



Study of Physical and Mechanical Properties for Kaolin Ceramic Reinforcing by Unsaturated Polyester

A Thesis

*Submitted to the Council of the College of Engineering /
University of Babylon in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Master Degree of Science in
Materials Engineering*

By

SURA KAMEL M.H. AL _ JANABI

(B.Sc.)

Supervised by

Asst. Prof

Dr. Fadhil M. Hassoun

Asst. Prof

Dr. Majid M. Shukur

(2007)



دراسة الخواص اليريب والميكانيكية

لمادة السيراميك الكاؤولينى المدعم

بالبولى استر غير المشبع

رسالة مقدمة من قبل

سرى كامل محمد حسين الجنابى

بكالوريوس هندسة مواد

الى

مجلس كلية الهندسة / جامعة بابل وهى جزء من
متطلبات نيل درجة الماجستير فى علوم هندسة المواد

إشراف

أ.م.د. ماجد محى شكر

أ.م.د. فاضل محمد حسون

1429

2008

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ
الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ﴾

بِسْمِ اللَّهِ
الْعَظِيمِ

سورة البقرة

(آية ٣٢)

قَالَ رَسُولُ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ

(مَنْ أَرَادَ الْبِرَّ فَلْيَعْلَمِ وَأَمَّنْ أَرَادَ الْإِحْرَاءَ فَلْيَعْلَمِ)

بِالْعِلْمِ وَأَمَّنْ أَرَادَ الْبِرَّ فَلْيَعْلَمِ وَالْإِحْرَاءَ فَلْيَعْلَمِ

صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ

الاعتراف

ربي من أوصي الله بها براد إيماننا

والذي العزيز

ربي من أوصيهم أربي

إخوتي الأعزاء

ربي من بجانبي ووما

زوجه

ربي من برجوعي الخير ووما

والأصدقاء والأحبة

ربي من لا يدخلوا بالعلم

والكلية والطب

أربي نورة جهدي حبا ووفاء"

سرى

شكر وتقدير

إذا جاز لي الشكر فأشكر الله العلي العظيم أول الأولين وآخر الآخريين الذي وفقني لما أنا عليه فالحمد لله رب العالمين أولاً وأخيراً وأفضل الصلاة وأتم التسليم على أشرف الخلق وسيد الأنبياء والمرسلين أبي القاسم محمد وعلى آله الطيبين الطاهرين .

أما بعد فيسعدني ان اكتب شيئاً مما حفظت في نفسي من جزيل الشكر والامتنان لأساتذتي الفاضلين الدكتور فاضل محمد حسون والدكتور ماجد محي شكر لعظيم نفسيهما وكرم علمهما معي ولما قدماه لي من اهتمام وجهد ثمين ومرعاية علمية قيمة طيلة فترة البحث .

كما أتوجه بشكري الى قسم هندسة المواد في كلية الهندسة / جامعة بابل على منحي هذه الفرصة ولا يفوتني ان اشكر منتسبي مختبر السيراميك ومختبر المقاومة في قسم المواد والورشة الزجاجية في كلية العلوم لما قدموه من تسهيلات في انجاز هذا البحث . كما اشكر كل من دعمني وساهم في إظهار هذه الدراسة من المنتسبين من المهندسين والفنيين فضلاً عن الأهل والأصدقاء وكل من دعاني بإتمام البحث ونجاحه ومن الله التوفيق .

سرى

المحتويات

الصفحة	الموضوع	التسلسل
الفصل الاول (المقدمة)		
1	المقدمة	1-1
2	السيراميك المسامي	2-1
3	تصنيع السيراميك المسامي	3-1
4	طريقة الانتفاخ الكيميائي	1-3-1
4	اضافة مادة عضوية	2-3-1
5	اضافة مادة متطايرة	3-3-1
5	استخدام خلية البوليمر الاسفنجي المفتوحة	4-3-1
5	الدراسات والبحوث السابقة	4-1
9	الهدف من البحث	5-1
الفصل الثاني (الجزء النظري)		
11	المقدمة	1-2
12	معيار عملية الترشيح	2-2
12	المسامية	3-2
13	تقنيات الترشيح	4-2
13	الترشيح بالخاصية الشعرية	1-4-2
14	الترشيح بالغمر الكلي	2-4-2
14	الترشيح بالتماس	3-4-2
15	الترشيح بالتفريغ الهوائي	4-4-2
15	العوامل المؤثرة على عملية الترشيح	5-2
15	القوة الدافعة الديناميكية الحرارية	1-5-2
18	القوة الدافعة الحركية	2-5-2
20	التبلل	3-5-2
20	متانة السيراميك	6-2
22	العوامل المؤثرة على متانة السيراميك	7-2
22	تأثير المسامية	1
23	تأثير اجهادات الضغط المتبقية	2
24	تأثير درجة الحرارة	3
25	تأثير الحجم الحبيبي	4
الفصل الثالث (الجزء العملي)		
26	المقدمة	1-3
26	المواد الاولية	2-3

26	المادة الاساس	1-2-3
28	المادة الراشحة	2-2-3
28	مرحلة تهيئة مادة الاضافة (نشارة الخشب)	3-3
29	تشكيل النماذج	4-3
29	القولبة اليدوية	1-4-3
30	القولبة بالكبس	2-4-3
31	القولب المستخدمة	3-4-3
33	التجفيف	5-3
33	الحرق	6-3
34	عملية الترشيح	7-3
35	مرحلة الفحوصات	8-3
35	الفحوصات الفيزيائية	1-8-3
35	التقلص الطولي	1-1-8-3
36	المسامية الظاهرية	2-1-8-3
36	الكثافة	3-1-8-3
37	الفحوصات الميكانيكية	2-8-3
37	مقاومة الانضغاط	1-2-8-3
39	مقاومة الانحناء	2-2-8-3
40	مقاومة الصدم	3-2-8-3
42	اختبار الفحص المجهرى	3-8-3
الفصل الرابع (النتائج والمناقشة)		
44	المقدمة	1-4
44	الخواص الفيزيائية	2-4
44	المسامية الظاهرية	1-2-4
48	الكثافة	2-2-4
52	التقلص الطولي	3-2-4
55	الخواص الميكانيكية	3-4
55	مقاومة الصدم	1-3-4
58	مقاومة الانضغاط	2-3-4
62	مقاومة الانحناء	3-3-4
65	اختبار الفحص المجهرى	4-4
الفصل الخامس (الاستنتاجات والتوصيات)		
70	الاستنتاجات	1-5
71	التوصيات	2-5
73	المصادر	
	ملحق النتائج	

الرموز و المختصرات

الوحدات	المعنى	الرمز
mm ²	مساحة مقطع النموذج	A
—	معيار الدونة	a
mm	طول الشق السطحي او نصف طول الشق الداخلي	a
mm ²	مساحة التغير السطحي عند الحد الفاصل بين الطور الصلب والطور الغازي	ΔA_{SV}
mm ²	مساحة التغير السطحي عند الحد الفاصل بين الطور السائل والطور الغازي	ΔA_{LV}
mm ²	مساحة التغير السطحي عند الحد الفاصل بين الطور الصلب والطور السائل	ΔA_{SL}
g	الوزن الجاف	D
mm	قطر النموذج قبل الحرق	D _b
mm	قطر النموذج بعد الحرق	D _f
mm	قطر القالب الخارجي	D _{outer}
mm	قطر القالب الداخلي	D _{inner}
mm	قطر النموذج	d
GPa	معامل مرونة المادة المسامية بوجود المسامات	E
GPa	معامل مرونة المادة المسامية بعدم وجود المسامات	E _o
kJ/mole	التغير في الطاقة الحرة للنظام	ΔF
m/sec ²	التعجيل الأرضي	g
mm	عمق الترشيح	h
mm	الارتفاع الأصلي للنموذج	H
mm	الارتفاع النهائي للنموذج بعد سقوط الثقل عليه	h
MNm ^{-3/2}	متانة الكسر	K _{IC}
L.mole ⁻¹ .sce ⁻¹	ثابت حركية الترشيح	K
mm	المسافة بين مساند قالب الانحناء	L
g	الوزن المشبع	M
g	معدل وزن الراشح	Δm
—	ثابت	n
Pa	الضغط المسلط	P
mm	نصف قطر تقوس حافة الشق المستدقة	P _t
N	حمل الانضغاط المسلط حتى الكسر	P _c
N	حمل الانحناء المسلط حتى الكسر	P _f
μm	نصف قطر الأنبوب الشعري	r
g	الوزن المعلق	S
sec	الزمن	t
mm	سمك النموذج	t
mm	عرض النموذج	W
J	طاقة الكسر	W _i

—	معامل خالي من الوحدات	Y
%	الكسر الحجمي للمسامية	Φ
g/cm^3	كثافة الراشح	ρ
deg. , rad	زاوية التبلل	θ
kg/m.sec	لزوجة السائل	η
MPa	الإجهاد المسلط	σ_s, σ
MPa	اقصى إجهاد متولد حول حافة الشق	σ_M
MPa	مقاومة الانحناء	σ_{bs}
—	ثابت	σ_i
kJ/mole	الشد السطحي عند الحد الفاصل بين الطور الصلب والطور الغازي	γ_{SV}
kJ/mole	الشد السطحي عند الحد الفاصل بين الطور السائل والطور الغازي	γ_{LV}
kJ/mole	الشد السطحي عند الحد الفاصل بين الطور الصلب والطور السائل	γ_{SL}

الخلاصة

في الدراسة الحالية تم تصنيع أجسام سيراميكية مسامية من مادة الكاؤولين عن طريق اضافة نشارة الخشب وبنسب حجمية (15 ، 30 ، 45 %) وبحجوم حبيبية مختلفة (106, 250 , 425) مايكرون ، استخدمت طريقتان في تصنيع النماذج السيراميكية هما : طريقة الكبس شبه الجاف ، وطريقة القوالب اليدوية ، جففت النماذج السيراميكية بدرجة حرارة (110)°م ولمدة (24) ساعة ومن ثم أحرقت بدرجة حرارة (1000)°م و فترة مكوث ساعة واحدة ، بعدها تم اجراء عدد من الفحوصات الفيزيائية (المسامية، الكثافة، التقلص الطولي) والفحوصات الميكانيكية (الصدم، الانضغاط ، الانحناء) والفحص المجهرى . تم استخدام مادة البولي استر غير المشبع في تقوية النماذج السيراميكية عن طريق ترشيحه داخل البنية السيراميكية ، ولغرض إتمام عملية تغلغل البوليمر داخل مسامات الهيكل المسامي تم استخدام تقنية الترشيح او التغلغل بالغمر الكلي للعينات في محلول البوليمر بوجود نظام تفريغ هوائي ، ومن ثم تم اجراء عملية التقسية للمادة البوليمرية بدرجة حرارة (115)°م ولمدة (15) دقيقة وتترك لتبرد داخل الفرن ، بعدها تم اعادة الفحوصات المذكورة للعينات المرشحة لغرض دراسة تأثير البوليمر المتغلغل على كل من الخواص الفيزيائية والميكانيكية .

أظهرت نتائج اختبار المسامية ارتفاع مسامية النماذج بزيادة نسبة نشارة الخشب وزيادة الحجم الحبيبي لها إذ كانت أعلى مسامية عند حجم حبيبي (425µm) ونسبة إضافة (45%) ولكلا الطريقتين المستخدمتين في حين أن أقل مسامية كانت عند استخدام مادة الكاؤولين من دون إضافة ، بينما اعطت النماذج المشكلة يدويا مسامية أعلى من النماذج المكبوسة ، كما أظهرت النماذج المرشحة انخفاض في المسامية بشكل واضح .

اختبار الكثافة يبين انخفاض كثافة النماذج مع زيادة كل من نسبة نشارة الخشب والحجم الحبيبي لها ، وأعطت النماذج المشكلة يدويا كثافة اقل من النماذج المكبوسة كما نلاحظ ارتفاع الكثافة بعد اجراء عملية الترشيح .

اما اختبار التقلص الطولي فقد بين زيادة تقلص النماذج بزيادة كل من نسبة نشارة الخشب وحجمها الحبيبي وان تقلص العينات المشكلة يدويا كان اعلى من تقلص العينات المكبوسة كما لم يكن هناك تأثير لعملية الترشيح على التقلص الطولي للنماذج .

نتائج الاختبارات الميكانيكية أظهرت انخفاض المقاومة بشكل عام مع زيادة نسبة مادة نشارة الخشب وزيادة الحجم الحبيبي لها .

اما طريقة التصنيع فان النماذج المكبوسة كانت ذات مقاومة اعلى من النماذج المشكلة يدويا ، وبعد اجراء عملية الترشيح وجد ان هناك تأثير واضح للبوليمر الراشح على الخواص الميكانيكية حيث ارتفعت قيم المقاومة بعد الترشيح عما كانت عليه قبلها نتيجة

وجود البوليمر كطور متمين ضمن الجسم السيراميكي . ان ارتفاع قيم مقاومة الانحناء والصدم يؤكد بان المادة السيراميكية قد اكتسبت صفات تزيد من متانتها .
اظهر اختبار الفحص المجهرى وجود مسامية بشكل واضح قبل اجراء عملية الترشيح واختزالها الى اقل ما يمكن بعد عملية الترشيح نتيجة تغلغل البوليمر داخل المسامات حيث أكد الفحص المجهرى نتائج اختبار المسامية .

ABSTRACT

In the recent year , ceramic material which have super mechanical properties play an important role in the technology and industrial development . In the current study , Kaolin porous ceramic has been made by adding various volume percentages (15 , 30 , 45 %) and different particle size (106, 250 , 425 μm) of dustwood .

