	٤٧.٣٦
	١.٩٣٤	١.١٨٨	٠.٧٤٦	٩٩.٨٦	
	٣.٨٦٨	٢.٧٧٦	١.٠٩٢	١٢١.٤٦	
	٥.٨٠٢	٤.٤٧١	١.٣٣١	١٣٨.٥٩	
	٧.٧٣٦	٥.٩١	١.٨٢٦	١٥٥.١٢	

٢-٣-٤ المسامية

Porosity

تقاس المسامية الظاهرية طبقاً للطريقة المعتمدة بموجب المواصفة (ASTM C373)^[٢٨]. إذ توضع النماذج في فرن تجفيف لمدة أربع وعشرين ساعة بدرجة حرارة ١٠٠°C وبعد ذلك تترك داخل الفرن لتبرد، ثم توزن مباشرة وهي جافة W_d بوساطة ميزان حساس (الأوزان يجب أن تقرأ مرتين عشريتين بعد الفارزة على الأقل)، وبعد ذلك تغمر النماذج كلها في حوض من الماء وتسخن بدرجة حرارة ١٠٠°C ثم تترك لمدة أربع وعشرين ساعة ثم تؤخذ النماذج من حوض الماء وتجفف سطوحها بوساطة قطعة من القماش مباشرة وتوزن مرة ثانية W_s وبعدها يتم قياس وزن النماذج وهي مغمورة بالماء W_i إذ يوضع النموذج في السلة التي تعلق بالميزان وتغمر بالماء، ثم تحسب المسامية الظاهرية من خلال العلاقة:

$$n\% = \frac{W_s - W_d}{W_s - W_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (٢-٤)$$

إذ تمثل n نسبة المسامية الظاهرية Apparent porosity.

أما نصف القطر الهيدروليكي m فيحسب من المعادلة (٣-٢٦)، ولكن بتحويل وحدات K_p إلى وحدات (cm^2) قبل تطبيقها في هذا القانون إذ:

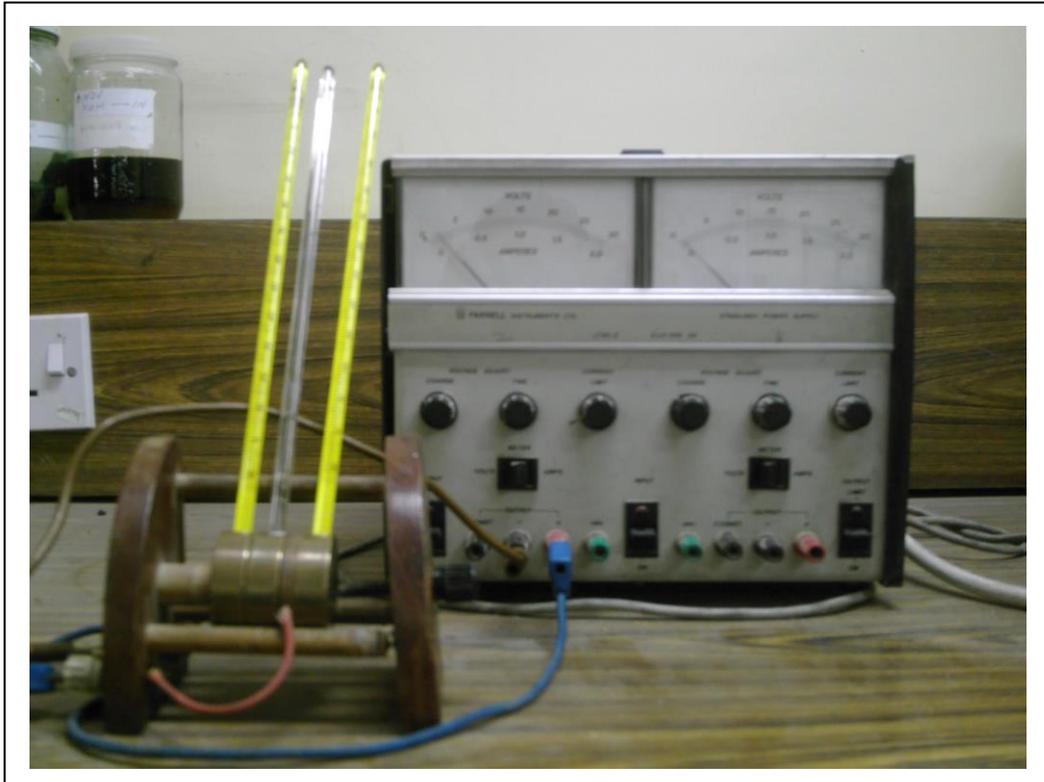
$$1 \text{ Darcy} = 9.8697 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$$

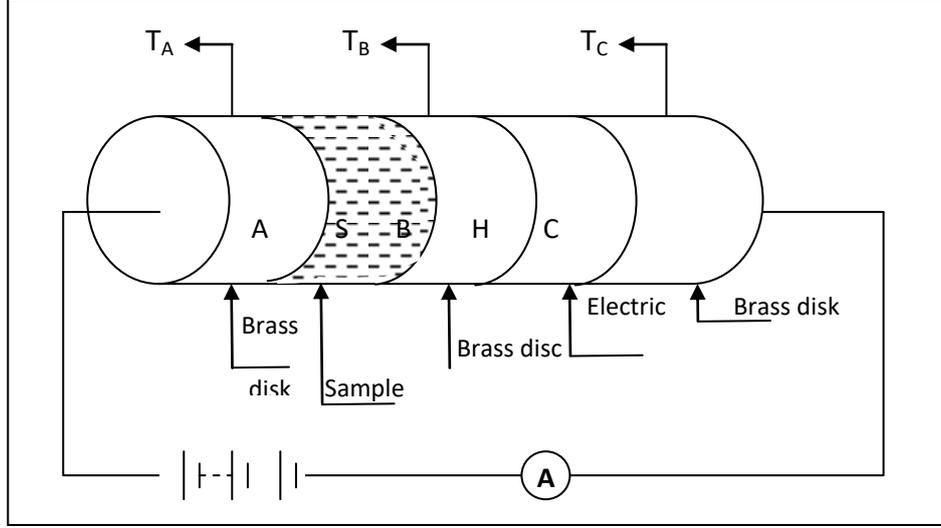
وحدات قياس نصف القطر الهيدروليكي هي (cm) ^[٢٧].

Thermal Conductivity

٣-٣-٤ التوصيل الحراري

لحساب معامل التوصيل الحراري لجميع النماذج، استعمل جهاز قرص (لي) (Lee's Disk). إذ يتكون هذا الجهاز من أربعة أقراص معدنية هي A ، B وتوضع بينهما العينة (S) والقرص H المسخن ويليه القرص C وكما هو موضح في الشكل (٢-٤).





-b-

شكل (٢-٤) -a صورة فوتوغرافية لجهاز قرص لي

-b مخطط يوضح الأقراص الأربعة والعينة

إن مبدأ عمل هذا الجهاز يعتمد على تحويل الطاقة الكهربائية المسلطة إلى طاقة حرارية للقرص (H) والذي يمثل المسخن وبعدها تنتقل الحرارة من المسخن إلى القرص الذي يليه حتى تصل إلى القرص الأخير وبعد مدة زمنية معينة، إلى أن تستقر درجة حرارة الأقراص الثلاثة تسجل درجاتها (T_A, T_B, T_C) على التوالي باستعمال المحارير الموضوعة داخلها ثم تحسب قيمة (e) والتي تمثل كمية الطاقة الحرارية المارة عبر وحدة مساحة القرص لكل ثانية ($W/m^2.K$) من العلاقة الآتية: [٦٩].

$$IV' = \pi r^2 e (T_A + T_B) + 2\pi r e \left(d_A T_A + d_s \frac{1}{2} (T_A + T_B) + d_B T_B + d_C T_C \right) \dots\dots\dots (٣-٤)$$

إذ أن d : سمك القرص، $\{d_A, d_B, d_C, d_s = 12 \text{ mm}, d_s = 0 \text{ mm}\}$

I : التيار المار = 0.20 Am .

V' : الفولتية المجهزة = 6 Volt .

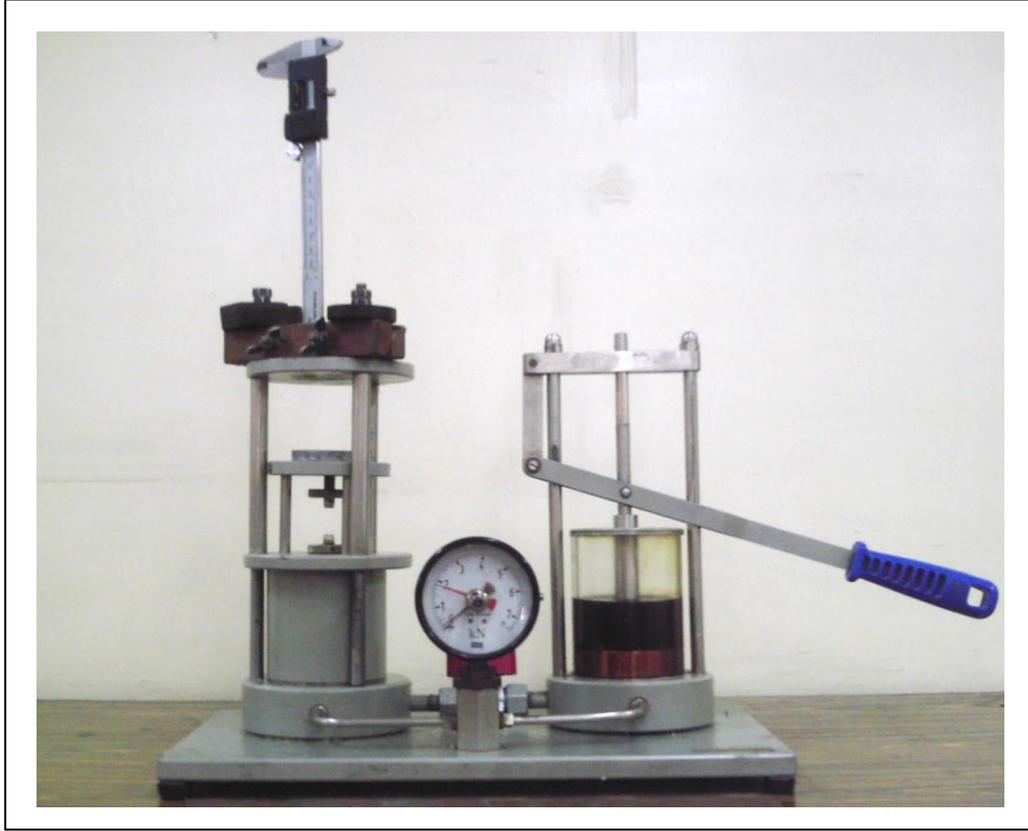
r : نصف قطر الأقراص = 20 mm .

ولحساب قيمة k' التي تمثل معامل التوصيل الحراري نعوض قيمة (e) بالعلاقة الآتية:

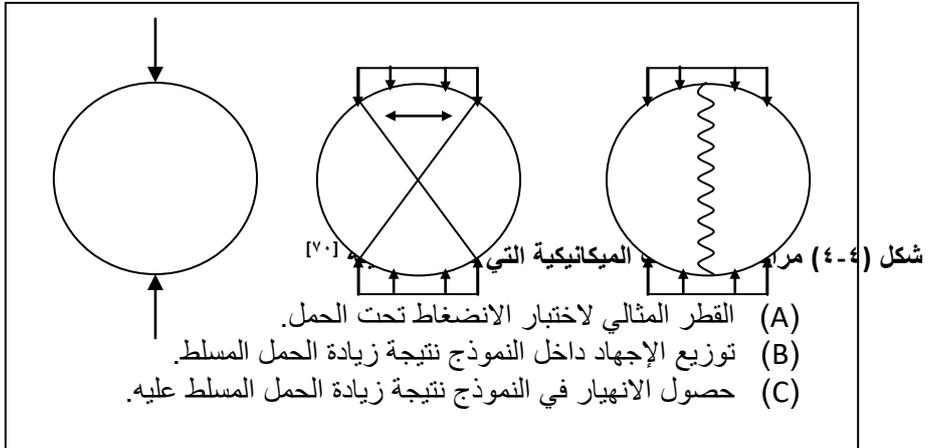
$$k' \left(\frac{T_B - T_A}{d_s} \right) = e \left(T_A + \frac{2}{r} \left(d_A + \frac{1}{4} d_s \right) T_A + \frac{1}{2r} d_s T_B \right) \dots\dots\dots (٤-٤)$$

٤-٣-٤ مقاومة الانضغاط Compressive Strength

تم إجراء اختبار الانضغاط في مختبرات قسم العلوم التطبيقية التابعة للجامعة التكنولوجية باستعمال المكبس الهايدروليكي المبين في الشكل (٣-٤) إذ توضع العينة بين مستويين متوازيين على أن يكون ارتفاعها متجانساً بحيث تلامس جميع أجزاء المساحة السطحية للعينة المسلط عليها الحمل، ويسلط الحمل بصورة تدريجية على العينة ويقراً ما يقابله من تغير في الطول حتى حصول الفشل للعينة إذ يمثل أقصى حمل مسلط قيمة مقاومة الانضغاط القصوى لها. ويوضح الشكل (٤-٤) مراحل الإجهادات الميكانيكية التي تمر بها العينة الاسطوانية أثناء الانضغاط [٧٠].