Semi-dry pressing and handmade casting methods have been used to make the porous ceramic material . All samples are oven dried for (24) hours at (110°C) to remove moisture , and firing procedure is achieved in an electrical furnace up to (1000°C) with soaking time of an hour . Physical (porosity , density , linear shrinkage) and mechanical (impact , compression , bending) tests were calculated as average of three measured values for individual test . The porous samples were totally immersed in unsaturated polyester polymer , and the infiltration process was achieved by air vacuum pump . The polymer was cured at (115°C) for (15) minutes .

Physical and mechanical inspections were applied upon the infiltrated samples to know the propagation effect of the polymer .

Porosity test for both handmade and pressed samples shows a proportional relationship between porosity of the samples and each of dustwood additives and their particle size , whereas the infiltrated samples show pronounced reduction in their porosity . On the other hand , density of previous cited samples shows a reverse relationship , while the infiltrated samples show progressive in their density . Also an increasing in percentage and particle size of dustwood additive will increase the linear shrinkage of both handmade and pressed samples . whereas , the infiltrated samples show un changeable in their dimensions .

Generally , mechanical tests (impact , compressive , bending) show a reduction strength of both porous and infiltrated samples with increasing the percentage and particle size of dustwood additives . Whereas , the infiltrated samples show an improvement in their strength in comparison with the porous samples .

Microscopic inspection shows clear difference between porous samples and the infiltrated one , where the polymer penetrate inside the pores and promote their strength .

الفصل الأول

المقدمة

Introduction

1-1 المقدمة (Introduction)

كان التاريخ البشري مرتبطا بصورة مباشرة بالمادة التي يستخدمها . هذا المفهوم لا يزال ساريا حتى الوقت الحاضر مع وجود علاقة وثيقة بين خواص المادة وبين الغرض والهدف المستخدم لأجله . غالبا ما تدعو الحاجة الى تطبيق معين وفي ظروف محددة الى استغلال خاصية مهمة في المادة . في أحيان أخرى تحت المعرفة بخواص المادة وسلوكها الى استخدامها في تطبيق محدد ، او تدفع الى استحداث تطبيق مناسب لهذه الخاصية . من المعروف ان المادة السيراميكية تمتاز بكثير من الخواص التي تميزها عن غيرها من المواد الأخرى كمقاومتها الحرارية العالية والعزل الكهربائي ومقاومة التآكسد وغيرها، إلا انها تفتقر وبشكل واضح الى المتانة وقابلية تحمل الصدمات وهذا ما يحدد استخدامها في الكثير من التطبيقات [1].

يمكن تعريف المواد السيراميكية على انها مركبات لا عضوية (Inorganic) ولا معدنية (Non – Metallic) تتم معالجتها بالحرارة، لها بنية بلورية معقدة تربطها أواصر أيونية أو تساهمية أو مشتركة بينهما [2,1] .

تقسم المواد السيراميكية في الوقت الحاضر الى أقسام عديدة بالاستناد الى متغيرات مختلفة، لكن أكثر ما هو متفق عليه هو تقسيم السيراميك الى [3] :

أولا : السيراميك التقليدي Traditional Ceramic .

ثانيا : السيراميك المتقدم Advanced Ceramic .

السيراميك التقليدي عادة يتضمن التقنيات القديمة في صناعة السيراميك ومنها الطابوق ، الخزف (Porcelain) ، الكونكريت ، والمنتجات البيضاء . اما السيراميك المتقدم او ما يطلق عليه أحيانا السيراميك الدقيق ، فيشمل المنتجات السيراميكية التي استخدمت في تصنيعها تقنيات حديثة تؤدي الى تحسين خاصية أو مجموعة من الخواص منها الحرارية أو الكهربائية أو المغناطيسية [4] .

تمتاز المواد السيراميكية بأنها هشة (Brittle) ، درجة انصهارها عالية مقارنة بالمعادن وسهولة الكسر بوجود تشوه (Deformation) قليل جدا، وهذا السلوك هو نقيض لما موجود في المعادن التي تخضع للقوة المسلطة عليها مع حصول تشوه ملحوظ ، وعليه فإن السيراميك لا يمكن تشكيله بعمليات التشكيل الاعتيادية المستعملة في تشكيل المعادن ، إنما يتم اللجوء لطرق تصنيع أخرى كطريقة تكنولوجيا المساحيق (Powder Technology) [6,5] .

اما البوليمر فهي كلمة لاتينية تتكون من مقطعين بولي (poly) وتعني متعدد والمقطع (mer) فتعني الجزء أي انها تعني متعدد الاجزاء [7] . فجزئية البوليمر هي جزيئة كبيرة تتكون من جزيئات كيميائية صغيرة مرتبطة مع بعضها بأواصر كيميائية ، وقد تكون هذه الجزيئات مرتبطة مع بعضها بشكل خطي فيدعى البوليمر بالبوليمر الخطي (Linear Polymer) ، او قد تكون الجزيئة البوليمرية متفرعة فيدعى بالبوليمر المتفرع (Branched Polymer) ، وفي بعض الأحيان تتشابه هذه الفروع فيما بينها فيسمى البوليمر بالمتشابك (Cross Linked Polymer) [8] .

ويمكن تقسيم البوليمرات الى :

1- بوليمرات لدنة حرارياً (Thermoplastic Polymer) .

2- بوليمرات صلدة حرارياً (Thermosetting Polymer) .

حيث تعرف البوليمرات اللدنة بأنها عبارة عن سلاسل جزيئية خطية غير مرتبطة بترباط شبكي (Cross Linking) ، بل توجد قوى تجاذب بين السلاسل وهي قوى ربط ثانوية ضعيفة يطلق عليها قوى فاندرفالز (Vander Waals Forces) ، تتحول من الحالة الصلبة الى مادة منصهرة وذائبة بتأثير الحرارة ، و من أمثلتها البولي اثلين ، النايلون ، والبولي ستايرين [8] .

اما البوليمرات المتصلدة بالحرارة فهي تتحول بتأثير الحرارة من الحالة المنصهرة والذائبة الى مادة صلبة غير قابلة للانصهار والذوبان بفعل تكوين الارتباطات التشابكية التساهمية (Covalently Cross Linking) [9] . تجهز هذه المواد بهيئة سائل لذا يمكن صبها في أي شكل مطلوب ، وتعد راتنجات الايبوكسي (Epoxy) والبولي استر غير المشبع (Unsaturated Polyester) من الأمثلة على هذا النوع .

تتطلب الكثير من العمليات التكنولوجية دمجا في الخواص التي لا تتواجد في المواد المعدنية والسيراميكية والبوليمرية لوحدها ، ولا يمكن تحقيق هذه الخواص إلا باستخدام المواد المركبة (Composite Materials) [6] .

اذ تعرف المادة المركبة بأنها المادة المتكونة من دمج مادتين او اكثر ذات خصائص فيزيائية او كيميائية مختلفة ينتج عن ذلك خواص جديدة مختلفة تماما عن خواص المكونات الأساسية [3] . ولتحضير مادة مركبة ينبغي توفر عنصرين هامين هما :

1- مادة الاساس (Matrix Material) .

2- مادة التقوية (Reinforcing Material) .

وتتحدد صفات المادة المركبة بالاعتماد على هذين العنصرين فضلا عن التفاعل الحاصل او التداخل فيما بينهما (Interference) [3] .

2-1 السيراميك المسامي (Porous Ceramic)

في السنوات الأخيرة تقدمت التكنولوجيا خطوات واسعة في صناعة الكثير من المعدات ذات مسامية مسيطر عليها (Controlled Porosity) كشرط اساسي لعملية التصنيع مثل بعض اجزاء المركبات وصناعات الفضاء [10] .

يمكن تصنيف السيراميك المسامي الى قسمين رئيسيين :

أولا : السيراميك الشبكي (Reticulate Ceramic) .

ثانيا : السيراميك الرغوي (Foam Ceramic) .

السيراميك الشبكي هو المادة التي تمتلك مسامات مفتوحة مترابطة مع بعضها بواسطة قنوات او شعيرات دقيقة ، اما السيراميك الاسفنجي فانه يمتلك مسامات مغلقة تكون عبارة عن فراغات معزولة داخل المادة . تمتلك هاتين البنيتين كثافة منخفضة نسبيا وموصلية حرارية (Thermal Conductivity) واطئة تنعكس بشكل اساسي على خاصية العزل

الحراري للمادة السيراميكية المسامية التي تتأثر بشكل المسامة وحجمها وطريقة توزيعها [10,5].

يختلف السيراميك الشبكي و الرغوي في خاصية النفاذية (Permeability) حيث تكون عالية في السيراميك الشبكي ومنخفضة في السيراميك الاسفنجي . يمكن الحصول على سيراميك مسامي يمتلك بنية منتظمة وخواص ميكانيكية عالية وخاصة عزل حراري جيدة باستخدام مواد سيراميكية مناسبة وتصنيعها بالطرق الملائمة وهذه الخواص تجعل من السيراميك المسامي منتج مناسب للعديد من التطبيقات [12,11].

3-1 تصنيع السيراميك المسامي (Manufacturing of Porous Ceramic)

هنالك مجموعة تقنيات حديثة (ميكانيكية وكيميائية) مستخدمة في صناعة المواد السيراميكية المسامية ، كما إن الخواص المطلوب توافرها في المنتج تحدد نوعا ما بطريقة التصنيع. من هذه الطرق السباكة او القولية الانزلاقية (Slip Casting) ،السباكة او القولية الشريطية (Tape Casting) ، البثق (Extrusion) ، الحقن (Injection) والكبس (Compaction). ليست كل هذه التقنيات تصلح لإنتاج أجسام سيراميكية مسامية، إذ إن العديد من المشاكل تظهر عند إنتاج السيراميك المسامي ، لكن المشكلة الأساسية تكمن في الحصول على جسم ذي مقاومة شد عالية وكثافة منخفضة ، فمقاومة المادة المسامية تعتمد بصورة أساسية على حجم المسامات والتوزيع الحجمي لها في البنية المسامية [13].

المسامية من الخواص الفيزيائية المهمة لما لها من تأثير كبير على خواص المواد مثل الخواص الميكانيكية ، إذ ان ارتفاع نسبة المسامية لاسيما المسامات ذات الحجم الواسعة يؤدي الى خفض المقاومة الميكانيكية للمادة ومنها مقاومة الانضغاط إذ تتأثر هذه الخاصية بشدة بنسبة المسامات وحجومها [15,14].

من أكثر الطرق شيوعا في إنتاج الجسم السيراميكي المسامي هي طريقة الكبس (Compaction) ، ومن الممكن زيادة المسامية عن طريق مزج مواد إضافية مختلفة مثل بعض المخلفات الزراعية ومنها قشور الرز ونشارة الخشب الى المزيج حيث تحترق المادة العضوية أثناء عملية الحرق وتتحول الى الحالة الغازية ويبقى مكانها فارغا وبذلك تزداد المسامية [16].

يؤثر الضغط المستخدم للتشكيل في نسبة المسامات ، لان استخدام ضغط عالٍ يؤدي الى زيادة رص الحبيبات وخفض مسامية النماذج الرطبة ، مما يؤدي الى حدوث التشققات أثناء عمليتي التجفيف والحرق ، بسبب عدم وجود مجال لخروج الغازات والأبخرة التي تتكون بسبب المواد المضافة علاوة على عدم وجود فراغات تساعد على تشتيت الاجهادات الحرارية المتكونة أثناء ارتفاع درجات الحرارة [17].

وفيما يلي أهم الطرق المعروفة في تكوين الجسم المسامي :

1-3-1 طريقة الانتفاخ الكيميائي (Chemical Swelling)

في هذه الطريقة يتم اضافة مجموعة مواد الى مزيج المتفاعلات السيراميكية. المواد المضافة اما ان تكون مواد عضوية او معادن غير حديدية تؤدي الى توليد غازات عند عملية الحرق ، والتي بدورها تولد فقاعات داخل المادة السيراميكية مما يؤدي الى انتفاخ (Fluffing) الجسم السيراميكي وبالتالي تكوين مسامية عالية داخل المادة السيراميكية بعد عملية الحرق . الاختيار الأنسب لكل من مادة الاساس والمادة المضافة يساعد على تكوين الغازات بشكل أفضل [18] .

2-3-1 اضافة مادة عضوية (Additive of Organic Material)

يتم في هذه الطريقة اضافة مادة عضوية تحترق خلال عملية حرق المنتج مثل الفحم الحجري (Coal) ، فحم الكوك (Coke) ، القار (Pitch) ، مخلفات البترول ، النشارة (sawdust) ، قشرة الرز (Rice Hush) ، فلين (Cork) ، فحم الخشب (Charcoal) ، ورق (Paper) و التبن (Chaff) الخ ، والتي تستخدم عادة في صناعة المواد السيراميكية المسامية من أصل الأطين [19] .
هنالك ثلاث عوامل تحدد طبيعة المادة السيراميكية المسامية المنتجة ونوعيتها بهذه الطريقة :

- 1- ترابط الطين مع التركيب العام للجسم .
 - 2- طبيعة المادة المضافة وحجمها القابلة للاحتراق .
 - 3- طريقة التشكيل .
- مايميز هذه الطريقة هو بقاء رماد متخلف بعد الحرق ، فعلى سبيل المثال عندما يضاف الفحم أو فحم الكوك يتخلف بعد عملية الحرق اوكسيد الحديد (FeO) حيث ان هذا الاوكسيد يعد مادة مساعدة على الصهر (Flux) كما يؤثر على لون المادة الناتجة. كما ان طبيعة نشارة الخشب والفلين يتطلب إنضاجها قبل خلطها مع خليط الجسم السيراميكي حيث انها قد تأخذ الرطوبة من الجسم وتؤدي الى تشقق القطعة السيراميكية لذا فان تعتيق خلطة الأطين مع هذه المواد ضرورية قبل القولية لأجل جعل الخلطة متجانسة [19,12].

3-3-1 اضافة مادة متطايرة (Additive of Volatilized Material)

في هذه الطريقة تضاف مادة متطايرة أثناء الحرق مثل النفثالين ، الكبريت ، الامونيا ، والكلور حيث ان اضافة مواد نقية نسبياً يمكن ان تزال بالتسامي (Sublimation) وقد تحسن هذه الطريقة بعض مساوئ الطريقة السابقة حيث لا وجود

لرماد متخلف يعمل كمادة صهورة ولا تؤثر هذه الطريقة ايضاً على لون المنتج ، كما ان المادة المضافة التي تولد المسامية تزال من المنتج عند التسخين بدرجات حرارة واطنة ولا تسبب خطر التسخين الفائق الذي يؤدي الى التشوه (Distortion) [12] .

4-3-1 استخدام خلية البوليمر الأسفنجي المفتوحة (Open-Cell Polymeric) (Sponge)

حيث يتم في هذه الطريقة تحويل المسحوق او مجموعة المساحيق الى طين سائل (Slurry) ثم يصب المزيج في قالب من البوليمر. بعد جفاف السائل الطيني يحصل ترسيب لمكوناته على جدران القالب ، يتبعها عملية تجفيف في درجة حرارة لا تتجاوز (110) °م ومن ثم يلبد الجسم بأكمله عند درجات الحرارة العالية فيحترق البوليمر تاركا الجسم السيراميكي ملبدا ذو بنية مجهرية مسامية مشابهة لبنية البوليمر المستخدم [11] .

4-1 الدراسات والبحوث السابقة :- (Literature Survey)

هنالك مجموعة من الدراسات والبحوث التي استخدمت الطرق السابقة الذكر في إنتاج أجسام سيراميكية مسامية منها :

حصل الباحث (Slosarzyck) [20] على سيراميك الاباتايت الهيدروكسيلي (hydroxy apatite ceramic) بنسبة مسامية (31.9%) وذلك باستخدام اوكسيد الكالسيوم (CaO) وحامض الفسفوريك (H₃PO₄) كمادة أساس للحصول على مسحوق الاباتايت الهيدروكسيلي (Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂) وبعد اجراء عملية الكلسنة (Calcination) بدرجة حرارة (850)°م تمت اضافة كمية قليلة من فوسفات الكالسيوم (Ca₃(PO₄)₂) . المسحوق النهائي الناتج بعد عملية الكلسنة تم خلطه مع الماء المقطر ليكون مستحلبا سيراميكيا. ثم اخذت نماذج من مادة إسفنج البولي يورثان المرن (Elastic Polyurethane Sponge) حيث تم غمرها في المستحلب السيراميكي الناتج لدرجة الإشباع وبعد التجفيف والحرق فان المادة الاسفنجية تحترق تاركة الجسم السيراميكي ذو بنية مسامية.

كما قام الباحثان (Frank & Kevin) [21] بتصنيع أجسام سيراميكية مسامية وذلك عن طريق ترشيح مستحلب سيراميكي داخل جسم بوليمري إسفنجي. استخدمت هذه الأجسام لاحقا في تصنيع مادة مركبة (Ceramic-Metal). تم استخدام مادة البولي يورثان (PU) لتصنيع الجسم البوليمري حيث تم كبسه داخل قالب من الالمنيوم وبدرجة حرارة (110)°م ولمدة (6) ساعات وعلى شكل لوح للحصول على عتبة اسفنجية ذات مسامية مفتوحة . كما قاما باستخدام مسحوق الالومينا (Al₂O₃) لتكوين مستحلب (slurry) السيراميك وبحجم حبيبي (7µm) . عملية الترشيح تمت باستعمال منظومة ضغط هوائية حيث وضعت العينات الاسفنجية في المستحلب السيراميكي وضغط المستحلب داخل مسامات الإسفنج , ثم جففت العينات الناتجة عند درجة حرارة الغرفة

لمدة (5) أيام تلتها بعد ذلك المعاملة الحرارية وهي التسخين الى درجة حرارة (550)°م لمدة ساعة حيث يحترق البوليمر وينتج جسم سيراميكي ذات توزيع مسامي مشابه لتوزيع مسامية الجسم الاسفنجي ثم يلبد بدرجة حرارة (1300)°م ولمدة (4) ساعات ، بعدها يصبح الجسم جاهز ليرشح ضمنه طور آخر من مادة مختلفة وتكوين مادة مركبة .

محلها استخدمت الباحثة (وفاء عبدالخالق الراوي) [22] طريقتين لتشكيل المواد السيراميكية وبالتحديد طريقتي الكبس شبه الجاف والصب الانزلاقي لتصنيع سيراميك مسامي من بعض المواد الخام المحلية كالكاولين والسيلكا . استعمل مزيج من مسحوق الالمنيوم والخاصين لتوليد الغازات خلال عملية التحضير بطريقة الانتفاخ الكيميائي لتوليد المسامية في المنتجات السيراميكية . حرقت النماذج المشكلة بأربع درجات حرارية (1200,1100,1000,900)°م وقد وجد ان طريقة التشكيل المستخدمة في التصنيع لها تأثير كبير على خصائص الأجسام السيراميكية الناتجة . فمن ناحية المسامية وجد بان التشكيل بالصب الانزلاقي يعطي أجساماً ذات مسامية اعلى من طريقة التشكيل بالكبس شبه الجاف الذي امتازت نماذجه المصنعة بجودة الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

التطور التكنولوجي في الوقت الحاضر يهدف الى الحصول على منتجات وخدمات ذات كفاءة عالية ، وهذا مرتبط بصورة مباشرة بالعلاقة الوثيقة بين المواد الهندسية المستخدمة ، طريقة التصنيع ، التصميم والمبادئ التي تحكم طريقة التصنيع والأداء سوية . ظهرت في السنوات الأخيرة مجموعة بحوث تهدف الى تحسين الخواص الضعيفة في المواد الهندسية عموماً عن طريق اضافة مواد اخرى تزيد من كفاءتها ، وذلك بتشكيل مادة مركبة ذات خواص جديدة . لقد بدأت البحوث في استخدام هذه الطريقة في المعادن ، حيث يصنع جسم معدني يمتلك مسامات ويسمح لمعدن اخر او سبيكة بالتغلغل ضمن هذه المسامات وتكوين مادة مركبة جديدة مع دراسة التغيرات الحاصلة في خواص المادة الناتجة .

قام الباحث (Gacek) وجماعته [23] بتصنيع جسم مسامي مكبوس من مسحوق التنكستن ودراسة تأثير عملية الكبس والتلييد والترشيح على الخواص الميكانيكية ، حيث قاموا بترشيح سائل الفضة (Silver) خلال الجسم المسامي . تم تصنيع العينات المعدنية بطريقة تكنولوجيا المساحيق حيث كبس المسحوق داخل قالب معدني وبعد التلييد غمر في سائل الفضة ومن دون ضغط حيث يترشح السائل داخل المسامات . بعد ذلك تم دراسة تأثير كل من الكثافة الظاهرية ، الكثافة الحقيقية ، معدل الحجم الحبيبي والسطح النوعي على خواص المادة الناتجة . أظهرت النتائج ان كثافة الاجزاء المكبوسة بنفس الضغط تعتمد على خواص مسحوق التنكستن المستخدم كما تبين وجود تأثير واضح للكثافة الظاهرية على كثافة المنتج النهائي ، كما ظهر ان توزيع المسامية يؤثر بشكل كبير على صلادة الاجزاء الملبدة .

قام الباحثان (Lezanski, Rutkowski) [24] بترشيح سائل النحاس خلال عينات مسامية مصنعة من التنكستن الملبد ، العينات صنعت بطريقة الكبس ثم لبدت بدرجة حرارة (1200)°م ولمدة ساعتين وقد كانت نسبة المسامية في العينات (23-40) % . بعدها أجريت عملية الترشيح عن طريق الغمر الكلي للعينات في سائل النحاس وبدرجة

حرارة (1100)°م . أجريت عدة اختبارات ميكانيكية وفيزيائية وبينت النتائج ارتفاع الخواص بصورة عامة مع انخفاض في قيمة المسامية بشكل ملحوظ .
 قدم الباحث (Martins) وجماعته [25] معادلة رياضية لتمثيل حركيات (Kinetics) السائل المعدني المرشح خلال جسم معدني مسامي مكبوس (Porous Compact) . فقد بينوا بأن حركة السائل الممتلئة بالخاصية الشعرية يمكن استنباطها عن طريق موديل رياضي يحل بواسطة التحليلات العددية ، وأوضحوا بأنه تحت ظروف معينة يكون الحل التقريبي مقبول وقريب من الناحية العملية.

قام الباحثان (Subramanian & Schneibel) [26] بتصنيع مادة مركبة ذات أساس من السرميت المكون من كربيد التنكستن (WC) و كربيد التيتانيوم (TiC) عن طريق ترشيح مادة الومينات الحديد (FeAl) شبه المعدنية خلال العينات المسامية المصنعة من السرميت وبطريقة الترشيح من دون ضغط (Pressureless Infiltration) . تم اجراء عدة اختبارات ميكانيكية لتقييم اداء المادة المركبة الناتجة حيث اجري اختبار الصلادة ، مقاومة الانحناء ، متانة الكسر كما اجري اختبار الماسح الالكتروني (SEM) لمعاينة التركيب المجهرى الناتج . كذلك تم اجراء اختبار مقاومة التأكسد للمادة الناتجة . أظهرت نتائج الاختبارات المذكورة تحسناً واضحاً في الخواص بحيث بلغت مقاومة الانحناء اعلى مايمكن عند نسبة ترشيح (30%) من المركب شبه المعدني ، كذلك تحسنت الصلادة ومقاومة الصدم بشكل كبير ، فحص الماسح الالكتروني (SEM) بين ان القيمة العالية لمتانة الكسر كانت بسبب السلوك المطيلي للمركب شبه المعدني عندما يوجد بطبقة نحيفة (thin)، كذلك فان التحسن في مقاومة الانحناء كان عن طريق التحكم في الحجم الحبيبي للمادة المرشحة ، كما لوحظ تحسن في مقاومة التأكسد بشكل كبير.

استخدمت الباحثة (Khansaa) [27] تقنية الترشيح لهيكل مسامي معدني ذي درجة انصهار عالية (مسحق الحديد) بمعدن سائل ذي درجة انصهار واطئة (الالمنيوم) . تم تصنيع الجسم المسامي بالكبس ثم التلييد بوجود المسحق المعدني . استخدمت الباحثة تقنية الترشيح من دون ضغط ، كذلك تمت دراسة أهم العوامل المؤثرة في عملية الترشيح وهي (الحجم الحبيبي لدقائق المعدن ، ضغط الكبس ، درجة حرارة التلييد وفترة التلييد) على المسامية ، حيث تم حساب المسامية بعد الكبس و بعد التلييد وكذلك بعد الترشيح . تم اجراء العديد من القياسات منها الكثافة الخضراء ، كثافة التلييد ، كثافة المادة الناتجة عن الترشيح .

قام الباحثان (Travitzky, Shlayen) [28] بترشيح معدن داخل جسم سيراميكي ، حيث قاموا بتصنيع مادة مركبة هي عبارة عن أجسام سيراميكية مسامية وترشيح سبيكة (Cu-O Alloy) خلال هذه المادة وباستخدام طريقة الترشيح من دون ضغط (Pressureless) . المادة السيراميكية كانت من الالومينا وصنعت بكسور حجمية مختلفة من المسامية المفتوحة . العينات السيراميكية تم تصنيعها بطريقة الكبس الجاف ومن ثم لبدت بدرجة حرارة (1750)°م لمدة ساعة واحدة ، ولغرض تقييم مقاومة المادة المركبة تم اجراء اختبار الانحناء (4-Point Bending) للعينات المرشحة وغير المرشحة. كما اجري اختبار الصلادة بطريقة فيكرز. أظهرت النتائج ارتفاع الخواص الميكانيكية بشكل

واضح بعد عملية الترشيح حيث تزداد المقاومة عموماً بزيادة الكسر الحجمي للمادة المرشحة .

فضلاً عن ترشيح المواد المعدنية ضمن أجسام سيراميكية ، هنالك محاولات لترشيح مواد بوليمرية داخل الجسم السيراميكي . فقد قام الباحث (Yamada) وجماعته [29] بدراسة عملية ترشيح (Infiltration) لسائل بوليمري داخل مادة أساس من أسود الكربون (Carbon Black) للحصول على مادة مركبة ذات خواص ميكانيكية جيدة . العينات الكربونية تم تصنيعها باستخدام طريقة الكبس (Pressing) في قالب من الفولاذ المقاوم للصدأ للحصول على عينات مسامية . البوليمرات المستخدمة في هذه الدراسة هي بولي بيوتادين (PBD) ، اثلين بروبيلين (EP) ، و الستايرين بولي بيوتادين (SBD) حيث تم غمر العينات المصنعة في سائل البوليمر لفترات مختلفة للوصول الى حالة الإشباع بالبوليمر . أظهرت النتائج ان معدل الترشيح ودرجة الإشباع تتناقص مع زيادة لزوجة المادة المرشحة . كذلك تم دراسة تأثير التركيب الداخلي للعينات على عملية الترشيح وظواهر الإشباع . لغرض تقييم أداء المادة الناتجة فقد تم اجراء عدة اختبارات ميكانيكية للعينات قبل وبعد الغمر في سائل البوليمر . أظهرت النتائج ارتفاعاً واضحاً في كل من مقاومة الشد والانضغاط ومقاومة الصدم للعينات المغمورة وتبين تحسنها بشكل كبير بعد الغمر .