شكل (٣-٤) صورة فوتوغرافية لجهاز قياس مقاومة الانضغاط



لقد تم حساب متانة الانضغاط من العلاقة الآتية [٦٨].

$$C.S = 2F / \pi Dt$$

..... (٥-٤)

تمثل (C.S) متانة الانضغاط (MPa).

(F) أعظم حمل مسلط (N).

(D) قطر العينة (m).

(t) سمك العينة (m).

٤-٤ أضافة فلوريد الليثيوم Adition of Lithium Fluoride

تم إضافة ١٪ من مسحوق فلوريد الليثيوم لنماذج مكررة من الخلطات M_{1a} و M_{1b} و M_{1a} و M_{1b} وتم تشكيلها بضغط ٢٠١١ psi وجفت وأحرقت بالظروف المذكورة نفسها في تحضير النماذج.

فلوريد الليثيوم (LiF) مادة تذوب في الماء بنسبة (٢٧% at ١٨ °C) ويضاف كمادة مطحونة بيضاء (جميع الهاليدات مركبات صلبة متبلورة أيونية بيضاء) إلى المكونات المحروقة لتحسين خواصها فضلاً عن انه يخفض نقطة انصهارها ويزيد من مدى الحرق [١٣].

الفصل الخامس النتائج المناقشة

الفصل الخامس

النتائج والمناقشة

Permeability and Porosity

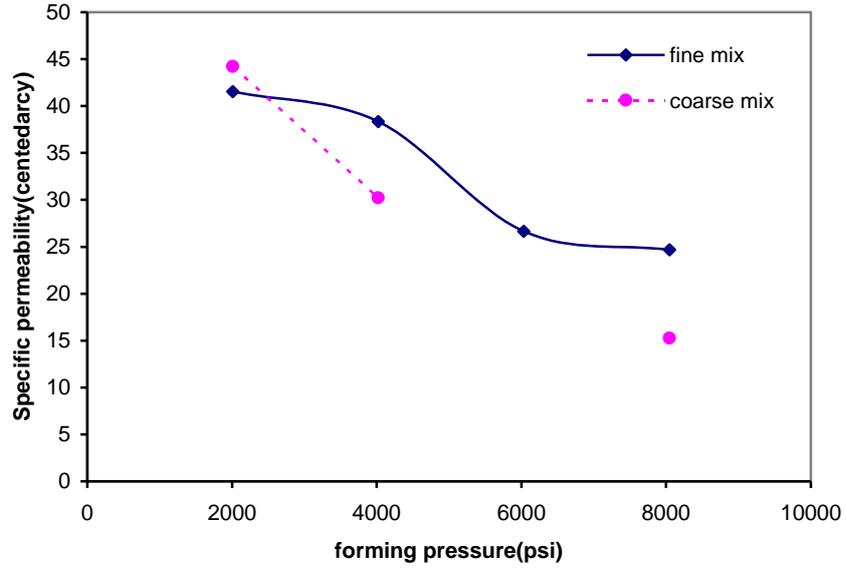
١-٥ النفاذية والمسامية

تم حساب النفاذية النوعية لجميع النماذج وبوحدات (Centidarcy) من قيم الميول المعطاة في الجداول من (٣-٤) إلى (١٤-٤) وفقاً للمعطيات المذكورة في الجزء العملي، وبرسم النفاذية النوعية مع الزيادة في ضغط التشكيل التي تبينها الأشكال من (١-٥) إلى (٦-٥) لوحظ أن النفاذية النوعية تقل لجميع النماذج بزيادة ضغط التشكيل، إذ تحتوي النماذج المشكلة بضغط تشكيل واطئ فراغات كبيرة بين جسور الجسيمات الكبيرة وبزيادة ضغط التشكيل فأن الفراغات الكبيرة سوف تختفي بينما المسامات الصغيرة تبقى دون تغيير ويرجع السبب في ذلك الى تكسر بعض الجسيمات الكبيرة بزيادة ضغط التشكيل مما يؤدي إلى سد تلك الفراغات وبالتالي يحصل هبوط في قيم النفاذية النوعية للنماذج المشكلة.

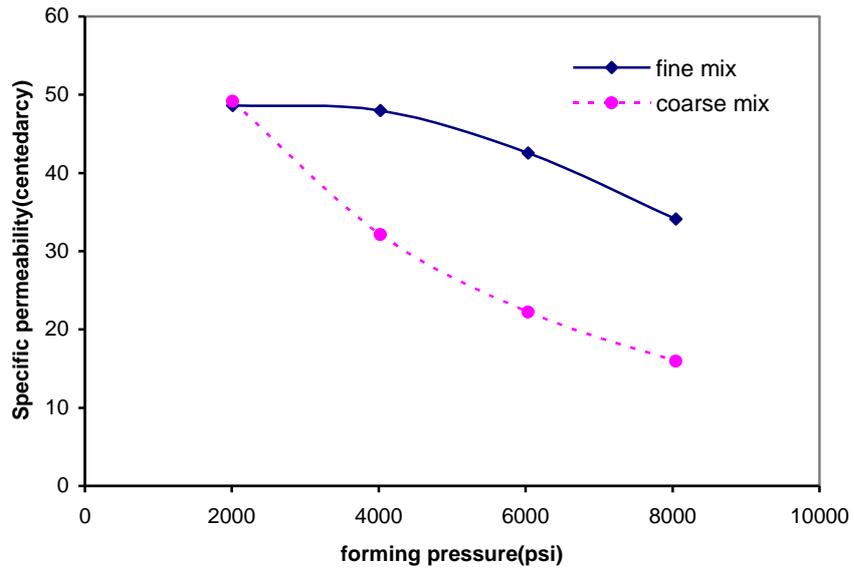
ومن المنحنيات يتبين أن النقصان في قيمة النفاذية النوعية للخلطات الخشنة يكون أكبر بزيادة ضغط التشكيل ففي الخلطة M_1 على سبيل المثال فأن النفاذية النوعية عند ضغط التشكيل psi ٢٠١١ كانت تساوي centidarcy (٤١.٥٥) و (٤٤.٢٤) centidarcy للخلطتين الناعمة والخشنة على التوالي، فأصبحت centidarcy (٢٤.٦٦) للخلطة الناعمة و centidarcy (١٥.٢٦) للخلطة الخشنة عند الضغط psi ٨٠٤٥، وهذا ما أظهرته جميع الخلطات المتبقية كما مبين في الأشكال، في حين وجد كل من (Bakker) و (Snyder)^[١٨] أن النفاذية تقل بزيادة ضغط التشكيل أيضاً وأن النقصان في قيمتها يكون أكثر انحداراً في الخلطات الخشنة فعند ضغط تشكيل psi ٣٠٠٠ كانت النفاذية للخلطة الخشنة centidarcy ٢٧٠٠ وأصبحت عند ضغط تشكيل psi ٦٠٠٠ تقريباً centidarcy ٨٠٠، أما الخلطة الناعمة فانحدرت فيها النفاذية من centidarcy ٢١٠٠ إلى centidarcy ١٣٠٠ بازدياد ضغط التشكيل من psi ٣٠٠٠ إلى psi ٦٠٠. أعزى (Bakker) و (Snyder) هذا السلوك إلى أن التكسر الحاصل في الجسيمات داخل الخلطات الخشنة يكون أكبر منه في الخلطات الناعمة لأن عدد الجسيمات المتماسمة في الخلطات الخشنة يكون أقل منه في الناعمة وبذلك فأن الاجهادات الموضعية تكون أكبر وهذا يفسر الهبوط الحاد في قيم النفاذية النوعية للخلطات الخشنة بينما يكون أقل حدة في الخلطات الناعمة. فضلاً عن ذلك فأن نسبة الفراغات الكبيرة تكون أكثر في الخلطات الخشنة وهذا بحكم الجسيمات الكبيرة الموجودة في تركيبها بينما تكون نسبة المسامات الصغيرة التي لاتتأثر كثيراً بزيادة ضغط التشكيل أكثر من الفراغات الكبيرة في الخلطات الناعمة لذلك يكون تأثير ضغط التشكيل أكبر على الخلطات الخشنة.

على الرغم من تشابه السلوك بين النماذج المحضرة والنماذج التي درسها كل من (Bakker) و (Snyder)^[١٨]، إلا أن هنالك اختلاف في قيم النفاذية بمقدار مرتبتين وهذا الاختلاف يرجع إلى عدم معايرتهم لمعادلة النفاذية مع لزوجة المائع المستعمل.

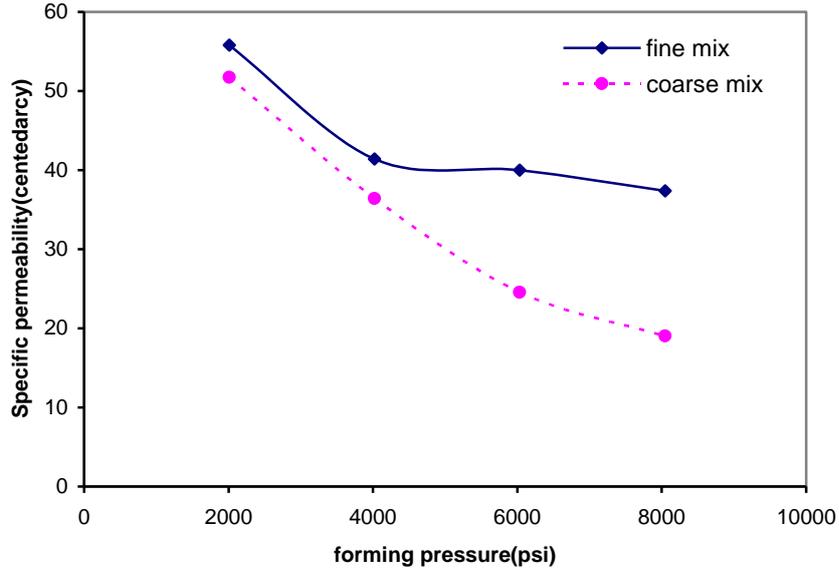
إن أعلى قيمة للنفاذية النوعية أظهرها النموذج التابع للخلطة $M_{٦b}$ والمشكل بضغط تشكيل psi ٢٠١١ كانت (٩٢.٤٥٣) باستثناء النموذج التابع للخلطة $M_{١b}$ والمشكل بضغط تشكيل psi ٦٠٣٤ الذي أظهر نفاذية عالية جداً أهملت بسبب وجود تشققات في النموذج ناتجة عن عملية الحرق. أما أوطأ قيمة للنفاذية كانت (١٥.٢٥٨) وهي للنموذج التابع للخلطة $M_{١b}$ والمشكل بضغط psi ٨٠٤٥.



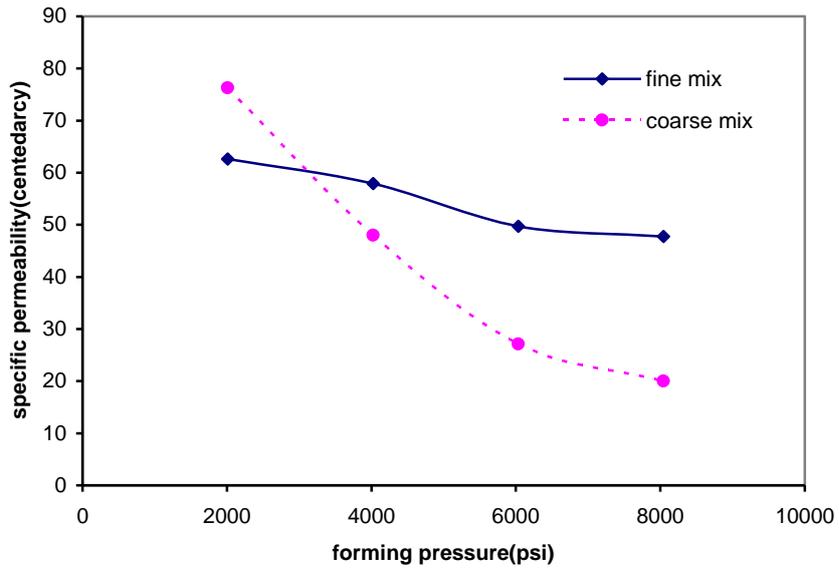
شكل (١-٥) يمثل تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_1 بمعدل حرق $1400^\circ\text{C}/\text{hr}$