قام (Ahmed) وجماعته [30] بدراسة إمكانية تقوية مادة سيراميكية مسامية بمادة بوليمرية عن طريق ترشيح (Infiltration) البوليمر داخل التركيب المسامي للسيراميك . حيث تم استخدام مادة سيراميكية من الألومينا عن طريق تقويتها بمادة بوليمرية ذات أساس من الأكرليت (Acrylate) . تم استخدام القوالب الشريطية (Tape Casting) في إنتاج عينة من الألومينا ذات أبعاد (2*5 mm) وبارتفاع (25 mm) ، لبنت بدرجة حرارة (1300)°م لمدة ساعة واحدة ، اما البوليمرات المستخدمة فهي بولي ميثا اكريليت ، بولي ستايرين والبولي بروبيلين . قام الباحثون بإجراء اختبار الانحناء (3-point bending) لغرض قياس المقاومة الميكانيكية للمادة الناتجة بعد الترشيح ، كما وجد من خلال التجارب انخفاض المسامية بشكل واضح بعد الترشيح . أظهرت الدراسة تحسن مقاومة الكسر للعينات السيراميكية المرشحة بمقدار (80%) مقارنة مع المادة السيراميكية الاساس.

5-1 الهدف من البحث (Aim Of The Work)

من الواضح واقعيّاً ان المادة السيراميكية على الرغم من كونها مادة تمتلك صفات جيدة ، مثل مقاومة الانضغاط والمقاومة الميكانيكية العالية مما يؤهلها للاستخدام في تطبيقات واسعة ، إلا ان هشاشيتها وافتقارها بشكل كبير الى المتانة يحدد من استخدامها في كثير من المجالات . لذا فان الدراسة الحالية اخذت على عاتقها محاولة تحسين متانة

المادة السيراميكية عن طريق تكوين مادة مركبة ذات أساس سيراميكي مسامي صنع من مادة الكاؤولين مع اضافة نشارة الخشب اليه وتقويتها بمادة بوليمرية (البولي استر غير المشبع) اكثر متانة من السيراميك ، واستخدمت طريقة الترشيح او التغلغل (Infiltration) لإنتاج هذه المادة المركبة .

الفصل الثاني

الجزء النظري

Theoretical Part

2-2 معيار عملية الترشيح (Criteria of Infiltration Process)

هناك مجموعة من الأساسيات والحقائق التي يشترط توفرها لكي تتم عملية الترشيح والتغلغل بشكل ملائم وفعال [32,33].

- 1- يجب ان تكون درجة حرارة انصهار الجسم المسامي اعلى من درجة انصهار الراشح، للحفاظ على جساءة الهيكل من دون تغيير أثناء انسياب الراشح داخل المسامات في حالة استخدام التسخين أثناء الترشيح .
- 2- عدم وجود ذوبانية متبادلة او مشتركة بين كل من مادة الجسم الاساس ومادة الراشح لكي يتم امتصاص الراشح ضمن المسامات فقط .
- 3- عدم وجود تفاعل تبادلي او مشترك بين مادتي الجسم الاساس والراشح ، لضمان عدم حصول أطوار جديدة تؤدي الى غلق المسامات ومنع او إرباك عملية التغلغل .
- 4- التبلل الجيد بين المادة المرشحة والجسم المسامي خاصة أساسية وأولية لاستكمال الفائدة من الترشيح .

3-2 المسامية (Porosity)

يمكن تعريف المسامية بأنها نسبة حجم المسامات الموجودة في الجسم الى الحجم الكلي للجسم ، وعليه يمكن ان تقسم المسامية الى مسامية ظاهرية ومسامية حقيقية . المسامية الظاهرية (Apparent Porosity) تمثل نسبة حجم المسامات المفتوحة الى الحجم الكلي للجسم اما المسامية الحقيقية (True Porosity) فهي نسبة حجم المسامات المغلقة والمفتوحة الى حجم الجسم الكلي .

المسامية يمكن ان تكون قيمتها من الصفر كما في بعض الصخور البركانية او تصل الى ان تشغل معظم الجسم كما في العوازل والمرشحات . يؤثر في المسامية العديد من المتغيرات كشكل الحبيبات وحجمها ، التوزيع الحجمي للحبيبات ، ودرجة الترابط بين الحبيبات . فزيادة الحبيبات الناعمة نسبة الى الحبيبات الخشنة تقلل المسامية، وذلك لأنها تحتل الفراغات بين الحبيبات الخشنة ومن ثم ستقل الفراغات ، وكذلك زيادة درجة الاندماج او الارتباط بين الحبيبات تقلل من المسامية . إذا ما فرض ان هذه المتغيرات ثابتة فان شكل الحبيبة الكروي هو الذي سيؤثر على المسامية وليس نصف قطر الكرة (الحبيبة) [36].

هنالك عوامل اخرى تزيد من خاصية المسامية واخرى تؤدي الى خفضها ، فمثلا درجة الحرارة العالية تؤدي الى انخفاض المسامية نتيجة لعملية التليد . كذلك وجود مواد صهورة (Fluxes) التي تكون ذات درجات انصهار واطئة حيث انها تملأ المسامات ، بينما وجود المواد المتطايرة مع الأطياف او المواد التي تتحلل بتأثير الحرارة وتحرر غازات فانها تترك أماكنها فارغة وبهذا تزداد المسامية [37].

هناك العديد من طرق قياس المسامية منها طرق مباشرة تعتمد على حساب الحجم، واخرى غير مباشرة تعتمد على قياس بعض الخواص البصرية للفراغات . ومن إحدى

طرق قياس المسامية المباشرة طريقة الامتصاص التي تعتمد على قاعدة ارخميدس التي تسمى أحيانا باسمه ، بعد غمر النموذج بسائل مبلل (Wetting Liquid) وتركه لفترة ليمنص السائل من قبل النموذج ، وبحساب وزن النموذج قبل وبعد الامتصاص وحساب كمية السائل المزاح الذي يمثل الحجم الظاهري للنموذج يمكن معرفة مقدار المسامية [38]. ويمكن حساب المسامية الظاهرية من العلاقة الآتية وبالاستناد الى ASTM (C373 – 88) [39] :

$$\text{Apparent Porosity \%} = (M-D/ M-S) \dots\dots(1)$$

حيث ان :

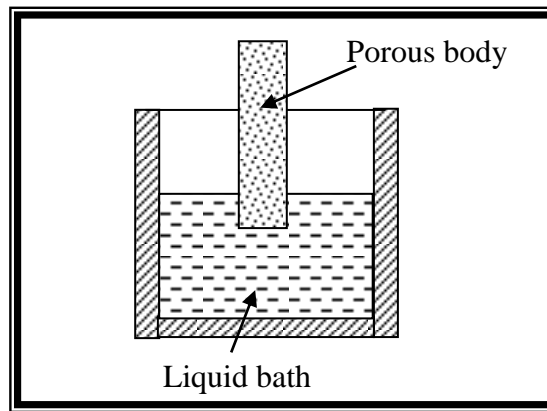
- M :- الوزن المشبع (g).
- D :- الوزن الجاف (g).
- S :- الوزن المعلق (g).

4-2 تقنيات الترشيح (Infiltration Techniques)

من خلال تطور تقنية الترشيح او التغلغل المستخدمة لإغراض مختلفة ظهرت وطورت طرق متعددة جميعها تعد طرق مناسبة في الإنتاج ، إلا انها تعتمد على النظام المشترك للمواد المستعملة (الهيكل المسامي والمادة الراشحة) ، مواصفات المنتج ، نوعية الأجهزة والأدوات المستخدمة [32]. وان اغلب التقنيات المستخدمة في الترشيح هي :

1-4-2 الترشيح بالخاصية الشعرية (Capillary – Dip Infiltration)

في هذه التقنية يتم غمر الجسم المسامي بشكل جزئي في إناء او بوتقة تحوي على مذاب المادة الراشحة ، وكما موضح في الشكل (2-2) . السائل يتغلغل بفعل القوة الشعرية ويستمر بالارتفاع طارداً الغاز من المسامات . ويمكن ان يقاس ارتفاع الراشح في البوتقة قبل وبعد الترشيح لمعرفة كمية ماترشح داخل الجسم المسامي .

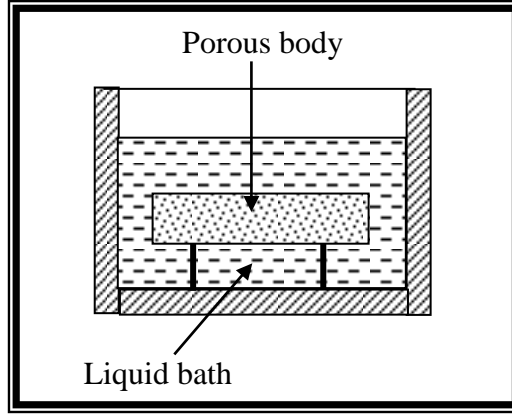


الشكل (2-2) يوضح تقنية الترشيح بالخاصية الشعرية [32].

2-4-2 الترشيح بالغمر الكلي (Full –Dip Infiltration)

الجسم المسامي يغمر بشكل كلي في المنصهر كما في الشكل (3-2) ، في هذه الحالة يتم تغلغل الراشح خلال فتحات الجسم المسامي من جميع الجهات باتجاه المركز ،

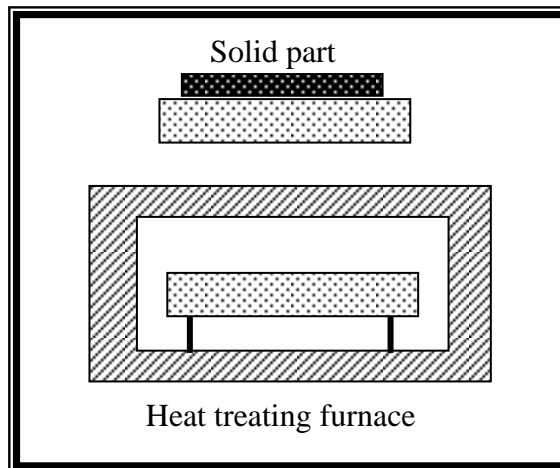
لذلك ليست هناك فوهة لهروب الغازات من الجسم المسامي وإنما يمكن ان يزاح فقط عن طريق انتشاره ضمن السائل المتغلغل ، ولتجنب احتباس الغاز فان الجسم المسامي يجب ان يغمر ببطء او على شكل مراحل ، وان تسليط نظام تفريغ هوائي (Vacuum) يسهل عملية سحب الغاز [32] .



الشكل (3-2) يوضح الترشيح بالغمر الكلي [32].

3-4-2 الترشيح بالتماس (Contact Infiltration)

يوضع الراشح أولاً وهو صلب بشكل ملاصق او على تماس مباشر مع الجسم المسامي المثبت ، وبعد رفع درجة الحرارة وانصهار الراشح فانه سيتغلغل في المسامات . إذا وضع الراشح على السطح العلوي للجسم كما في الشكل (4-2) فان الشد السطحي يمكن ان ينشره على جميع أوجه الجسم المسامي قبل الاختراق الى قلب الجسم . هذه الطريقة ملائمة لترشيح المعادن ، حيث يحدث التليد التلقائي للمعدن داخل الجسم المسامي وبهذا تعد طريقة الترشيح هذه طريقة إنتاجية .



الشكل (4-2) يوضح تقنية الترشيح بالتماس [32].

4-4-2 الترشيح بالتفريغ الهوائي (Vacuum Infiltration)

تتم عملية الترشيح بواسطة التفريغ الهوائي عن طريق إحداث تخلخل في الضغط وذلك بسحب الهواء الموجود في مسامات الجسم السيراميكي مما يمهد للسائل الراشح بالتغلغل عوضاً عن الهواء المسحوب وتتم هذه العملية وفق نظام مغلق يحتوي على مادة

الراشح السائل والجسم المسامي ، يطبق التفريغ الهوائي عند إحدى نهايتي الجسم المسامي والمادة الراشحة يتم تجهيزها من الجهة الأخرى للجسم المسامي وعلى تماس مباشر معها. تستخدم هذه الطريقة خاصة في إنتاج كراسي التحميل ذاتية التزيت (Bearing) [32].

5-2 العوامل المؤثرة على عملية الترشيح (Parameters Affecting Infiltration Upon)

1-5-2 القوة الدافعة الديناميكية الحرارية (Thermodynamic Driving Force)

من المفيد معرفة التغيرات الحاصلة في طاقة السطح (Surface Energy) التي تتواجد في النظام المكون من أطوار مختلفة (صلب ، سائل ، غاز) ، التي تمثل القوة الرئيسية الدافعة لعملية ترشيح سائل داخل جسم صلب ، حيث ان هذه التغيرات تؤدي في النهاية الى تناقص الطاقة الحرة للنظام [40,32] . لكي تتحقق عملية الترشيح فان الطور السائل يجب ان يتغلغل وبصورة تلقائية الى داخل المسامات الموجودة في الجسم المسامي والذي يمثل الطور الصلب .