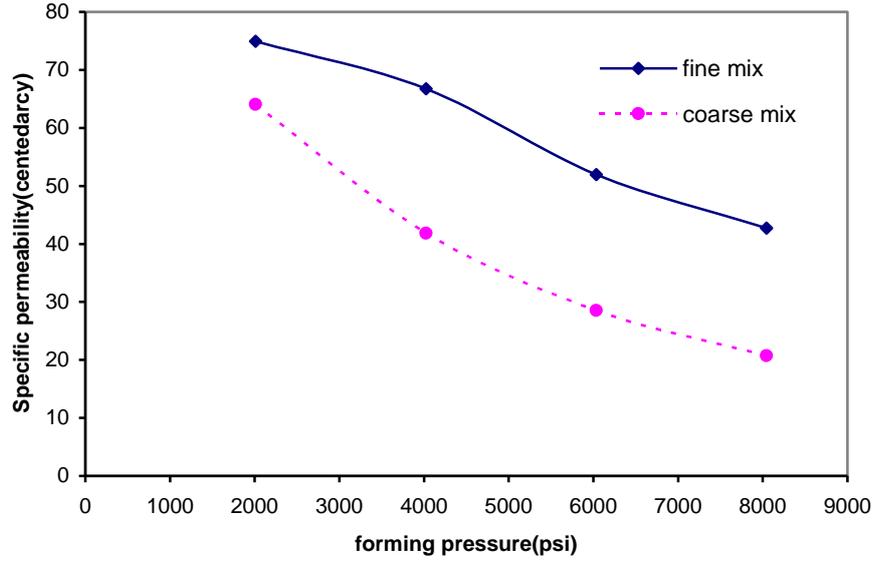
شكل (٢-٥) يمثل تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_2 بمعدل حرق $1400^\circ\text{C}/\text{hr}$



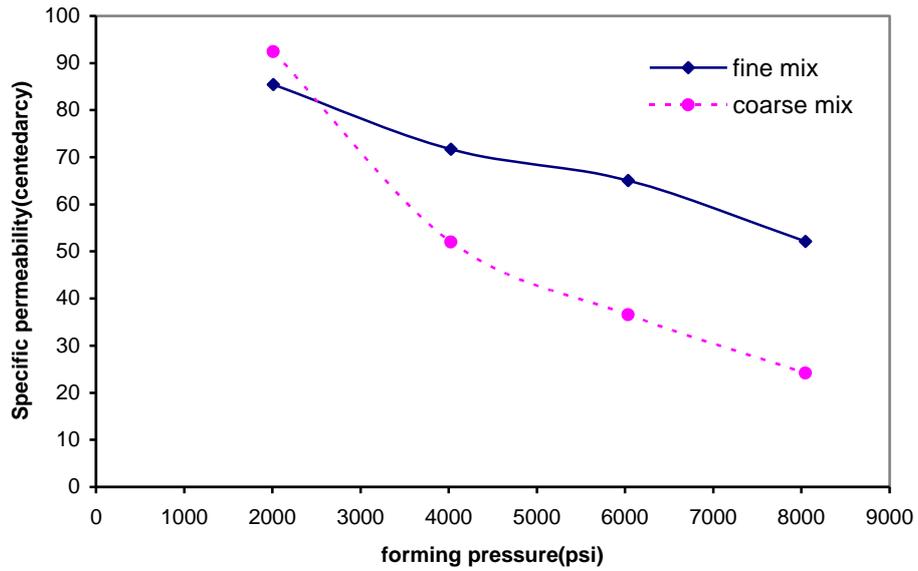
شكل (٣-٥) يمثل تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_r بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr



شكل (٤-٥) يمثل تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_٤ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr

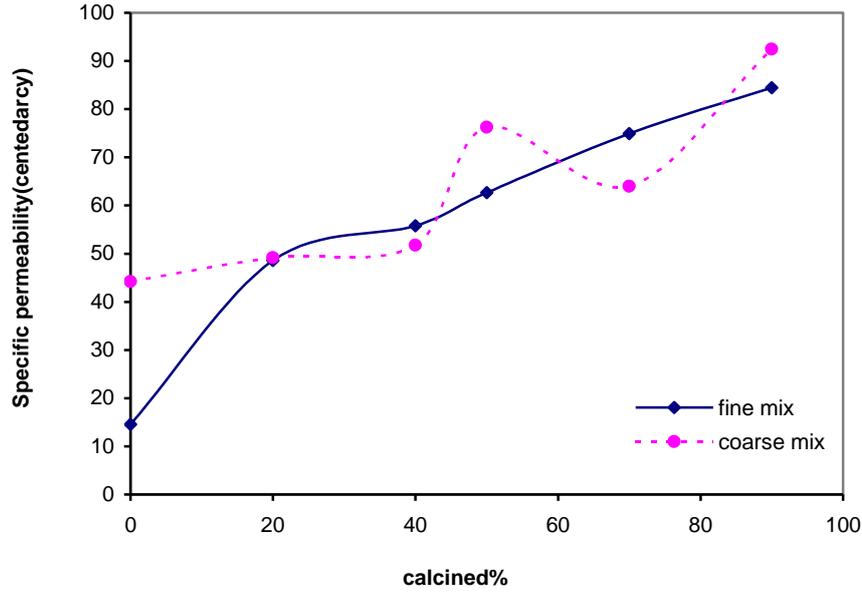


شكل (٥-٥) يمثل تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_٦ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr



شكل (٦-٥) يمثل تغير النفاذية النوعية مع ضغط التشكيل للخلطة M_٦ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr

تغيرت النفاذية النوعية مع تغير نسب المكونات إذ أسدت الخلطات التي تحتوي على نسبة Calcind أكثر نفاذية أكبر من الخلطات المحتوية على الكورنديم وهذا مبين في الشكل (٧-٥).



شكل (٧-٥) يمثل تغير النفاذية النوعية مع تغير نسب المكونات بثبوت ضغط التشكيل عند ٢٠١١ psi

إن سبب زيادة النفاذية بزيادة نسبة الـ (Calcind) هو لكثرة الشوائب الموجودة في الـ (Tabular) التي تعيق استقامة القناة المسامية المسؤولة عن نقل تيارات الغاز.

أما حسابات المسامية (n) ونصف القطر الهيدروليكي (Hydraulic Radius) (m) لجميع الخلطات فهي مبينة في الجداول (١-٥)، (٢-٥)، (٣-٥)، (٤-٥)، (٥-٥)، (٦-٥) ومنها نلاحظ أن المسامية المفتوحة تقل بزيادة ضغط التشكيل وذلك بسبب اختزال الفراغات الكبيرة الموجودة في النموذج وتكسر بعض الجسيمات مؤدياً إلى تقليل المسامية المفتوحة.

فضلاً عما تقدم، فإن زيادة ضغط التشكيل يؤدي إلى زيادة المادة المنصهرة أثناء التسخين بسبب زيادة مساحة السطوح المتلامسة وهذا بدوره يؤدي إلى تقليل المسامية المفتوحة والنفاذية النوعية للنماذج^[٧١].

لقد أكد (Bakker) و (Snyder)^[١٨] أن المسامية تقل بزيادة ضغط التشكيل فقد وجد أن المسامية تساوي ٣٢٪ و ٣٠٪ للخلطتين الناعمة والخشنة على التوالي وعند ضغط تشكيل ٢٠٠٠psi ولكن أصبحت المسامية تساوي ٢٤٪ و ٢٢٪ للخلطتين الناعمة والخشنة على التوالي عند ضغط تشكيل ٦٠٠٠psi. وعند درجة حرارة تلييد ١٤٥٠ °C.

أما (عبد العباس)^[٦٨] فقد أكدت ذلك أيضاً فوجدت أن المسامية في الجسم السيراميكي تقل بزيادة ضغط التشكيل فزيادة ضغط التشكيل من ٣٦٢٥psi إلى ١٠٨٧٥psi قلت المسامية من ٦.٩٨٪ إلى ٤.١١٪ عند درجة حرارة التلييد ١٤٠٠ °C.

جدول (١-٥) يبين حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_١

Forming pressure (psi)	Fine mix (a)		Coarse mix(b)	
	n %	m(cm)*١٠ ^{-٥}	n %	m(cm)*١٠ ^{-٥}
٢٠١١	٢٧.٤	٢.٧٤	٢٥.٩	٢.٩٠

ε.ϰϰ	ϰϰ.ελ	ϰ.λε	ϰϰ.ϰ	ϰ.ϰε
ϰ.ϰε	ϰϰ.ϰ	ϰ.εε	ε.ε	ϰ.ϰϰ
λ.εε	ϰϰ.ϰ	ϰ.ϰϰ	ϰϰ.λ	ϰ.ϰϰ

جدول (٢-٥) يبين حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_٢

Forming pressure (psi)	Fine mix (a)		Coarse mix (b)	
	n %	m(cm)*١٠ ^{-٥}	n %	m(cm)*١٠ ^{-٥}
٢٠١١	٢٨.٣١	٢.٩١	٢٥.٨	٣.٠٧
٤٠٢٣	٢٥.٦	٣.٠٤	٢٣.٦	٢.٥٩
٦٠٣٤	٢٤.٤٢	٢.٩٣	٢٢	٢.٢٣
٨٠٤٥	٢١.٥	٢.٨٠	٢٠.٦	١.٩٥٤

جدول (٣-٥) يبين حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_٣

Forming pressure (psi)	Fine mix (a)		Coarse mix (b)	
	n %	m(cm)*١٠ ^{-٥}	n %	m(cm)*١٠ ^{-٥}
٢٠١١	٢٨.٣	٣.١٢	٢٧.٧	٣.٠٤
٤٠٢٣	٣٢.٢	٢.٥٢	٢٦.١	٢.٦٢
٦٠٣٤	٢٦.٠١	٢.٧٥	٢٤.٣	٢.٢٣
٨٠٤٥	٢٤.٣	٢.٧٦	٢١	٢.١١

جدول (٤-٥) يبين حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M:

Forming pressure (psi)	Fine mix (a)		Coarse mix (b)	
	n %	$m(\text{cm})^{*1.0}$	n %	$m(\text{cm})^{*1.0}$
٢٠١١	٣٠.٢	٣.٢٠	٢٧.٩	٣.٦٧
٤٠٢٣	٣٠	٣.٠٩	٢٧.٣	٢.٩٥
٦٠٣٤	٢٧.٩	٢.٩٦	٢٦.٩	٢.٢٣
٨٠٤٥	٢٥	٣.٠٧	٢١.٤٣	٢.١٥

جدول (٥-٥) يبين حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M٥:

Forming pressure (psi)	Fine mix (a)		Coarse mix (b)	
	n %	$m(\text{cm})^{*1.0}$	n %	$m(\text{cm})^{*1.0}$
٢٠١١	٣٣.٣	٣.٣٣	٣٠.١	٣.٢٤
٤٠٢٣	٣٠.١	٣.٣١	٢٧.٩	٢.٧٢
٦٠٣٤	٣٠	٢.٩٢	٢٤.٥	٢.٤٠
٨٠٤٥	٢٦.٣	٢.٨٣	٢٣.٦	٢.٠٨

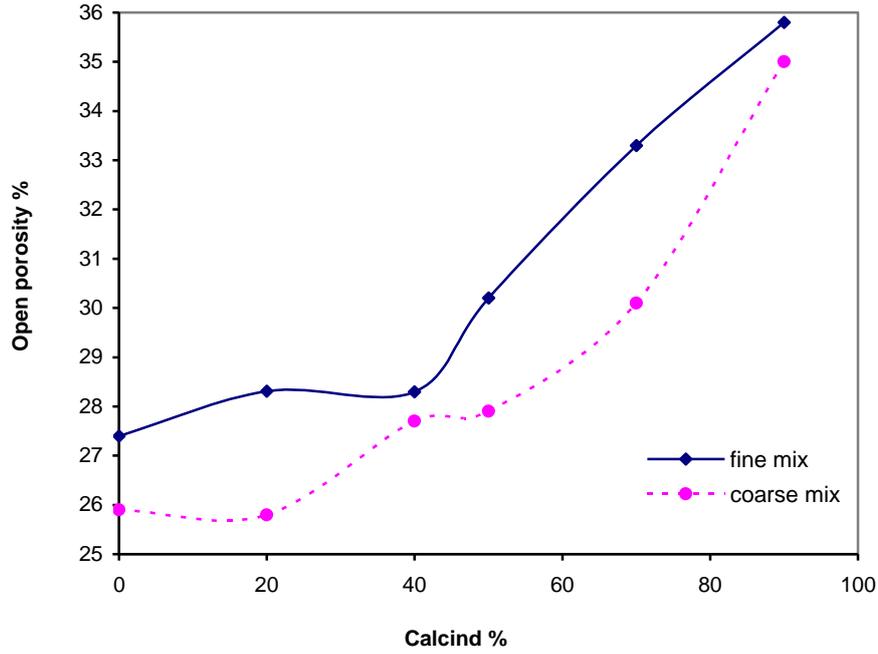
جدول (٦-٥) يبين حسابات المسامية المفتوحة ونصف القطر الهيدروليكي (m) للخلطة M_٦

Forming pressure (psi)	Fine mix (a)		Coarse mix (b)	
	n %	m(cm)*١٠ ^{-٥}	n %	m(cm)*١٠ ^{-٥}
٢٠١١	٣٥.٨	٣.٤٣	٣٥	٣.٦١
٤٠٢٣	٣٣.٥	٣.٢٥	٣٢.٤	٢.٨٢
٦٠٣٤	٣١.١	٣.٢١	٢٨.٧	٢.٥١
٨٠٤٥	٢٧.٦	٣.٠٥	٢٣.٩	٢.٢٥

إن نسبة المسامية للخلطات الناعمة كانت أكبر من المسامية للخلطات الخشنة في جميع ظروف التحميل، ويظهر للوهلة الأولى أن هذا غير منطقي فأن المساحيق ذوات معدل القطر الحبيبي الأقل تزيد من عملية التلييد نتيجة زيادة مساحة التلامس بين حبيبات المواد الأولية والذي يؤدي إلى زيادة عملية الانتشار والتفاعلات الكيماوية التي تحدث أثناء عملية التلييد [٧٢]، لذلك فأن الطور السائل المتكون في أثناء عملية التلييد يكون أكبر وبالتالي المسامية تكون أقل وهذا يتفق مع ما توصل إليه الباحث (حسين، ٢٠٠٣) [٧٣] عند دراسته خواص المادة السيراميكية العازلة إذ وجد بأن المسامية تقل باستعمال مساحيق ذات معدل قطر حبيبي صغير.

لكن لو نظرنا إلى التوزيع الحجمي الحبيبي للخلطتين الخشنة والناعمة لوجدنا أن النظرية أعلاه لا تنطبق عليها وذلك لأن الخلطة الخشنة يتراوح الحجم الحبيبي فيها بين (٦٠٠ - ٢٣٦٠) μm فضلاً عن وجود الجبيبات ذات القطر $٤٥ \mu\text{m}$ بكمية كبيرة تقارب ٢٢٪ أما الخلطة الناعمة فيتراوح فيها الحجم الحبيبي بين (١٥٠ - ٦٠٠) μm وتقريباً ٢٥٪ حبيبات ذات القطر $٤٥ \mu\text{m}$ ، لذلك فأن وجود الدقائق الكبيرة في الخلطة الخشنة والدقائق الصغيرة التي تملأ الفراغات سوف يعطي جسماً مكبوساً ذا كثافة عالية ومسامية قليلة.

أما تغير قيم المسامية مع التغير في نسب المكونات فهي موضحة بالشكل (٨-٥) حيث تزداد نسبة المسامية بازدياد الـ (Calcind) ونقصان الـ (Corundum). إن الشوائب الموجودة في الـ (Corundum) تؤدي إلى سد المسامات وبالتالي تقليل المسامية.



شكل (٨-٥) يمثل تأثير نسب المكونات في المسامية بثبوت ضغط التشكيل عند ٢٠١١ psi

فضلاً عن ذلك فإن الكثافة الحجمية الأولية لمادة الكورنندم هي أكبر من الكثافة الحجمية لمادة الكالسايند إذ تمتلك الأولى كثافة حجمية مقدارها 3.5 g/cm^3 . بينما تكون كثافة الكالسايند 1.2 g/cm^3 وهذا الفرق بالكثافة أدى إلى وجود فرق بالمسامية إذ تقل المسامية بزيادة الكثافة [٤]. لقد أظهرت بعض النتائج مسامية عالية كما في النموذج التابع للخلطة M_{1b} والمشكل بضغط ٦٠٣٤ psi إذ كانت المسامية فيه ٤٠٪ والنموذج التابع للخلطة M_{3a} والمشكل بضغط ٤٠٢٣ psi إذ بلغت المسامية فيه ٣٢.٢٪ والسبب في ذلك هو حصول تشققات في هذه النماذج أدت إلى رفع نسبة المسامية وهي تعتبر نماذج فاشلة.

تعد النفاذية النوعية دالة لتركيب المسامة وأن الصعوبة في فهم أي مقدار فيزيائي يعتمد على هذا المعامل هو عدم القدرة على تحديده بصورة مستقلة عن باقي المعاملات الفيزيائية، لذلك يتم ربط مفهوم النفاذية النوعية عادةً مع معدل حجم المسامة أو مع التوزيع الحجمي المسامي، وبسبب التركيبي الهندسي المعقد للجسم المسامي قام الباحث (Kozeny, ١٩٢٧) [٦١] بحل تلك الصعوبة باستعماله مفهوم نصف القطر الهيدروليكي (m)، الذي تم حسابه لجميع النماذج والموضح في الجداول (١-٥) و(٢-٥) و(٣-٥) و(٤-٥) و(٥-٥) و(٦-٥).

إن تغير نصف القطر الهيدروليكي مع ضغط التشكيل كان عشوائياً فعلى الرغم من تناقص قيمته مع زيادة ضغط التشكيل غالباً إلا أن بعض النماذج أظهرت زيادة في قيمة نصف القطر الهيدروليكي مع زيادة ضغط التشكيل كما في النماذج M_{1a} المشكل بضغط ٤٠٢٣ psi، M_{2a} المشكل بضغط ٤٠٢٣ psi، M_{2a} المشكل بضغط ٦٠٣٤ psi، M_{3a} المشكل بضغط ٨٠٤٥ psi، M_{3a} المشكل بضغط ٨٠٤٥ psi، إن سبب ذلك هو أن هذه النماذج كانت تمتلك حجماً مسامية أكبر من النماذج التي شكلت بضغط تشكيل أقل على الرغم من أن الأخيرة كانت أكبر منها في قيم النفاذية والمسامية [٤].

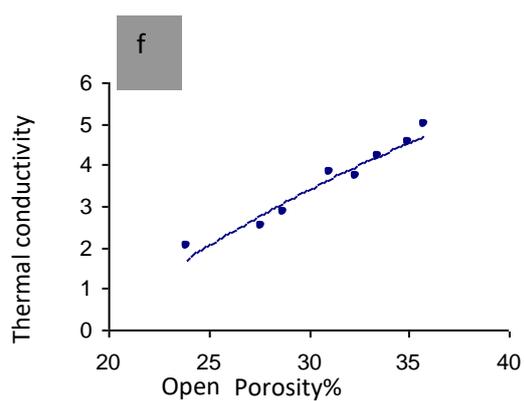
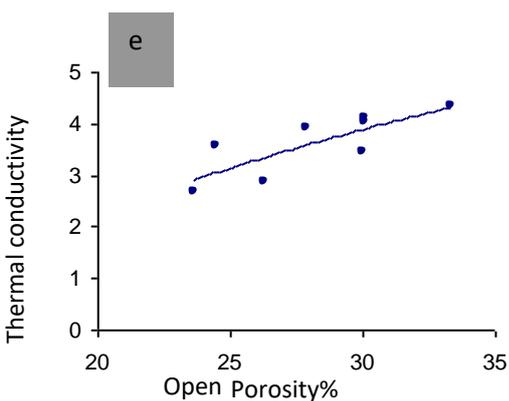
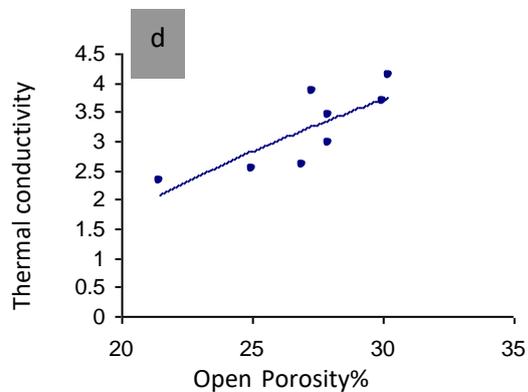
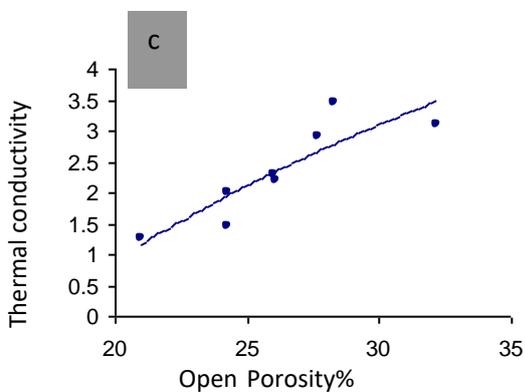
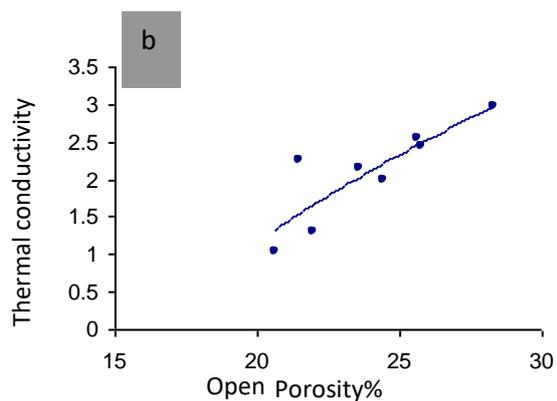
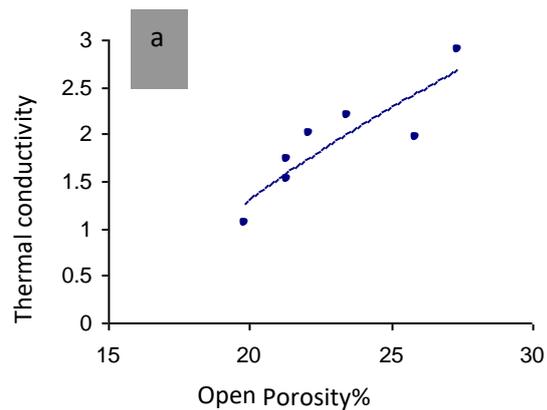
في حين وجد كل من (Lukasiewicz) و(Reed) [٤] بأن زيادة ضغط التشكيل تؤدي إلى تضيق منطقة الحجم المسامية فمثلاً عند ضغط تشكيل (١٠٠) psi وجدوا بأن الأقطار المسامية تتراوح بين $(0.5 - 5) \mu\text{m}$ وأصبحت عند ضغط تشكيل (٣٠٠٠) psi تتراوح بين $(0.5 - 1) \mu\text{m}$.

٢-٥ التوصيل الحراري

Thermal Conductivity

تم حساب خاصية التوصيل الحراري لكافة المجاميع المعروفة في ظروف تحضيرها باستعمال العلاقة (٤-٤). أن القيم الداخلة في الحسابات متأتية من القياسات المحققة من استعمال قرص لي (Lee's disk). إذ أن كل مجموعة تتضمن نماذج مكبوسة بظروف تحميل مختلفة ومقسمة إلى نوعين من الحجم الحبيبية.

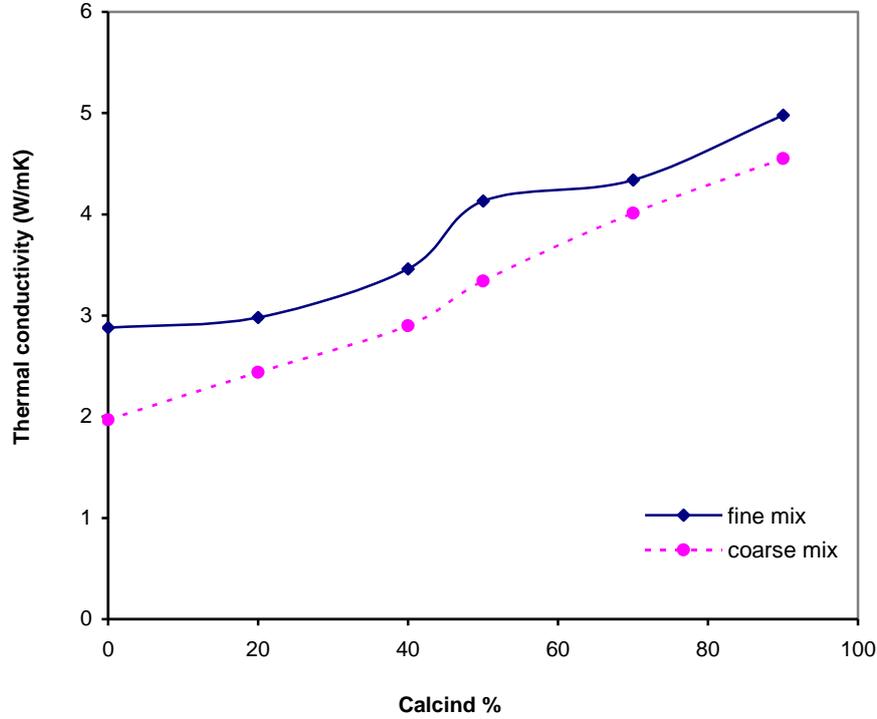
نلاحظ من الشكل (٩-٥) أن قيمة التوصيلية الحرارية تزداد بازدياد قيم المسامية وهنا تجب الإشارة إلى نقطة مهمة وهي الفرق بين المسامات المغلقة والمسامات المفتوحة، إن المسامات المفتوحة تؤدي إلى انتقال الغازات الساخنة من الجهة الساخنة باتجاه الجهة الباردة عن طريق تيارات الحمل التي تعمل على زيادة التوصيلية الحرارية للمادة. أما المسامات المغلقة فأنها تمنع انتقال الغازات الساخنة إي لا تحصل تيارات حمل وبالتالي يهمل تأثيرها على قيمة التوصيلية الحرارية للمواد السراميكية المسامية^[٧٤].