من وجهة النظر الترموديناميكية فان عملية الترشيح يمكن ان تحدث فقط عندما تتضاءل الطاقة الحرة للنظام المتكامل خلال العملية ، وان التغير في الطاقة الحرة لنظام معين خلال عملية الترشيح يمكن ان تعطى بالمعادلة التالية [40]:

$$\Delta F = (\gamma_{SV} \Delta A_{SV} + \gamma_{LV} \Delta A_{LV} + \gamma_{SL} \Delta A_{SL}) < 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

حيث ان :

- ΔF :- التغير في الطاقة الحرة للنظام خلال عملية الترشيح .
- γ_{SV} :- الشد السطحي عند الحد الفاصل بين الطور الصلب والطور الغازي .
- γ_{LV} :- الشد السطحي عند الحد الفاصل بين الطور السائل والطور الغازي .
- γ_{SL} :- الشد السطحي عند الحد الفاصل بين الطور الصلب والطور السائل .
- ΔA_{SV} :- مساحة التغير السطحي عند الحد الفاصل بين الطور الصلب والطور الغازي .
- ΔA_{LV} :- مساحة التغير السطحي عند الحد الفاصل بين الطور السائل والطور الغازي .
- ΔA_{SL} :- مساحة التغير السطحي عند الحد الفاصل بين الطور الصلب والطور السائل .

وعلى افتراض ان السطح الكلي عند الحد بين الطور السائل والطور الغازي لا يتغير خلال عملية الترشيح نجد ان :

$$\Delta A_{LV} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

وان التناقص في سطح التماس بين الطور الصلب والطور الغازي يساوي التزايد في السطح بين الطورين الصلب والسائل فان :

$$\Delta A_{SL} = -\Delta A_{SV} \quad \dots\dots\dots(4)$$

وعليه يمكن اعادة كتابة المعادلة (2) وكما يلي :

$$\Delta F = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) > 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

هذه الصيغة تبين ان امكانية حصول عملية الترشيح بصورة تلقائية ممكنة فقط عندما يكون الفرق في طاقة السطح الفاصل للأطوار (صلب - غاز) او (صلب - سائل) موجب.

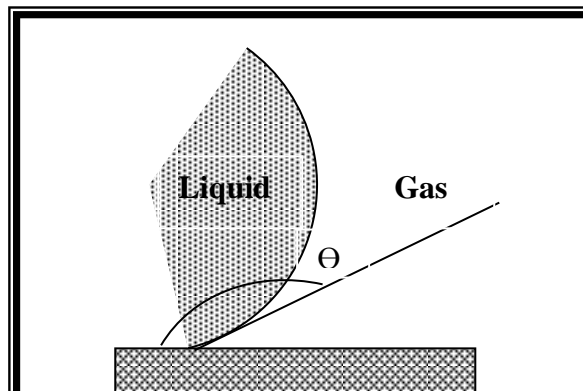
من الناحية العملية فان حساب طاقة السطح الفاصل بين الأطوار عدديا يكون صعب ولكن الأسهل حساب زاوية التبلل (Wetting Angle) وان القيمة الرياضية لزاوية التبلل (θ) تعتمد بشكل تبادلي على طاقات السطح بين مكونات النظام ومن خلال المعادلة التالية: [40]

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

هذه المعادلة وضعت لأول مرة من قبل (Young) عام (1805) وبالاعتماد على الاساس الميكانيكي ، وبعد ذلك برهنت ثرموديناميكا من قبل (Gibbs) ، اما (Johnson) [41] فقد استبدل المعادلة (5) بالصيغة التالية :

$$\gamma_{LV} \cos\theta > 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

انّ طاقة السطح عند الحد الفاصل بين الطور السائل والطور الغازي تكون موجبة دائماً والقيمة الموجبة يمكن ان تنتج من المعادلة (7) بالاعتماد فقط على إشارة جيب تمام الزاوية (θ) والمعادلة (7) تكون مقبولة فقط عندما تكون زاوية التبلل ($0 \leq \theta < 90^\circ$)



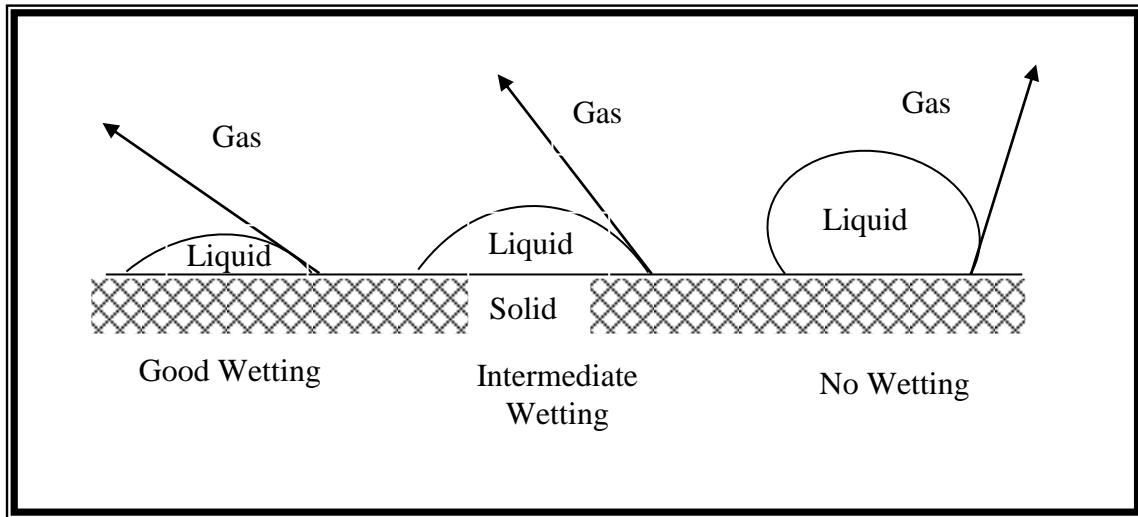
الشكل (5-2) يبين زاوية التبلل [41]

الشرط الأساس لعملية الترشيح التلقائي يعتمد على قابلية التبلل الجيدة للجسم المسامي من قبل الطور السائل الذي يملأ المسامات . وعندما تكون زاوية التبلل ($\theta = 0$) فان قابلية التبلل تكون كاملة .

الشكل (6-2) يبين قيمة الزاوية (θ) لنظام يتراوح من امكانية حدوث التبلل الى عدم حدوثه وباستخدام المعادلة (6) واعتماداً على القيمة النسبية الى (γ_{SV}) و (γ_{SL}) وبالاعتماد على الاحتمالات التالية : [42,35]

$\gamma_{SV} < \gamma_{SL}$:- $\cos\theta$ is negative , $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ (لايبل)

$\gamma_{SV} > \gamma_{SL}$:- $\cos\theta$ is positive , $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ (يبل)



الشكل (6-2) يمثل درجات التبلل المختلفة [35]

2-5-2 القوة الدافعة الحركية (Kinetic Driving Force)

أول معادلة عرفت لوصف حركات عملية الترشيح هي [43] :

$$h^2 = K * t \quad \dots\dots\dots(8)$$

حيث ان :

h : عمق الترشيح .

t : الزمن .

K : ثابت حركية الترشيح ، الذي يمكن تعريفه من خلال المعادلة التالية :

$$K = \frac{\gamma_{LV} \cdot \cos\theta \cdot r}{2\eta} \quad \dots\dots\dots(9)$$

حيث ان :

r :- نصف قطر الأنبوب الشعري .

γ_{LV} :- طاقة الحد الفاصل بين الطور السائل والطور الغازي .

θ :- زاوية التبلل .

η :- لزوجة السائل .

من الناحية العملية فان معدل ترشيح السائل داخل الجسم المسامي يكون ذو أهمية حسابية كبيرة ، القيم العملية المتعلقة بثابت الترشيح (K) تكون اقل بالمقارنة مع القيم المحسوبة من المعادلة (9) ، وهذا التباين يمكن ان يعود الى ان زاوية التبلل تختلف خلال عملية الترشيح عن قيمتها المحددة تحت ظروف الاتزان [40] .
 هنالك مجموعة من الدراسات اقترحت أول نظرية حركية تتعلق بمعدل ارتفاع الراشح خلال الأنبوب الشعري كما في المعادلة التالية [45,44] :

$$h = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\gamma_{LV} \cdot \cos\theta \cdot r \cdot t}{2\eta}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

هذه المعادلة تبين ان القطع المكافئ (Parabolic) يعتمد على مستوى (ارتفاع) الاختراق وزمن الترشيح . ومنها يمكن الملاحظة انه لتحسين كفاءة عملية الترشيح يجب تحقيق العوامل التالية [35] :

- 1- زاوية تبلل قليلة .
- 2- شد سطحي عالٍ .
- 3- لزوجة منخفضة للسائل المرشح .
- 4- زمن ترشيح طويل .

كل هذه العوامل يمكن ملاحظتها من خلال المعادلة (10) ماعدا المقدار ($\cos\theta$) .
 اما في الحالة التي يكون فيها عمق الترشيح قليلا والذي يمكن تسميته بالجريان الأفقي (Horizontal Flow) فتمثله المعادلة التالية : [35]

$$h^2 = \frac{p^2 r^2}{32\eta^2} \left[\frac{8\eta}{pr^2} \left(\frac{2\gamma_{LV} \cos\theta}{pr} - gh \right) t - \exp\left(\frac{-8\eta t}{pr^2}\right) + 1 \right] \dots\dots\dots(11)$$

حيث :

P :- الضغط المسلط .

g :- التعجيل الأرضي .

وتطبق هذه المعادلة عندما يكون زمن عملية الترشيح قصير .

المسافة التي يتحركها السائل على طول الأنبوب الشعري بعد زمن من تسليط الضغط (p) تبينه المعادلة التالية :

$$h = \sqrt{\frac{r^2 t}{4\eta} \left(\Delta p + \frac{2Df}{r} \right)} \dots\dots\dots(12)$$

حيث (Df) هي القوة الدافعة للتبلل ويمكن تعريفها بالمعادلة التالية :

$$Df = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \dots\dots\dots(13)$$

عندما يكون ($Df > \gamma_{LV}$) والزاوية ($\theta = 0$) فإن السائل ينتشر تلقائياً على السطح الصلب [41] . وعندما تكون زاوية التبلل (θ) لعملية الترشيح من دون استخدام ضغط تساوي (90°) فإنها تعد قيمة حرجة. من الناحية الترموديناميكية فإن هذه الحالة يمكن ان تحدث وتعتمد على القيمة العملية لزاوية التبلل ، الشد السطحي للسائل ، قطر المسامة ، واللزوجة [42] . يمكن تقييم حركيات الترشيح عن طريق قياس ارتفاع (عمق) اختراق الراشح مع السيطرة الدقيقة والمحكمة على الزمن وكما يلي :

$$h = \frac{\Delta m}{\Phi \cdot \rho \cdot A} \dots\dots\dots(14)$$

حيث :-

h :- معدل ارتفاع اختراق الراشح (cm).

Δm :- معدل وزن الراشح (g) .

Φ :- الكسر الحجمي للمسامية .

ρ :- كثافة الراشح (g/cm^3) .

A :- مساحة المقطع العرضي للجسم المسامي (cm^2) .

3-5-2 التبلل (Wetting)

التبلل هو انجذاب السائل بشكل يمكنه من البقاء في حالة اتصال فيزيائي مع الطور الصلب في النظام الذي يحويهما ، والذي بدوره يؤثر على معدل ترشيح السائل خلال الجسم المسامي حيث يتناسب معدل الترشيح مع نصف قطر المسامة تناسباً طردياً [35] . يحدث التبلل عندما تتكون اواصر عرضية قوية عند السطح الفاصل (Interface) بين الطور السائل والطور الصلب ، يلعب سطح التماس او السطح الفاصل بين الطورين دوراً مهماً في قابلية التبلل ، حيث يكون حساس جداً لوجود الملوثات والمتضمنات (Contamination and Inclusion) . على سبيل المثال وجود الأوكسجين أسفل زاوية التماس لمنصهر النحاس على سطح عينة من الالومينا (Al_2O_3) يقلل من قابلية التبلل بسبب وجود الأوكسجين الذي يقلل من الشد السطحي لسائل النحاس نتيجة حدوث عملية الامتزاز (Adsorption) [46] . وظاهرة التبلل تتضمن العديد من المفاهيم منها (طاقة السطح ، الشد السطحي ، الامتصاص ، والتلاصق) والعلاقة بين هذه المفاهيم مجتمعة حتى الوصول الى حالة التوازن [32] .

تزداد قابلية انتشار او تبلل الطور السائل للطور الصلب بتغير الشد السطحي ، اذ انه بزيادة قوى الشد السطحي بين الطور السائل والطور الصلب تزداد قابلية التبلل والعكس صحيح [35] . لزيادة الشد السطحي بين الطورين فانه من الشائع استخدام مواد تعرف بالمواد المنظفة (Detergents) والتي تضاف خلال عملية كبس المسحوق لتكوين الجسم المسامي ، عند اجراء عملية الترشيح تعمل هذه المواد على زيادة انتشار السائل الراشح على سطح الجسم المسامي بشكل أفضل فتعمل القوة الشعرية على سحب السائل الى داخل المسامات ومن ثم زيادة التغلغل [35,32] .

6-2 متانة السيراميك (Ceramic Toughness)

تعرض المادة السيراميكية - بنوعها المتبلور (Crystalline) وغير المتبلور (Non-Crystalline) في درجة حرارة الغرفة - الى الكسر قبل حدوث أي تشوه لدن ، كاستجابة للإجهاد المسلط عليها ومن ثم يحدث الكسر الهش (Brittle Fracture) [5] . عملية حدوث الكسر الهش تتضمن تكون الشق خلال المقطع العرضي للمادة وتقدمه وبتجاه عمودي على الحمل المسلط . يكون نمو الشق عادة في السيراميك المتبلور خلال الحبيبات (Grain) وعلى طول المستويات البلورية التي تحتوي كثافة ذرية عالية [6] . متانة الكسر للمواد السيراميكية المقاسة بصورة فعلية هي اقل من المتانة المحسوبة بصورة نظرية والمسندة الى الأسس النظرية ، ولعل هذا يعود الى وجود شقوق مجهرية (Flaws) صغيرة جداً في المادة تعمل كرافعات اجهاد (Stress Raisers) ومن ثم تزيد من قيمة الإجهاد المسلط على المادة . ان درجة تضخيم الإجهاد المسلط بواسطة هذه الرافعات تعتمد على طول الشق و نصف قطر تقوس حافة الشق وكما في المعادلة التالية :

$$\sigma_M = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{P_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

حيث ان :

σ_M :- أقصى إجهاد متولد حول حافة الشق .

σ_0 :- قيمة الإجهاد المسلط .

a :- طول الشق السطحي او نصف طول الشق الداخلي .

P_t :- نصف قطر تقوس حافة الشق .

رافعات الإجهاد قد تكون دقائق سطحية متناهية في الصغر ، شقوق داخلية (شقوق مجهرية) ، مسامية داخلية او جسيمات غريبة . على سبيل المثال فان الرطوبة والملوثات الموجودة في الجو قد تسبب شقوق سطحية في الألياف الزجاجية المصنعة حديثا وهذه الشقوق تؤثر بشكل سلبي على مقاومة المادة [5] .

قياس قابلية المواد السيراميكية على مقاومة الكسر عند وجود شق في المادة يمكن ان يعبر عنها بمتانة الكسر (Fracture Toughness) التي يمكن تعريفها طبقا للمعادلة الآتية :

$$K_{C,IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \dots\dots\dots(16)$$

حيث :

K_C :- معامل شدة الإجهاد الحرج .

K_{IC} :- متانة الكسر .

Y :- معامل خالٍ من الوحدات يعتمد على شكل كل من العينة والشق .

σ :- الإجهاد المسلط .

a :- طول الشق السطحي او نصف طول الشق الداخلي .

(K_{IC}, K_C) تعتمد على كون الحالة (plain stress) او (plain strain) وهذا يعتمد على أبعاد العينة ونوع التحميل أي ان الشق لايتقدم خلال المادة عندما يكون الجانب الأيمن من المعادلة اقل من متانة الكسر للمادة . ان قيمة متانة الكسر للمواد السيراميكية هي عموما اقل من قيمتها للمعادن [6] .

متانة الكسر في المواد السيراميكية تعتمد على طريقة التصنيع المستعملة وعلى المعاملات والمتغيرات التي ترافقها ، كما ان حجم العينة يؤثر على متانة الكسر حيث ان العينة الأكبر حجما تكون اكثر تحسناً للعيوب واقل متانة للكسر .

المواد السيراميكية تكون مقاومتها للانضغاط اعلى من مقاومتها للشد . حيث انه في حالة اجهاد الضغط لا يوجد تضخيم للإجهاد ناتج عن العيوب كما في اجهاد الشد . كما انه يمكن تحسين مقاومة الكسر في المواد السيراميكية عن طريق تكوين اجهادات ضغط متبقية (Residual Stresses) على السطح [6] .

ان التحولات الطورية التي تحصل داخل المادة والتي تعمل على تكوين انفعالات (Strains) داخل الجسم تعد وسيلة ممتازة لتقليل نمو الشق الى أدنى حد وهذه الطريقة بدأت تستخدم مؤخراً لإنتاج اجزاء سيراميكية متينة تستخدم في تطبيقات عديدة مثل اجزاء المحركات الأوتوماتيكية (Automotive Engines) [48].
على اية حال فان متانة الجسم السيراميكي يمكن التحكم بها عن طريق السيطرة على المتغيرات الآتية :

- 1- حجم العيب او الشوائب في المسحوق السيراميكي الأولي .
- 2- المسامية في الجسم السيراميكي الملبد (Sintered Body) .
- 3- الطور الذي يعيق تقدم الشق خلال الجسم [48] .

7-2 العوامل المؤثرة على متانة السيراميك (Factors Effected On) (Ceramics Toughness)

1- تأثير المسامية (Effect Of Porosity)

هناك بعض تقنيات تصنيع المواد السيراميكية التي تتعامل مع المساحيق السيراميكية والتي تعمل على تشكيلها بالكبس بشكل متتابع الى الشكل المطلوب . تتضمن هذه التقنيات تكون مسامات او فجوات بين حبيبات المسحوق خلال عملية التصنيع ، بعد ذلك وخلال المعاملة الحرارية فان بعض هذه المسامات تزال وتمتلئ في حين يبقى البعض الآخر من المسامات من دون ان يمتلئ مكوناً أجسام ذات نسب مسامية مختلفة . هذه المسامية تؤثر بشكل ضار على كل من خواص المرونة والمقاومة ، على سبيل المثال فانه يمكن ملاحظة إن معامل المرونة (Modules Of Elasticity) لبعض المواد السيراميكية يتناقص مع زيادة الكسر الحجمي للمسامية وكما في المعادلة التالية [49,6] :

$$E = E_0(1 - 1.9\Phi + 0.9\Phi^2) \dots\dots\dots(17)$$

حيث ان :

- E :- معامل مرونة المادة السيراميكية بوجود المسامات .
- E_0 :- معامل مرونة المادة السيراميكية بعدم وجود المسامات .
- Φ :- الكسر الحجمي للمسامية .

كذلك فان معامل المرونة للمادة المركبة التي تحتوي على فجوات يمكن ان تملأ بمادة اخرى فانه يخضع لقانون المخاليط (Rule of Mixtures) والذي ينص على :

$$E_{comp.(ceramic+polymer)} = E_{cer.}(V_f)_{cer.} + E_{poly.}(V_f)_{poly.}$$

حيث ان :

E_{comp} : معامل المرونة للمادة المركبة .

E_{poly} ، E_{cer} : معامل المرونة للمادة السيراميكية والبوليمرية على التوالي .

$(V_f)_{poly}$ ، $(V_f)_{cer}$: الكسر الحجمي للمادة السيراميكية والبوليمرية على التوالي .

والذي يمكن تطبيقه لجميع الخواص من اجهاد وكثافة وغيرها [3].

تؤثر المسامية بشكل سلبي على مقاومة الانحناء لسببين : الاول ان المسامية تقلل من مساحة المقطع العرضي المتعرض للحمل المسلط . والسبب الثاني هو كون المسامية تعد رافعات اجهاد ، وعلى سبيل المثال فان وجود مسامية في المادة بكسر حجمي (10%) يقلل مقاومة المادة بحدود (50%) من قيمة المقاومة المقاسة للمادة غير المسامية [51,50] .

هناك علاقة تجريبية تبين تناقص مقاومة الانحناء مع الكسر الحجمي للمسامية (Φ) وهي : [6,5]

$$\sigma_{bs} = \sigma_i \exp(-n\Phi) \quad \dots\dots\dots(18)$$

حيث ان :

σ_{bs} :- مقاومة الانحناء .

n ، σ_i :- ثوابت تستخرج بصورة تجريبية .

2- تأثير اجهادات الضغط المتبقية (*Effect Of Compressive Residual Stresses*)

ان تكوين طبقة سطحية تحتوي اجهادات ضغط متبقية يمكن ان تزيد من مقاومة المادة السيراميكية . وقد برهنت هذه التقنية بشكل جيد في الزجاج ، حيث ان وجود اجهادات ضغط سطحية متبقية تعيق الفشل الناتج من العيوب السطحية حيث ان اجهادات الضغط يمكن ان تتغلب على العيب السطحي قبل ان يبدأ بالتقدم . كذلك فان اجهادات الضغط المتبقية تعمل على زيادة مقاومة الصدمة الحرارية ومقاومة الحك [49].

هنالك مبدأ مهم لتوليد طبقة سطحية تحوي اجهادات ضغط متبقية وهو ان يكون حجم الاجهادات المتبقية الموجودة فيها اكبر من الاجهادات الموجودة في المادة الاساس . توجد عدة طرق لتكوين الطبقة السطحية الحاوية على اجهادات ضغط متبقية وهي [49,6] :

1- تكوين طبقة خارجية لها معامل تمدد حراري منخفض كما في عملية التزجيج او

مايعرف بتقسية الزجاج (Tempering of Glass) .

2- استخدام الاجهادات الناتجة من التحول الطوري كما في سيراميك الزركونيا .

- 3- الحشو (Stuffing) الفيزيائي للطبقة الخارجية بالذرات او الايونات كما في طريقة الترسخ الأيوني (Ion Implantation) .
- 4- التبادل الأيوني للايونات الصغيرة مع الايونات الكبيرة . حيث ان الايونات الكبيرة تذهب باتجاه المادة الاساس وتجعل السطح في حالة ضغط وهي مشابهة لعملية الحشو الفيزيائي ، وتستخدم بشكل كبير في الزجاج عن طريق وضع الزجاج في منصهر ملحي يحتوي ايونات كبيرة . تستبدل الايونات الصغيرة بالكبيرة وتجعل السطح في حالة انضغاط . هناك صعوبة واحدة تواجه هذه التقنية وهي الموازنة بين اجهادات الضغط السطحية و اجهادات الشد المتكونة في مركز الجسم .

3 - تأثير درجة الحرارة (Effect Of Temperature)

تؤثر درجة الحرارة على متانة السيراميك من خلال عدة عوامل منها الجو المحيط (Atmosphere) أثناء اجراء الاختبار ووجود المكونات المعدنية او الأطوار الزجاجية ضمن البنية السيراميكية ، فمثلا عندما يتعرض السيراميك الى جو تآكلي (Corrosive) مع درجات حرارة عالية فان احد الاحتمالين يمكن ان يحدث : [6] أولاً :- الحماية حيث تتكون طبقة اوكسيدية على السطح وتميل الى معالجة العيوب الموجودة على السطح عن طريق تغطيتها ومن ثم تنتج زيادة في المتانة .

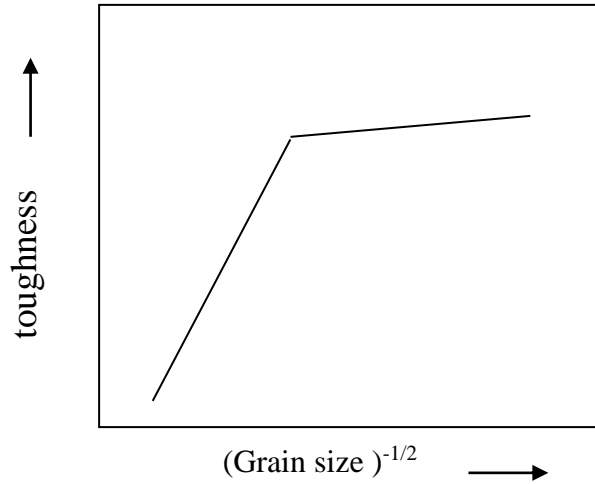
ثانيا :- المحيط التآكلي يهاجم السطح ويعمل على تكوين نقر (Pits) على السطح او تحفير (Etching) ذلك السطح في مناطق اختيارية منه وفي هذه الحالة ينتج انخفاض في المتانة .

كما ان المواد السيراميكية الحاوية على أطوار زجاجية عند حدود الحبيبات فان ارتفاع درجة الحرارة الى درجة كافية يؤدي الى انخفاض المتانة بسبب تلدين هذه الأطوار [49] .

4 - تأثير الحجم الحبيبي (Effect of Grain Size)

بصورة عامة فان متانة المواد السيراميكية تتناسب بشكل عكسي مع معدل الحجم الحبيبي (G) وكما مبين في الشكل (2-7) الذي يمثل العلاقة بين متانة الكسر و

($G^{-1/2}$) . تكون الحدود الحبيبية منطقة ضعيفة نتيجة تراكم العيوب عندها بعد ذلك يتقدم العيب خلال الحبيبة . نلاحظ من خلال الشكل ان نقصان الحجم الحبيبي يؤدي الى زيادة المتانة , ولكن ليس بشكل مستمر حيث ان المواد السيراميكية ذات الحجم الصغير جداً يحدث فيها الكسر نتيجة العيوب السطحية في المادة وتصبح المتانة غير حساسة نسبياً الى الحجم الحبيبي وهذا مايمكن ملاحظته في الشكل حيث يصبح اقل ميلاً بالنسبة الى الحجم الحبيبية الصغيرة [49,5] .