شكل (٩-٥) يوضح تغير التوصيل الحراري مع المسامية

a- للخلطة M₁، b- للخلطة M₂، c- للخلطة M₃، d- للخلطة M₄، e- للخلطة M₅، f- للخلطة M₆

أما تأثير نسب الخلط في التوصيل الحراري فهي مبينه في الشكل (١٠-٥) بثبوت ضغط التشكيل عند القيمة ٢٠١١ psi وقد لوحظ بأن التوصيل الحراري يزداد بازدياد نسبة الـ (Calcind) في الخلطة، سبب ذلك هو زيادة المسامية بزيادة نسبة الـ (Calcind) وإعطاء توصيلية أكبر.



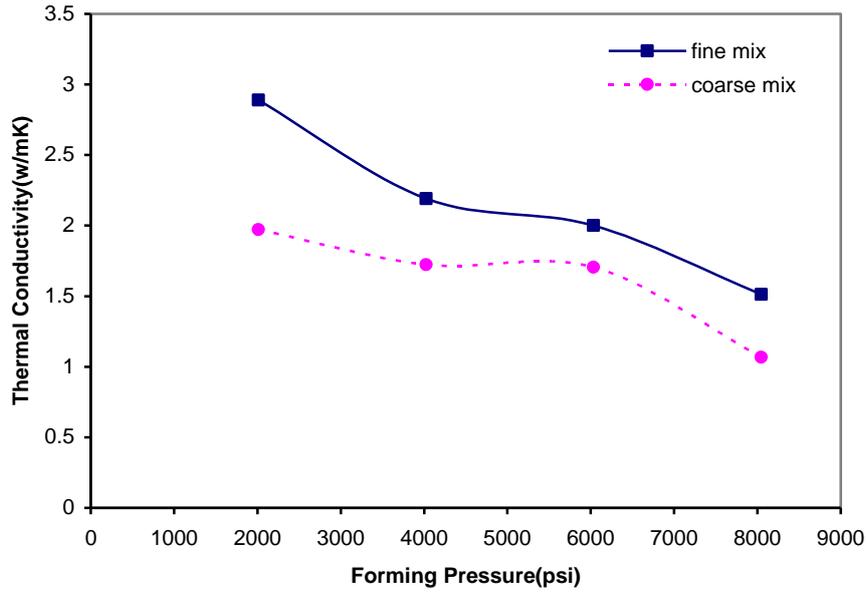
شكل (١٠-٥) يمثل تأثير نسب الخلط في التوصيلية الحرارية للخلطات بثبوت ضغط التشكيل عند القيمة ٢٠١١ psi

أن التوصيلية الحرارية تقل بزيادة مقدار التحميل المستعمل للكبس للخلطات من الخلطة M_1 إلى الخلطة M_2 وعند درجة حرارة التلييد الواحدة وهذا موضح في الأشكال من (١١-٥) إلى (١٦-٥) إذ تؤدي زيادة الحمل المسلط إلى تقليل المسافات البينية للجسيمات وبالتالي تقليل المسامية، وباتجاه زيادة الحمل المسلط فإنه يعمل على تقليل المسامات المفتوحة بعد التلييد، فضلاً عن ذلك فإن عملية التلييد ومقدار التحميل تعمل على تقليل المسافات البينية للحبيبات بمعنى اقتراب الذرات فيما بينها التي تعد المسؤولة عن انتقال الطاقة الحرارية أثناء عملية الاهتزازات الشبكية لها، التي ينتج منها تقليل المسار الحر للفونون وبالتالي زيادة عملية الاستطارة للفونونات وعدم إعطاء توصيلية حرارية^[٦٦].

وقد بين الجعفري^[٦٦] أن النماذج السيراميكية المحضرة من ٥٠٪ كاؤولين و ٣٠٪ أسود الكربون و ٨٪ كاربون الكالسيوم و ١٢٪ من الجير تتغير بها التوصيلية الحرارية كالاتي: عند درجة حرارة تلييد ١٢٥٠°C كانت التوصيلية الحرارية تساوي

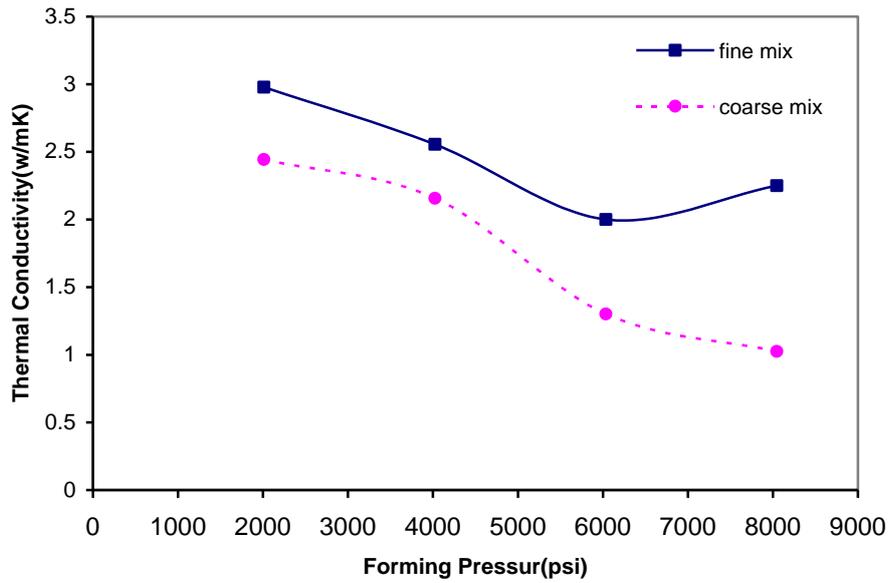
$$0.0095 \frac{W}{mK} \text{ ثم أصبحت } 0.015 \frac{W}{mK} \text{ عند درجة حرارة تلييد } 1300^\circ C \text{ وهبطت بعد ذلك عند الـ } 1350^\circ C \text{ إلى}$$

$$0.0108 \frac{W}{mK} \text{ وهذا يدل على أن النضج الحراري لهذه الأجسام العازلة حرارياً كان عند الـ } 1350^\circ C.$$

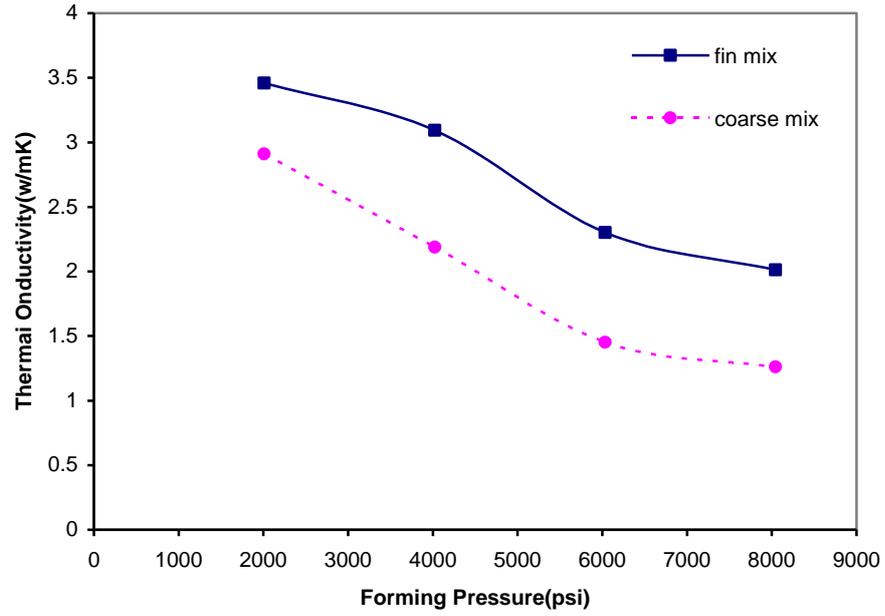


شكل

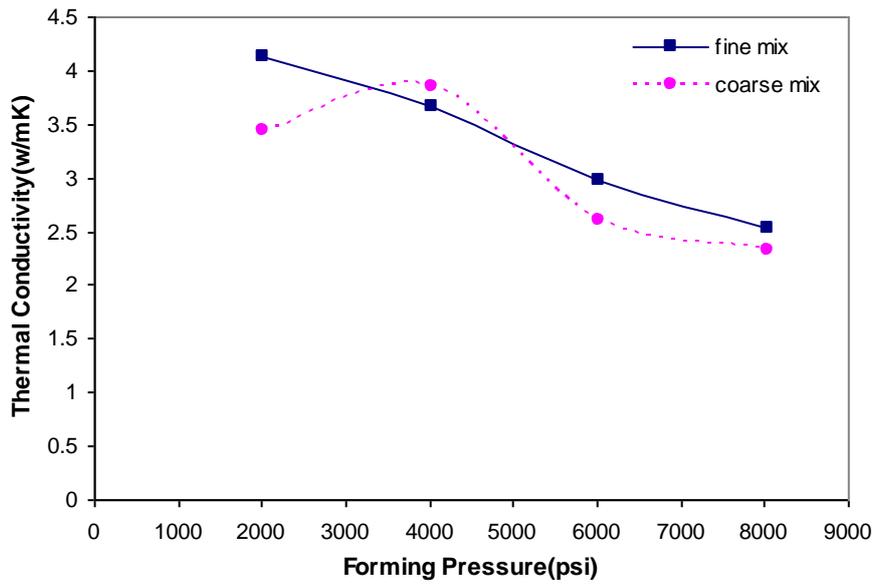
(١١-٥) يوضح تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_١ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr



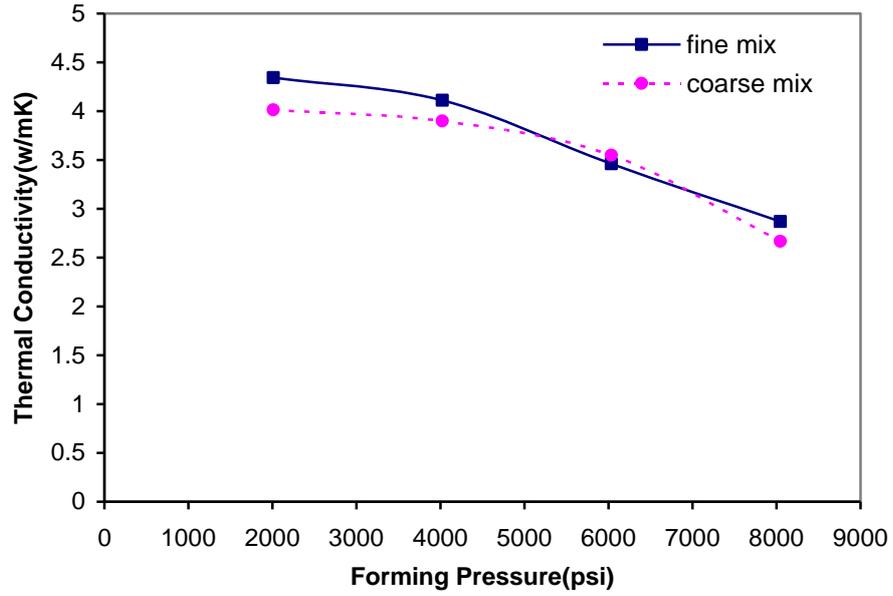
شكل (١٢-٥) يوضح تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_٢ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr



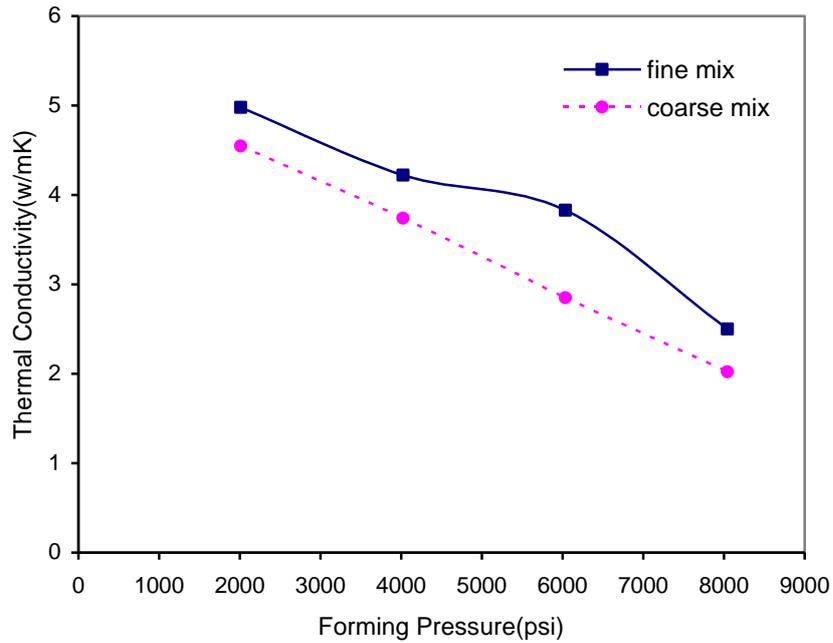
شكل (١٣-٥) يوضح تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_٢ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr



شكل (١٤-٥) يوضح تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_٢ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr



شكل (١٥-٥) يوضح تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_٦ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr



شكل (١٦-٥) يوضح تغير قيم التوصيل الحراري مع ضغط التشكيل للخلطة M_٦ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr

ونلاحظ أيضاً أن لجميع الظروف فقد أبدت الخلطات الناعمة توصيلية حرارية أعلى من الخلطات الخشنة وذلك لأن المسامات في النماذج ذات الجسيمات الخشنة من النوع المغلق وهذا يؤدي إلى أن التوصيلية الحرارية للمواد ذات المسامات المغلقة تكون أقل من التوصيلية الحرارية للمواد ذات المسامات المفتوحة لأنها تعد ناقلاً للغازات الساخنة بين جهتي النموذج وهذا يؤدي إلى زيادة التوصيلية في درجات الحرارة العالية، أما المسامات المغلقة فتعد حاجزاً جيداً لانتقال الحرارة^[١٦]، كما ان وجود الدقائق الكبيرة والصغيرة التي تملأ الفراغات سوف يعطي جسماً مكبوساً ذا مسامية قليلة^[١٧].