الشكل (7-2) يبين العلاقة بين الحجم الحبيبي والمتانة للمواد السيراميكية [49]

الفصل الثالث

الجزء العملي

Experimental Part

1-3 المقدمة (Introduction)

يتضمن هذا الفصل عرض مراحل تحضير جسم سيراميكي مسامي وتصنيعه وجعله جاهزاً لإجراء عملية تغلغل المادة البوليمرية داخله . هذا مع توضيح للمواد الأولية المستخدمة وطريقة التصنيع . كما يتضمن شرحاً حول عملية الترشيح (Infiltration) والأجهزة المستخدمة فيها ، ثم يليها إجراء الفحوصات المخبرية لبيان الخواص الفيزيائية والميكانيكية التي تم الحصول عليها .
يمكن تلخيص مراحل العمل الرئيسة الى :

- أولاً :- تهيئة المواد الأولية .
 - ثانياً :- تهيئة النماذج وتشكيلها.
 - ثالثاً :- تجفيف النماذج وحرقتها .
 - رابعاً :- إجراء الفحوصات قبل عملية الترشيح .
 - خامساً :- إجراء عملية الترشيح .
 - سادساً :- إجراء الفحوصات بعد عملية الترشيح .
- والشكل (1-3) يوضح مراحل سير العمليات المنجزة في هذا البحث .

2-3 المواد الأولية (Raw Materials)

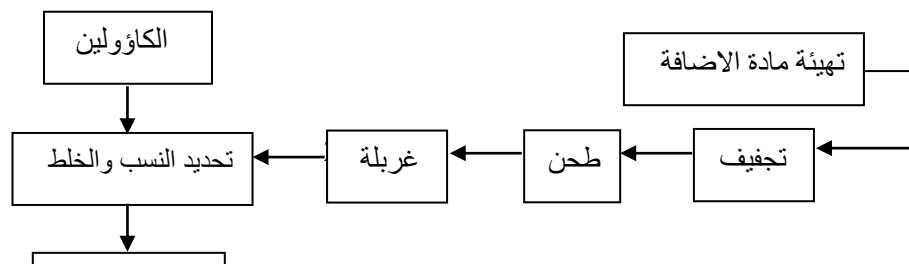
1-2-3 المادة الأساس (Matrix Material)

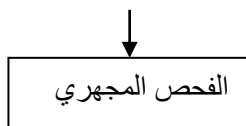
لتحضير النماذج السيراميكية المسامية تم استخدام مادة الكاؤولين ، مع اضافة نشارة الخشب كمادة عضوية تحترق أثناء تلييد المنتج تاركة مسامات داخل النموذج ، وقد تم إضافتها كنسبة حجميه .

يعد الكاؤولين من أنقى الأطيان الطبيعية ، حيث يتكون بصورة أساسية من الكاؤولينيت $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ فضلا عن كميات قليلة من الفلدسبار ، الكوارتز ، اوكسيد الحديد ، واوكسيد التيتانيوم مع كميات اقل من اكاسيد الفلزات القلوية [52] . الكاؤولين المستخدم في هذه الدراسة هو كاؤولين دويخلة المستخرج من مقلع دويخلة الواقع ضمن منخفض ألغجرة في منطقة الصحراء الغربية العراقية ، الجدول (1-3) يبين التحليل الكيميائي للكاؤولين الذي اجري بطريقة (Volumetric Method) في مختبرات الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين من اجل معرفة نسب المكونات الرئيسة والشوائب المتبقية .

الجدول (1-3) نتائج التحليل الكيميائي للكاؤولين

TOTA	L.O.I	K ₂ O	NA ₂	MG	CA	TIO	FE ₂ O	AL ₂ O	SIO ₂	الاوكسيد
L			O	O	O	2	3	3		يد
100	12.9	0.3	0.3	0.34	0.96	1.2	0.83	34.41	46.6	%
	4	4							6	





الشكل (1-3) المخطط العام للمراحل العملية المستخدمة في البحث
2-2-3 المادة الراشحة (Infiltrate Material)

تم استخدام راتنج البولي استر غير المشبع (Unsaturated Polyester Resin) وهو من الراتنجات المتصلدة بالحرارة والذي يمتاز بفعاليتها العالية ولزوجته المنخفضة وكثافته (1.19-1.1923) غم/سم³. الجدول (2-3) يوضح بعض الخواص الميكانيكية والفيزيائية للبولي استر غير المشبع [53].

الجدول (2-3) الخواص الميكانيكية والفيزيائية للبولي استر غير المشبع

المواصفة	الوحدات	القيمة
الوزن النوعي	—	1.5-1.1
صلادة روكويل	—	M70-M115
مقاومة الصدم	(J/m)	16-32
مقاومة الشد	MPa	40-90
مقاومة الانحناء	MPa	60-160

يصلد هذا الراتنج بإضافة عوامل محفزة ومواد مصلدة ومواد معجلة (Accelerator) وتستخدم مادة (Cobalt Octoate) كمادة معجلة. يستخدم هذا الراتنج بصورة واسعة في الصناعة لامتلاكه الكثير من الخواص الفيزيائية والميكانيكية الجيدة فضلاً عن سهولة الاستعمال وقلة الكلفة.

3-3 مرحلة تهيئة مادة الاضافة (نشارة الخشب)

تتضمن هذه المرحلة عدة خطوات هي:

- 1- التجفيف (Drying): - تم تجفيف النشارة في فرن التجفيف وبدرجة حرارة (110)°م ولمدة 24 ساعة وذلك لإزالة الرطوبة الموجودة فيها وتهيئتها للمرحلة اللاحقة.
- 2- الطحن (Milling): - تم الطحن باستخدام طاحونة كهربائية.
- 3- الغربلة (Sieving): - تم اختيار ثلاثة حجوم حبيبية من نشارة الخشب لبيان تأثيرها على خواص المنتج النهائي وذلك باستخدام طريقة الغربلة (Sieving).

الجدول (3-3) يوضح الحجوم الحبيبية المختارة في هذا البحث

mESH	SIZE oPENING (µM)
40	425
60	250
140	106

- 4- الخلط (Mixing): - بعد إعداد مسحوق نشارة الخشب وبالإحجام الحبيبية المبينة سابقاً حضرت الخلطات المستعملة في البحث ، حيث تم اختيار ثلاث نسب حجمية مئوية من النشارة لتخلط مع مادة الكاؤولين للحصول على الخلطة النهائية ليتم

تشكيلها بطرق التشكيل المستخدمة في هذا البحث وإنتاج الجسم السيراميكي المسامي . والنسب المختارة من نشارة الخشب هي (15،30،45) % ، وجميع هذه النسب المقترحة تمت على الحجم الحبيبية الثلاثة المختارة مسبقا . أجريت عملية الخلط باستخدام خلاط كهربائي ولمدة خمس ساعات .

الجدول (3-4) نسب الخلطات الداخلة في تشكيل الجسم السيراميكي

ت	الكاولين (%)	نشارة الخشب (%)	الحجم الحبيبي للنشارة (µM)	عدد الخلطات
a	55	45	425,250,106	3
b	70	30	425,250,106	3
c	85	15	425,250,106	3
d	100	—	—	1

3-4 تشكيل النماذج

في هذه الدراسة تم استخدام طريقتين لتشكيل النماذج

3-4-1 القوالب اليدوية

لغرض تشكيل الأجسام السيراميكية يتوجب اضافة الماء الى مساحيق المواد الاولية . لكل نوع من الأطيان توجد كمية معينة من الماء المضاف فإذا زادت هذه الكمية عن الحد المقرر تصبح العجينة اقرب الى الحالة السائلة ، مما يجعلها صعبة التشكيل كما يسبب ظهور مشاكل أثناء التجفيف والحرق . اما إذا كانت كمية الماء المضافة قليلة فتصبح المادة غير قابلة للتشكيل بسبب عدم تماسكها . في حالة اضافة الماء ضمن الحدود الصحيحة والمسموح بها نحصل على لدونه جيدة للأطيان . ولغرض تحديد اللدونة الملائمة تمت الاستعانة بجهاز بفركون (Pfefferkone) والمبين بالشكل (3-3) الذي يتكون من جزئين :

1- القالب :- وهو عبارة عن اسطوانة ارتفاعها (40mm) وقطرها (33mm) ويستخدم لتشكيل النماذج .

2- الثقل ومقداره (1192g) يكون محمولا على حامل ويندلى فوق قاعدة حديدية يوضع عليها النموذج بعد تشكيله ليسقط عليها سقوطاً حراً . ويمكن حساب معامل اللدونة من المعادلة التالية [54] :

$$a = H / h \dots\dots\dots(19)$$

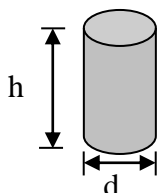
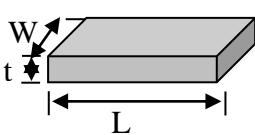

حيث ان :

a : معيار اللدونة .

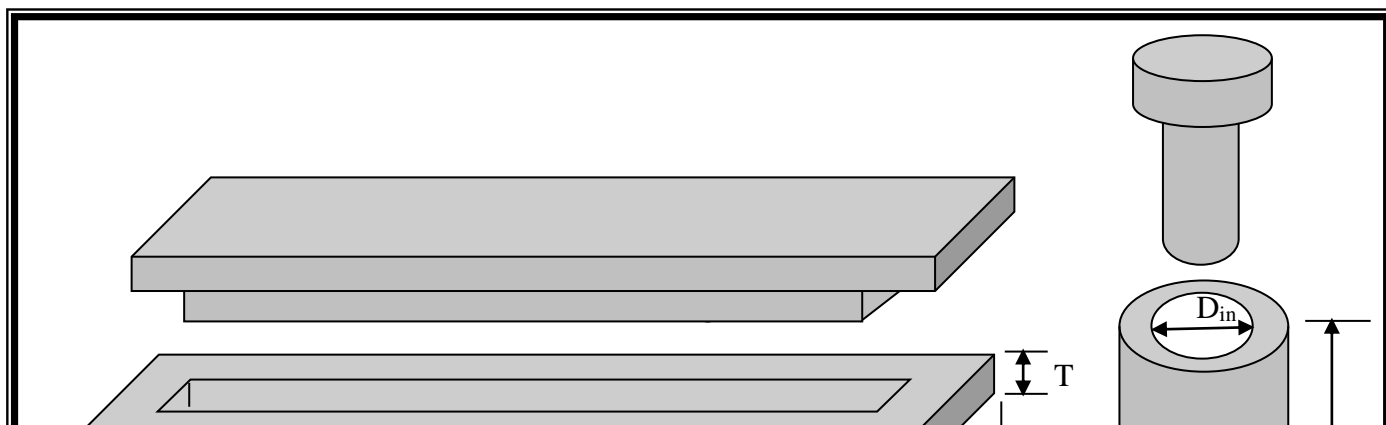
تم تحديد أبعاد وأشكال القوالب المستخدمة في تشكيل النماذج بالاعتماد على المقياس الأمريكي ASTM لكل خاصية. ان أشكال النماذج المطلوبة وأبعادها نجدها مبينة بالجدول (5-3).

تم تصنيع القوالب من مادة الفولاذ الكربوني لتصنيع النماذج لأجل قياس الخواص الميكانيكية وهي مبينة في الشكل (4-3)، اما الخواص الفيزيائية فقد تم اعتماد عينات اختبار الانضغاط في قياسها.

الجدول (5-3) أبعاد القالب والنموذج والحمل المستخدم

الحمل المستخدم (TON)	شكل النموذج	أبعاد النموذج (MM)	أبعاد القالب (MM)	رقم المواصفة	الخاصية	ت *
0.225		d = 10 h = 20	D _{outer} =20 D _{inner} =10	C773-88	الانضغاط	a
8.125		L = 115 W = 25 t = 12.5	H=50 L = 130 W = 50 T = 25	C674-88	الانحناء	b
1.554		L = 55 w = 10 t = 10	L = 65 W = 20 T = 20	C368-88	الصدم	c

* التسلسل (a , b , c) الموجود في الجدول يشير الى الشكل (4-3)



الشكل (3-4) القوالب الفولاذية



مدى تحسن الخواص نتيجة لعملية ترشيح البوليمر داخل الجسم السيراميكي . أمّا الفحوصات التي أجريت فيمكن تقسيمها الى :
 أولا :- الفحوصات الفيزيائية .
 ثانيا :- الفحوصات الميكانيكية .
 ثالثا :- الفحص المجهرى .

1-8-3 الفحوصات الفيزيائية (Physical Tests)

أجريت عدة فحوصات فيزيائية على المنتج قبل وبعد عملية الترشيح وهي كما يلي :

1-1-8-3 التقلص الطولى Linear Shrinkage

هو تقلص الأجسام السيراميكية نتيجة خروج الماء بسبب التبخر والحرق [55] . ان التقلص الذي يحدث خلال التجفيف يعود الى اقتراب حبيبات الطين من بعضها بعد ان تزال طبقات الماء التي فصلها بالتبخير . ويعد التقلص الطولى مقياسا للدونة الأطيان اذ يعد من الخواص المهمة التي يتوقف عليها دقة الأجسام وأبعادها النهائية كما انه يعطي مؤشر لحساسية الأطيان تجاه عملية التجفيف [56] .

ان معظم المواد السيراميكية تميل الى تغيير أبعادها (تقلص ، تمدد) أثناء ارتفاع درجات الحرارة خلال عملية الحرق ، وتعتمد هذه الخاصية على المادة الأولية ، التدرج الحبيبي ، درجة حرارة الحرق ، زمن النضوج (فترة المكوث) ، طريقة التشكيل ، ومقدار الضغط المستخدم .

يتم تحديد التقلص الطولى بعد الحرق للنماذج المحروقة وفقا للمواصفة القياسية ASTM Standard(C326) وذلك بقياس أبعاد النموذج قبل وبعد الحرق (القطر والارتفاع) باستخدام قدمة قياس (Vernia) وتم حساب التقلص الطولى من المعادلة التالية [12] :

$$\text{Linear Shrinkage \%} = (D_b - D_f / D_b) * 100 \dots\dots\dots(20)$$

حيث ان :

D_b : القطر قبل الحرق (mm).