٣-٥ مقاومة الانضغاط

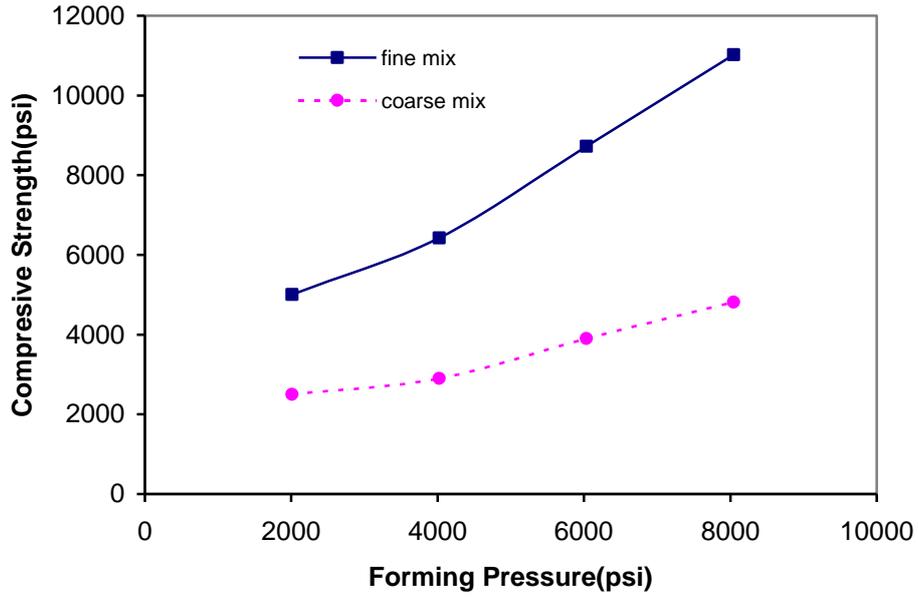
Compressive Strength

تم حساب مقاومة الانضغاط لجميع النماذج المحضرة فوجد أن قيم مقاومة الانضغاط تتراوح ما بين (٢٠٠٠ و ١١٠٠٠ psi) لكل النماذج. وتوضح الأشكال من (٥-١٧) إلى (٥-٢٢) تأثير تغير ضغط التشكيل على قيم مقاومة الانضغاط للخلطات من M٦ - M١ على التوالي إذ نلاحظ أن قيم مقاومة الانضغاط للخلطات الناعمة تكون دائماً أكبر بما يقارب الضعف من قيم مقاومة الانضغاط للخلطات الخشنة على الرغم من أن المسامات في النماذج ذات الحجم الحبيبي الأصغر كانت أكثر منها في النماذج ذات الحجم الحبيبي الأكبر إذ أن المسامات تمثل مناطق ضعف في النموذج. يعزى ذلك إلى أن تأثير معدل قطر الحبيبات كان أكبر من تأثير نسبة المسامات، إذ أن الحبيبات الصغيرة المتواجدة ضمن الطور الزجاجي، تقلل مسار الكسر لوحدة الحجم بفعالية أكبر من الحبيبات ذات معدل قطر حبيبي كبير.

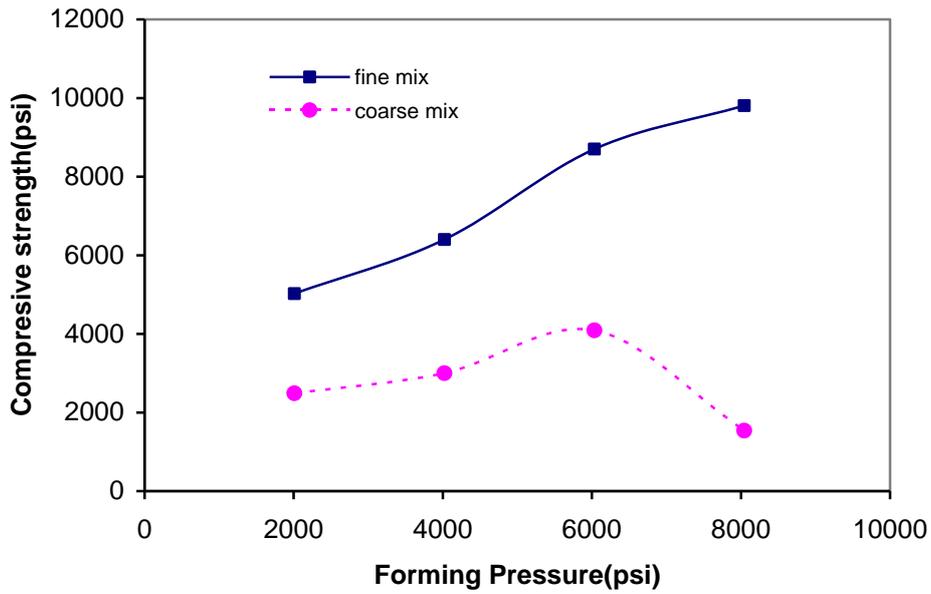
وقد وجد (الربيعي) ^[٣٥] أنه بتغير الحجم الحبيبي للنماذج السيراميكية المحضرة من المواد الأولية (الكاربون ورمل الزجاج وفلدسبار البوتوساييوم) والمليدة بدرجة ١٢٥٠°C تتغير كذلك مقاومة الانضغاط، فعند الحجم الحبيبي لمادة فلدسبار البوتاسيوم (٦.٤٨٣µm) و (٤.٩١٧µm) لمادة رمل الزجاج و (٧.٠٤٦µm) لمادة الكاؤولين كانت مقاومة الانضغاط تساوي (٦٥٢.٥ psi) وأصبحت (٩٥٨.٤ psi) عند الحجم الحبيبي (١.٤٣٧µm) للفلدسبار و (٤.٩١٧ µm) لرمل الزجاج و (٧.٠٤٦µm) للكاؤولين.

كما نلاحظ أيضاً أن قيم مقاومة الانضغاط تزداد ولجميع الخلطات بزيادة ضغط التشكيل من (٢٠١١ - ٨٠٤٥) psi. كما ازدادت قيم مقاومة الانضغاط لدى الباحثة (عبد العباس) ^[٦٨] للجسم السيراميكي المتكون من الكاؤولين ورمل زجاج أرضية والفلدسبار والمحضرة عند درجة حرارة التلييد ١٤٠٠°C من (١٧٦٧ psi) إلى (٢٥٨٩ psi) بزيادة ضغط التشكيل من (٣٦٢٥ psi) إلى (١٠٨٧٥ psi). ويعزى هذا السلوك في مقاومة الانضغاط إلى مقدار المسامية في الجسم السيراميكي إذ أن زيادة المسام يضعف من مقاومة الجسم السيراميكي لأن المسامية تنشأ من تكون تكتلات منفصلة في الجسم السيراميكي، وأن هذه المسامات والتكتلات ستضعف القوى الرابطة للحبيبات عند السطوح كالقوى الكهروستاتيكية وقوى فاندرفالز، وهذا يؤدي إلى تناقص مقاومة الجسم السيراميكي، كما أن زيادة ضغط التشكيل قبل التلييد يؤدي إلى تقليل التشققات الحاصلة في الجسم السيراميكي أثناء عملية الحرق.

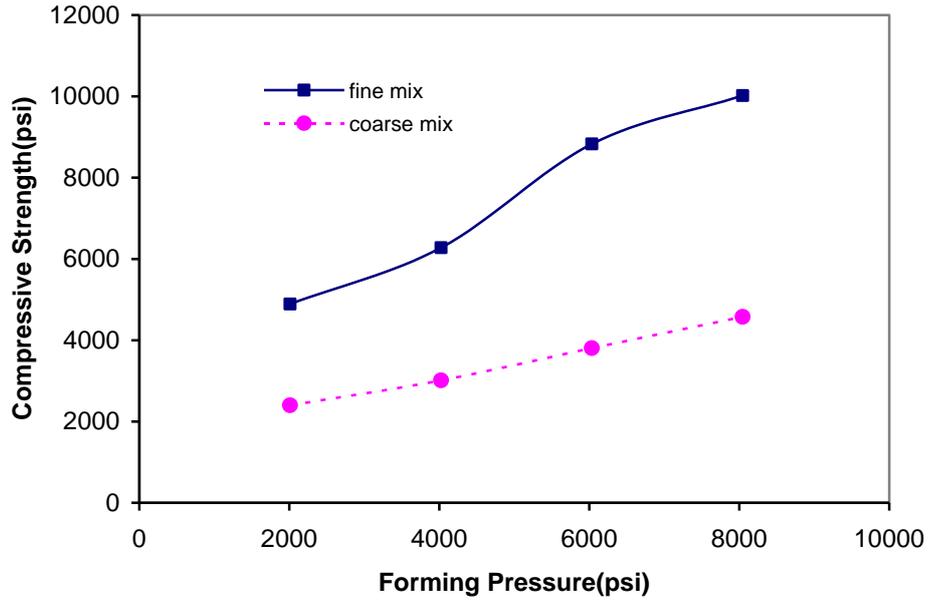
كما نلاحظ أيضاً ولجميع النماذج أن الزيادة الحاصلة في قيم مقاومة الانضغاط للخلطات الناعمة بزيادة ضغط التشكيل كانت أكبر من الزيادة في مقاومة الانضغاط للخلطات الخشنة فقد وجد (Bakker) و (Cnyder) ^[١٨] أن مقاومة الانضغاط تساوي (٦٠٠٠ psi) و (٢٥٠٠ psi) للخلطات الناعمة والخشنة على التوالي عند ضغط تشكيل (٢٠٠٠ psi) ولكن أصبحت مقاومة الانضغاط عند ضغط تشكيل (٦٠٠٠ psi) (٣٠٠ psi) تقريباً للخلطة الخشنة و (١٢٠٠٠ psi) للخلطة الناعمة وسبب ذلك هو حصول بعض التكررات في الجسيمات الكبيرة الموجودة ضمن الخلطة الخشنة بزيادة ضغط التشكيل، هذه التكررات ستضعف من مقاومة الجسم نتيجة إخلالها بتجانسية الخلطة فضلاً عن نقصان التماسك الحاصل في جسم النموذج.



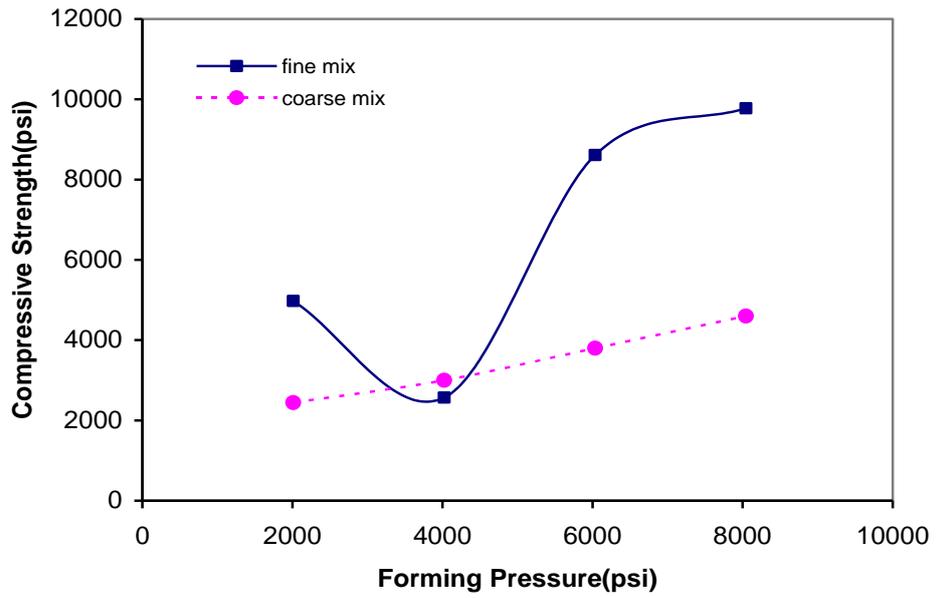
شكل (١٧-٥) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_1 بمعدل حرق $1400^\circ\text{C}/4\text{hr}$



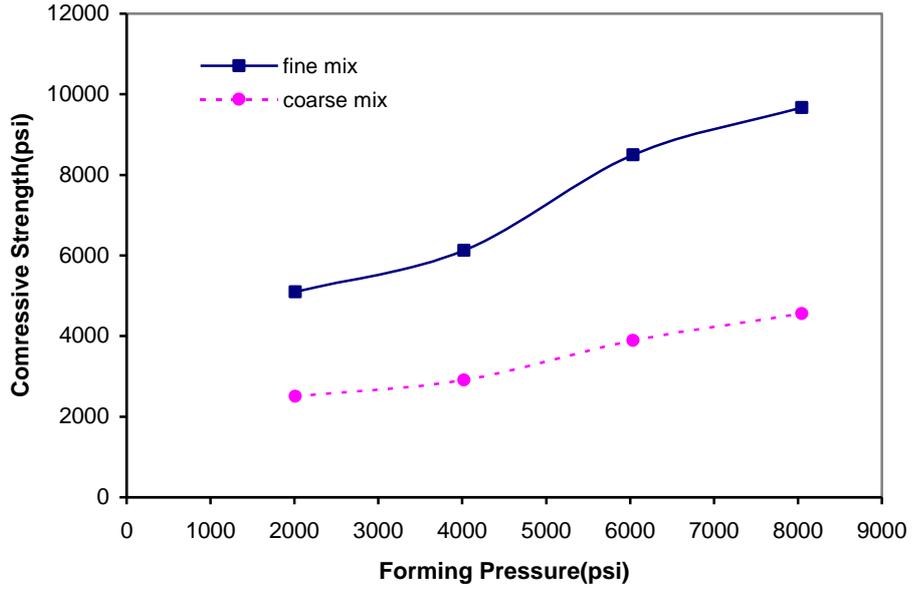
شكل (١٨-٥) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_2 بمعدل حرق $1400^\circ\text{C}/4\text{hr}$



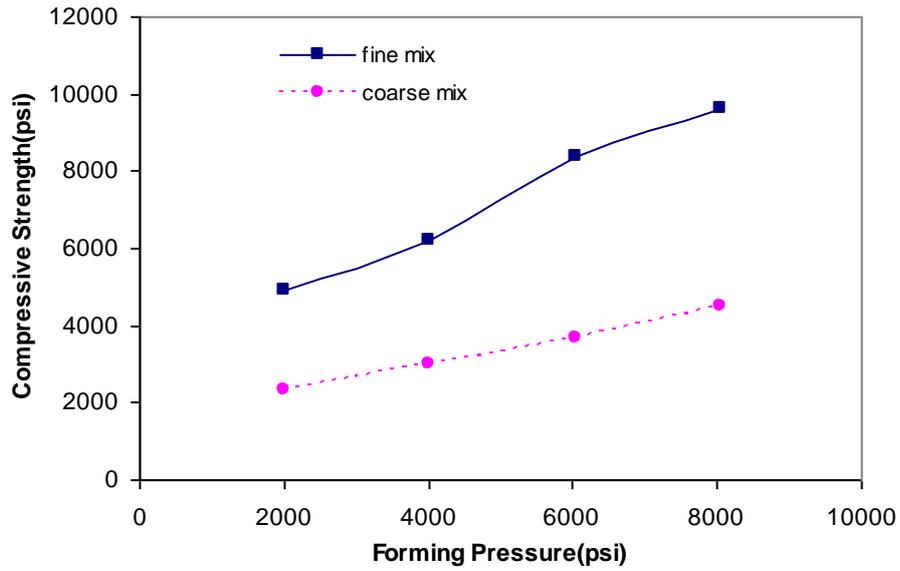
شكل (١٩-٥) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M₇ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/٤hr



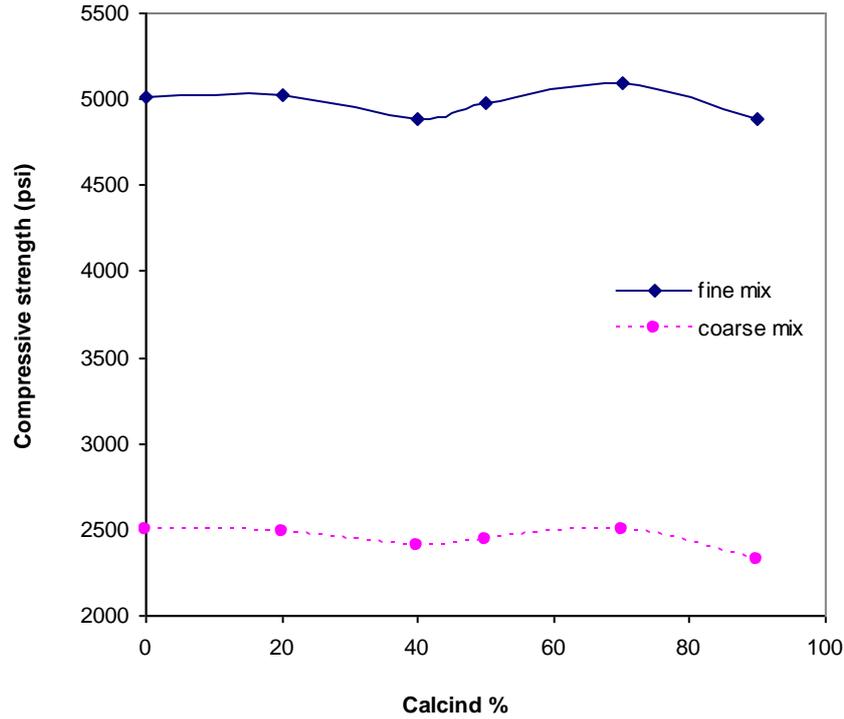
شكل (٢٠-٥) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_٤ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/٤hr



شكل (٢١-٥) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_١ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr



شكل (٢٢-٥) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط مع ضغط التشكيل للخلطة M_١ بمعدل حرق ١٤٠٠°C/hr
 أما تأثير نسب المكونات في مقاومة الانضغاط فيوضحها الشكل (٢٣-٥) وذلك عند ضغط تشكيل (٢٠١١ psi).



شكل (٥-٢٣) تأثير تغير نسب المكونات في مقاومة الانضغاط عند ضغط تشكيل (٢٠١١ psi)

Effect of Additives

٤-٥ تأثير الإضافات

إن مقارنة مواصفات النماذج التي تم تحسينها بإضافة مقدار ١% من مسحوق (LiF) مع ما يقابلها من نماذج خالية منه موضحة في الجدول (٥-٧) إذ نلاحظ بان المسامية انخفضت في النماذج المحسنة مع بقاء النفاذية دون تغيير كبير، أما التوصيل الحراري فقد تغير نزولا وقد تضاعفت قيم مقاومة الانضغاط للخلطات المحسنة بإضافة مسحوق (LiF)، وهذا مطابق لما حصل عليه Snyder و Bakker^[١٨] إذ يعزى ذلك إلى أن إضافة مقدار ١% (LiF) إلى خليط الالومينا-سيليكات أدى إلى تكون المولاييت الصلب (mullite) دون درجة الحرارة البيوتكتيكية للخليط.

جدول (٥-٧) يبين تأثير إضافة ١% LiF على الحراريات النفاذة

	M _{1a}		M _{1b}		M _{٦a}		M _{٦b}	
	٠%	١%	٠%	١%	٠%	١%	٠%	١%
LiF addition,%	٠%	١%	٠%	١%	٠%	١%	٠%	١%
Porosity %	٢٧.٤	٢٢.٣٢	٢٥.٩	٢٣.١٥	٣٥.٨	٢٩.٨٢	٣٥	٢٧.١
Permeability, centedarcy	٤١.٥٥٣	٤٠.٩٨٤	٤٤.٢٣٦	٤٤.١٣	٨٤.٤٤	٨٥.٥٦	٩٢.٤٥	٩٠.٢١
Thermal conductivity(W/mK)	٢.٨٨٩	٢.٢٦١	١.٩٧٢	١.٩٦٧	٤.٩٧	٣.٩٨٥	٤.٥٤٧	٤.٠٢٣
Compressive strength(psi)	٥٠٠٩	٩٦٢٢	٢٥٠٠	٦٠١٠	٤٨٩١	٩٢١٩	٢٣٢٢	٣٩٨٠

References

المصادر

١. Carman, P.C. (١٩٤٩). "Chemical Constitution and Properties of Engineering Materials". London, Edward Arnold & Co.
٢. Hemrick, J.G. and Hayden, H.W. (٢٠٠٥). "Refractories for Industrial Processing: Opportunities for Important Energy Efficiency". DOE-EERE Industrial Technologies Program.
٣. Pittsburgh, P.A. (١٩٨٧). "Refractories, The Refractory Institute". www.morgan advanced ceramics.com .
٤. Shaw, K. (١٩٧٢). "Refractories and Their Uses". London. Applied Science Publishers LTD.
٥. Ryan, W. (١٩٧٨). "Properties of Ceramic Raw Materials"; ٢nd ed., by Pergamon Press.
٦. Dumbaugh, W.H. and Malmendier, J.W. (١٩٧١). "High Temperature Oxides , part IV Refractory Glasses", Academic Press, New York and London.
٧. Chesters, J.H. (١٩٧٣). "Refractories Production and Properties". ٥th ed., House Press, London.
٨. Crowely, M.S. (١٩٧٨). "Refractories Concrete"; American Concrete Institute, Michigan.
٩. Norton, F.A. (١٩٦٨). "Refractories". ٤th ed., Princeton, New Jersey.
١٠. Singh, I.P. and Chander, S. (٢٠٠٤). "Materials Science and Processes", ٣rd ed., Jain Brothers (New Delhi).
١١. Arburg, M. (١٩٩٥). *Interceram* Vol. ٤٤, No. ٢, p: ٨٦.
١٢. Sinha, U.K. (١٩٨٧). "Refractory Porous Plug", *United States Patent* ٤, ٥٣٨, ٧٩٥, April.
١٣. Taylor, J.R. and Bull, A.C. (١٩٨٦). "Ceramics Glaz Technology", ١st ed., by Pergamon Press.
١٤. Rassen, F.A. (١٩٩٨). "The Use of Iraqi Siliceous Rocks as Electrical Insulators in Industry", Ph. D. Thesis; Al-Nahrain University.
١٥. Norton, F.H. (١٩٧٤). "Elements of Ceramics". ٢nd ed., Adson-Wesley Publishing Company Inc. U.S.A.
١٦. Kingery, W.D. (١٩٧٦). "Introduction to Ceramic". ٢nd ed., Wiley, Interscience Publication.
١٧. Hausner, H. (١٩٧٩). "Discussion on The Definition of the Term Sintering, Sintering New Developments"; *Elsevier Scientific Publishing Company*, Amsterdam.

18. Bakker, W.T. and Snyder, G.E.D. (1970). "Permeable Alumina Refractories", *J. Ceramic Bulletin*. Vol. 49, No. 7.
19. Wang, L.; Lee, H. and Hayes, D. (1996). "A New Approach to Molten Steel Refining Using Fine Gas bubbles", *ISIJ International*, Vol. 36, No. 1, pp: 17-24.
20. Filzwieser, M.A. and Wallner, S. (2003). Part 1 "MET-KIN-A Gas Purging System for Metallurgical Smelting Furnaces", *Proceeding of EMC*. Part 2 "The COP KIN system part II: Performance and benifity", *A worldwide over view EMC*.
21. Bakhiyarov, S.I. and Overfelt, A. (2003). "Numerical Simulation and Experimental Study of Suspension Flow with Deposition in Porous Media: Application to Sand Core Coating in Metal Casting Industry", *Proceesdings of IMECE'03, 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress*, 43499.
22. Zoback, M.D. and Byerlee, J.D. (1970). "Permeability and Effective Stress", *The American Association of Petroleum Geologists, U.S., department of Geophysics*, pp: 104-108.
23. Pulkrabek, W.W. (1987). "The Effect of Temperature on The Permeability of A Porous Media", *Int. J. Heat Mass. Transfer*, Vol. 30, No. 6, pp: 1103-1109.
24. Lukasiewicz, S.J. and Reed, J.S. (1988). "Specific Permeability of Porous Compacts as Described by a Capillary Model". *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol 71, No. 11, pp: 14-1008.
25. Bao, Y.; Liu, J. and Xu, B. (2003). "Behaviors of Fine Bubbles in The Shroud Nozzle of Ladle and Tundish", *J. Un. Scin. and Tech. Bei.*, Vol. 10, No. 4, p: 20.
26. Alexiadis, A.; Garadin, P. and Domgin, J.F. (2004). "Spot Turbulence, Breakup, and Coalescence of Bubbles Released From A porous Plug Injector Into A gas-Stirred Ladle", *Metallurgical and materials transactions B*, Vol. 35 B, p: 949.
27. Bear, J. (1972). "Dynamics of Fluids in Porous Media" American Elsevier Publishing Company, Inc.
28. Scheidegger, A.E. (1974). "The Physics of Flow Through Porous Media" University of Toronto Press.
29. Dullien, F.A.L. (1979). "Porous Media Fluid Transport and Pore Structure". Academic Press, New York.
30. Scheidegger, A.E. (1960). "The Physics of Flow Through Porous Media", 2nd ed., University of Toronto Press, Toronto; (cited by 27).

٣١. Prake, L.C. and Ritter, H.L. (١٩٤٥). "Pore Size Distribution in Porous Materials", *Ind. Eng. Chem. Ancl.*, Vol. ١٧, pp: ٧٨٢-٧٨٧; (cited by ٢٧).
٣٢. Clark, F.M. (١٩٦٢). "Insulating Materials for Design and Engineering Practice". By John Wiley and Sons, Inc.
٣٣. Kay, J.M. (١٩٦٣). "An Introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer". ٢nd ed., Cambridge at The University Press.
٣٤. Grimshaw, R.W. (١٩٧١). "The Chemistry and Physics of Clays and Allied Ceramic Materials". ٤th ed., Ernest Benn Limited, London.
٣٥. رسن، فاضل عبد؛ جبرائيل، مؤيد؛ سلمان، محمد قاسم؛ (٢٠٠٦). "تأثير الحجم الحبيبي لمادة فلدسبار البوتاسيوم على الخواص الفيزيائية للبورسلين عالي الصهر، مجلة ابن الهيثم للعلوم الصرفة والتطبيقية، قيد النشر، قبول.
٣٦. Meyer, K. (١٩٩٥). "Porosity of Ceramic Compacts. Gas Adsorption and Mercury Porosimetry", *Cfi/Ber DKG*, Vol. ٧٢, No. ٣, pp: ١٠٨-١٤٤.
٣٧. Boucher, E.A. (١٩٧٦). "Porous Materials: Structure, Properties and Capillary Phenomena"; *J. Mate. Sci.* pp: ١٧٤٣-١٧٥٠.
٣٨. Budnikov, P.P. (١٩٦٤). "The Technology of Ceramics and Refractories" by the MIT Press.
٣٩. Judd, W. (١٩٨١). "Density Physical Properties of Rocks and Minerals"; McGraw. Hill Book Company New York.
٤٠. Kaviany, M. and Mittal, M. (١٩٨٧). "Natural Convection Heat Transfer From Avertical Plate to High Permeability Porous Media: an Experiment and an Approximat Solution". *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. ٣٠, No. ٥, pp: ٩٦٧-٩٧٧.
٤١. Namboodiri, B.C.S. (١٩٨٤). "Influence of Variable Permeability on Combined Free and Forced Convection about Inclined Surfaces in Porous Media".
٤٢. Yagi, S. and Kunii, D. (١٩٥٧). "Studies on Effective Thermal Conductivities in Pocked Beds", *Am. Ist. Chem. Eng. J.*, Vol. ٣, pp: ٣٧٣-٣٨١; (cited by ٤٣).
٤٣. Zumbrennen, D.A.; Viskanta, R. and Incropera, F.D. (١٩٨٦). "Heat Transfer Through Porous Solids with Complex Internal Geometries", *Int. J. Heat Mass transfer*, Vol. ٢٩, pp: ٢٧٥-٢٨٤.
٤٤. Luikov, A.V. and Shashkov, A.G. (١٩٦٨). "Thermal Conductivity of Prous Systems", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. ١١, pp: ١١٧-١٤٠.
٤٥. Loeb, A.L. (١٩٥٤). "Thermal Conductivity, VIII. A Theory of Thermal Conductivity of Porous Materials". *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. ٣٧, pp: ٩٦-٩٩; (cited by ٤٣).

- εϚ. Isachenko, V.P.; Osipova, V.A. and Sukomel, A.S. (1977). "Heat Transfer" Translated From the Russian S. Semyonov. MIR Publishing Moscow.
- εϛ. Terzaghi, K. (1901). "Theoretical Soil Mechanics", Chapman and Hall, London, (cited by 28).
- εϜ. Gersevanov, N.M. (1933). "Osnovy Dinamiki GrunLovı Massy, Moscow" Gosstroizdat, Moscow (cited by 28).
- εϝ. Streeter, L. (1948). "Fluid Dynamics" 1st edition. McGraw-Hill, New York.
- οο. Correia, L.A. (2004). "Porous Ceramic Membranes for Reducing Thre Droplet Size of Emulsions by Macro Static Dispersion". Paper to be Presented at the Eight International Conference on Inorganic Membranes, Cincinnati. Ohio, USA, ICIMΛ.
- οο. Hubbert, M.K. (1940). "The Theory of Ground Water Motion", J. Geol, Vol. 48, pp: 780-994; (cited by 27).
- οο. Andrade, J.R. and Costa, U.M.S. (1999). "Internal Effects on Fluid Flow Through Disordered Porous Media" *The American Physical Society*; Vol. 82, No. 26.
- οο. Pan, C.; Hilpert, M. and Miller, C.T. (2004). "Lattice-Boltzman Simulation of Two-Phase Flow in Porons Media", *Water Resources Research*, Vol. 40, W01001, doi: 10.1029/2003WR002120.
- οο. Jones, K.R. (1962). "On The Differential Form of Darcy's Law", *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, No. 2, pp: 731-732; cited by (27).
- οο. Collins, R.E. (1961). "Flow of Fluids Through Porous Materials". Reinhold, New York; (Cited by 27).
- οο. Ward, J.C. (1964). "Turbulent Flow in Porous Media", *Proc. Amer. Soc. Civileny*, Vol. 90, No. Hy^o, pp: 1-12.
- οο. Brace, W.F. (1977). "Permeability From Resistively and Shape"; *J. of Geophysical Research* Vol. 82, No. 23, P: 3343.
- οο. Irmay, S. (1968). "Theoretical Models of Flow Through Porous Media", *R.I.L.E.M. Symp. Transfer of Water in Porous Media, Paris (1964d)*; *Bull. R.I.L.M. Vol. 29, pp: 37-43*; (cited by 27).
- οο. Vasiliev, L.L.; Lapshin, Y.A. and Piskunov, A.N. (1970). "Experimental Study of Gas Flow Out of A Porous Plate in to Vacuum". *J. heat transfer*, Vol. 18, pp: 813-817.

٦٠. Forchheime, P. (١٩٠١). "Wasserbewegung durch Boden, Z. Ver. Deutsch. Ing, Vol. ٣٤٥, pp: ١٧٨٢-١٧٨٨.; (cited by ٢٧).
٦١. Kozeny, J. (١٩٢٧). "Uber Kapillare Leitung Des Wassers Im Boden". *Sitzungsber. Acad. Wiss. Wien*. Vol. ١٣٦, pp: ٢٧١-٣٠٦, (Cited by ٢٧).
٦٢. Carman, P.C. (١٩٣٨). *J. Soc. Chem. Ind.* Vol. ٥٧, P: ٢٢٥; (Cited by ٢٨).
٦٣. الجعيفري، فارس محمد علي (٢٠٠٥) "تحضير عازل حراري سيراميكي من مخلفات محطات توليد الطاقة الكهربائية ودراسة بعض خواصه الفيزيائية والكيميائية" رسالة ماجستير، كلية العلوم، جامعة بابل.
٦٤. الزبيدي، عقيل مجبل حمد، (٢٠٠١). "تحسين خواص البتوناييت العراقي واستخدامه في ركائز الحفر". بحث مقدم إلى قسم هندسة البناء والانشاءات كجزء من متطلبات نيل درجة الدبلوم العالي في هندسة تكنولوجيا الركائز.
٦٥. شكيب، رشا (٢٠٠٦). "دراسة استخدام البتوناييت العراقي في عمليات قصر الزيوت النباتية"، رسالة ماجستير، جامعة النهرين، كلية العلوم.
٦٦. عبد علي، خالد جاسم (٢٠٠١). "الخواص الهندسية للبنتوناييت العراقي". مشروع مقدم إلى هندسة البناء والانشاءات – فرع الطرق والجسور كجزء من متطلبات نيل شهادة الدبلوم العالي في هندسة تكنولوجيا الركائز.
٦٧. رسن، فاضل عبد. (٢٠٠٦). قياس نصف القطر الهيدروليكي لجسم بولمري مسامي باستخدام قيم النفاذية النوعية والمسامية. قيد النشر
٦٨. عبد العباس، شروق صباح (٢٠٠٢) "دراسة الخواص الفيزيائية للعازل الكهربائي السيراميكي ذي الجهد العالي، رسالة ماجستير، جامعة بابل.
٦٩. Grimschl, E. (١٩٤٤). "A Text Book of Physics". Vol. (١١), Heat and Sound, ٢nd edition, Edward Arnold & Co.
٧٠. Vardar, O. and Finnif, I. (١٩٧٥). *Inter National Journal Fracture*, Vol. ١١, No. ٣, p: ٤٩٥.
٧١. جبر، شوكت اسماعيل؛ رسن، فاضل عبد؛ العزاوي، رعد. (٢٠٠١). "التوصيلية الحرارية للمواد السليكية المحققة لمواصفة العازلية الكهربائية". مجلة علوم المستنصرية، المجلد ١٢، العدد ٦، ص ٤٧٤-٤٤٣.
٧٢. Nakahara, M.; Kondo, Y. and Hamano, K. (١٩٩٨). *J. Ceram. Soc. Japan* Vol. ١٠٦, No. ٧٨٧, p: ٥١١.
٧٣. حسين، هاني محمود (٢٠٠٣). "دراسة تأثير ظروف التشكيل في الخواص الفيزيائية للعازل الكهربائي السيراميكي"، رسالة ماجستير، كلية العلوم، جامعة بابل.
٧٤. الجنابي، قاصد عبد الستار (١٩٩٧). "دراسة العوامل المؤثرة في عملية التلييد لمواد سيراميكية تقليدية ومتقدمة"، أطروحة دكتوراه، جامعة بغداد.

Conclusions

الاستنتاجات

١. تم تحضير اجسام سيراميكية نفاذة ذات خصائص ميكانيكية وحرارية تتوافق مع اغراض تطبيقها
٢. للحصول على حراريات نفاذة ذات مواصفة جيدة تستخدم مواد اولية ذات تدرج واسع في الحجم الحبيبي ويفضل ان لا تحتوي الخلطات على حجوم حبيبية كبيره, حيث كانت الخلطات الناعمة افضل من الخلطات الخشنة بجميع الاحوال.
٣. ان الزيادة في ضغط التشكيل للعينات تؤدي الى خفض كل من النفاذية والمسامية والتوصيل الحراري وزيادة مقاومة الانضغاط, اما نصف القطر الهيدروليكي فيكون تغيره عشوائياً بتغير ضغط التشكيل.
٤. ان زيادة نسبة الـ (calcind) ونقصان نسبة الـ (Corundum) في النماذج بثبوت ضغط التشكيل أدى إلى زيادة كل من النفاذية والمسامية والتوصيل الحراري.
٥. ان اضافة نسبة قليلة (١%) او اقل من ملح فلوريد الليثيوم LiF الى الحراريات النفاذة يؤدي الى زيادة مقاومة الانضغاط للعينات بشكل مؤثر بينما لا يؤثر كثيراً في الخصائص الاخرى لذلك يفضل اضافة فلوريد الليثيوم للحراريات النفاذة.
٦. امكانية استعمال مواد متوفرة في الاسواق المحلية لصناعة حراريات نفاذة.

المقترحات

Suggestions

١. دراسة تأثير تغير درجة حرارة التلييد في خواص الحرارية النفاذة بثبوت ضغط التشكيل.
٢. قياس التوزيع الحجمي المسامي عمليا بواسطة مقياس (Porosmetry) ومقارنة النتائج مع قيم نصف القطر الهيدروليكي المحسوبة.
٣. قياس نسبة التقلص الخطي الحاصل في الحرارية النفاذة المحضرة ، الذي يؤثر في طبيعة القناة المسامية من حيث التعرجية ونصف قطر القناة.
٤. حساب عدد رينولد Re ومعامل الاحتكاك f ورسم العلاقة بينهما لمعرفة الحد الفاصل بين الجريان المنتظم والجريان العشوائي باستخدام مدى واسع من ضغط الغاز.
٥. اخضاع النماذج المحضرة الى فحوصات اخرى، مثل الصلادة وتأثير المهاجمات الكيميائية والعزلية الكهربائية .

المقترحات

Suggestions

٦. دراسة تأثير تغير درجة حرارة التلييد في خواص الحرارية النفاذة بثبوت ضغط التشكيل.
٧. قياس التوزيع الحجمي المسامي عمليا بواسطة مقياس (Porosmetry) ومقارنة النتائج مع قيم نصف القطر الهيدروليكي المحسوبة.
٨. قياس نسبة التقلص الخطي الحاصل في الحرارية النفاذة المحضرة ، الذي يؤثر في طبيعة القناة المسامية من حيث التعرجية ونصف قطر القناة.
٩. حساب عدد رينولد Re ومعامل الاحتكاك f ورسم العلاقة بينهما لمعرفة الحد الفاصل بين الجريان المنتظم والجريان العشوائي باستخدام مدى واسع من ضغط الغاز.
١٠. اخضاع النماذج المحضرة الى فحوصات اخرى، مثل الصلادة وتأثير المهاجمات الكيميائية والعزلية الكهربائية .