D_f : القطر بعد الحرق (mm) .

2-1-8-3 المسامية الظاهرية Apparent Porosity

المنتج السيراميكي الملبد يظهر مسامية متغيرة الدرجة ، حيث ان المسامية هي قياس حجم كل المسامات الموجودة بالمادة سواء كانت مفتوحة او مغلقة وطبقا لذلك تظهر

نوعان من المسامية الحقيقية والظاهرية . المسامية الظاهرية يمكن التعبير عنها بأنها نسبة حجم المسامات المفتوحة الى الحجم الكلي للجسم [57].

تم الاستناد الى المواصفة القياسية ASTM Standard (C373-88) في حساب المسامية الظاهرية ، وحسب الخطوات التالية [39] والتي تعتمد بالأساس على قاعدة ارخميدس :

1- تجفيف النماذج في فرن التجفيف عند درجة حرارة (110)°م ولمدة (24ساعة) ثم تترك لتبرد الى ان تصل الى درجة حرارة الغرفة ، بعدها يقاس الوزن الجاف للنماذج .

2- تعلق النماذج في ورق زجاجي مقاوم وتغمر بالماء المقطر وتغلى لمدة (5 ساعة) مع ضمان كونها دائما مغمورة بالماء عن طريق تعويض الماء المتبخر ، بعدها تترك النماذج مغمورة بالماء لمدة (24ساعة) . ثبت الوزن المعلق بالماء للنماذج باستخدام شبكة مرتبطة بالميزان .

3- مباشرة بعد تثبيت الأوزان المعلقة تستخرج و تجفف سطوح النماذج من قطرات الماء العالقة بها بواسطة قطعة قماش مبللة من القطن ثم يقاس الوزن المشبع بالماء .

4- بعد اجراء جميع الخطوات أعلاه ، تحسب المسامية من المعادلة التالية :

$$\text{Apparent Porosity \%} = (M-D / M-S) * 100 \dots\dots\dots(21)$$

حيث ان :

M : الوزن المشبع (g) .

D : الوزن الجاف (g) .

S : الوزن المعلق (g) .

Density الكثافة 3-1-8-3

كثافة المادة يمكن إيجادها من العلاقة المباشرة الناتجة بين الكتلة الى حجم الجسم الصلب ووحدتها (g/cm³) ، للأجسام السيراميكية غير المسامية هناك قيمة كثافة واحدة كونها تمتلك وزن واحد وحجم واحد . اما الأجسام السيراميكية المسامية فلها عدة تعبيرات للكثافة كونها تمتلك وزن واحد و حجوم مختلفة . وعلى هذا الاساس يمكن تقسيم الكثافة للأجسام السيراميكية المسامية الى [58] :

1- الكثافة الحقيقية True Density وتشير فقط للمادة الصلبة في الجسم من دون وجود أية مسامية ، حيث هي نسبة الكتلة الى حجم المادة الحقيقي والمتضمن حجم الجسم الصلب فقط.

- 2- الكثافة الظاهرية Apparent Density هي نسبة الكتلة الى حجم الجسم الظاهري للمادة الذي يمثل (الجزء الصلب + المسامات المغلقة) .
- 3- الكثافة الكلية تعبر عن نسبة الكتلة الى الحجم الكلي الذي يمثل (الجزء الصلب + المسامات المفتوحة + المسامات المغلقة) .
- ولذا تم حساب الكثافة الظاهرية حسب ASTM Standard (C373-88) وذلك بعد حساب الحجم الظاهري (Exterior Volume) [39] :

$$V_e = (M - S) / \rho_w \dots\dots\dots(22)$$

حيث ان :

V_e : الحجم الظاهري (cm^3) .

ρ_w : كثافة الماء ($1g/cm^3$) .

اما الكثافة الظاهرية التي هي نسبة الوزن الجاف الى الحجم الظاهري وبذا تعد إشارة الى الكثافة الظاهرية للجسم فتحسب من المعادلة التالية :

$$\text{Bulk Density} = D / V_e \dots\dots\dots(23)$$

حيث ان :

Bulk Density : الكثافة الظاهرية (g/cm^3) .

2-8-3 الفحوصات الميكانيكية (Mechanical Tests)

لغرض تقييم خواص المقاومة للمادة فقد أجريت مجموعة اختبارات ميكانيكية على النماذج قبل وبعد اجراء عملية الترشيح وهي كما يلي :

1-2-8-3 مقاومة الانضغاط Compressive Strength

تعد مقاومة الانضغاط مؤشراً لمقاومة المادة ضد القوى الميكانيكية ، حيث تعد مقاومة الانضغاط عالية لمعظم المواد السيراميكية لذا فهي تتطلب آلات ميكانيكية او هيدروليكية لإجراء الفحص اللازم بحيث يكون الحمل المسلط حملاً محورياً على النموذج. وقد تكون النماذج المستخدمة مستطيلة او مكعبة او اسطوانية الشكل . عند اجراء هذا الفحص للأجسام السيراميكية تتطلب ان يكون طول النموذج ضعف قطره أي ان ($h = 2d$) وذلك لتقع المقاومة ضمن الحدود المسموح بها وذلك بالاستناد الى المواصفة القياسية ASTM Standard (C773-88) .

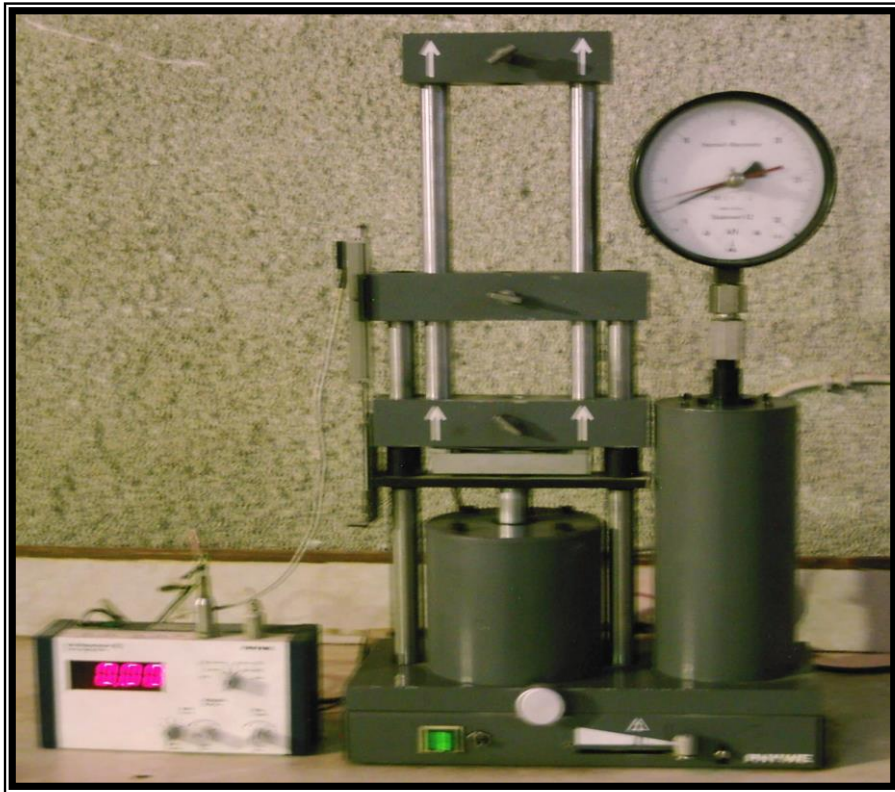
تم قياس مقاومة الانضغاط للمادة باستعمال ماكينة الاختبارات العامة المبينة بالشكل (7-3) ، و بعد تهيئة النماذج كما في الشكل (8-3) حيث يتم تسليط قوة على النموذج الذي يوضع بين فكي المكبس الهيدروليكي ويغطى سطح النموذج من الأعلى والأسفل بقطعتي

خشب رقيقتين سمك كل واحدة منهما (3mm) لأجل ضمان سطوح متوازية أثناء الاختبار. وتحسب مقاومة الانضغاط من المعادلة التالية [59]:

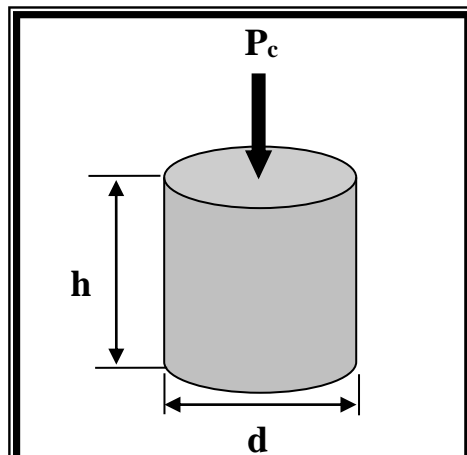
$$\text{Compressive Strength} = P_c / A \dots\dots\dots(24)$$

حيث ان :

- . Compressive Strength: مقاومة الانضغاط (MPa) .
- . P_c : الحمل المسلط حتى الكسر (N) .
- . A : مساحة مقطع النموذج (mm) .



الشكل (7-3) ماكينة الاختبارات العامة



الشكل (8-3) النموذج المستعمل في اختبار الانضغاط

2-2-8-3 مقاومة الانحناء Bending Strength

إن فحص الانحناء يستخدم لإيجاد المقاومة وبيان خواص التشوه للجسم تحت تأثير الحمل المسلط في مركز الجسم المسند عند حافتيه كما في الشكل (9-3) ، ويحسب معامل الكسر عند اجهاد الانحناء ذي الحمل الأعلى وبمعدل تحميل منتظم حتى حصول الكسر [60] .

تم استخدام ماكينة الاختبارات العامة المبينة في الشكل (7-3) في اجراء الاختبار . وبعد قراءة أعلى حمل يفشل فيه النموذج حسبت مقاومة الانحناء بالاستناد الى ASTM Standard (C674-88) من المعادلة التالية [61] :

$$\text{Bending Strength} = (3P_f * L) / (2W * t^2) \dots\dots\dots(25)$$

حيث ان :

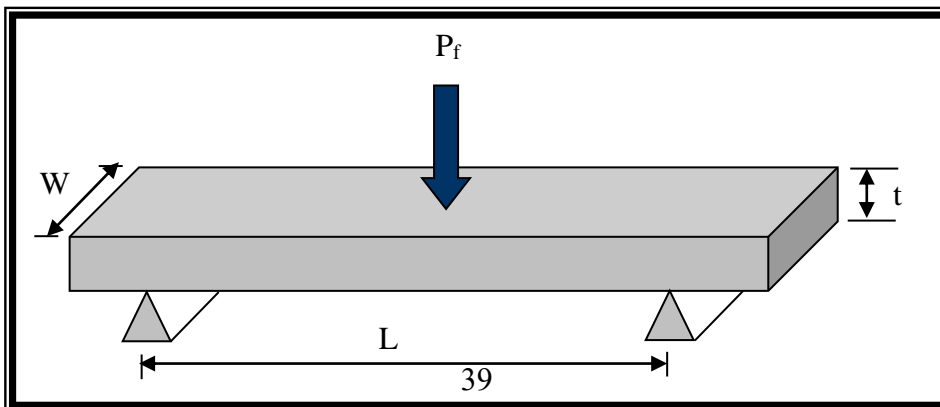
Bending Strength : مقاومة الانحناء (MPa) .

P_f : الحمل المسلط حتى الكسر (N) .

L : المسافة بين المساند (mm) .

W : عرض النموذج (mm) .

t : سمك النموذج (mm) .



الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

Results and Discussion

(Introduction) 1-4 المقدمة

يمثل هذا الفصل عرض النتائج التي تم التوصل إليها أثناء الدراسة الحالية ومناقشتها ، حيث تم اجراء مجموعة من الاختبارات الفيزيائية والكيميائية على النماذج السيراميكية المسامية قبل اجراء عملية الترشيح وبعدها ومعرفة مدى التحسن الحاصل في الخواص الناتجة بعد الترشيح وهذه النتائج هي ماسيتم عرضها في هذا الفصل ومناقشة أسبابها حيث يعرض هذا الفصل نتائج :

أولا : الخواص الفيزيائية .
 ثانيا : الخواص الميكانيكية .
 ثالثا : الفحص المجهرى .

2-4 الخواص الفيزيائية (Physical Properties)

1-2-4 المسامية الظاهرية (Apparent Porosity)

تم حساب المسامية الظاهرية باستخدام طريقة ارخميدس واستخراج قيمها باستخدام المعادلة (21) وان كل نتيجة تمثل معدل لثلاثة نماذج . الجدول (1) في ملحق النتائج يمثل قيم المسامية الظاهرية للعينات المشكلة يدويا ، والجدول (2) يمثل قيم المسامية الظاهرية للعينات المكبوسة .

الشكل (1-4) يمثل تأثير النسبة المئوية لمادة الاضافة (نشارة الخشب) على نسبة المسامية الظاهرية للعينات المشكلة يدويا قبل وبعد اجراء عملية الترشيح ، والشكل (d1-4) يمثل مجموع الاشكال (c,b,a) .

اما الشكل (2-4) يمثل تأثير النسبة المئوية لمادة الاضافة (نشارة الخشب) على نسبة المسامية الظاهرية للعينات المصنعة بالكبس قبل وبعد اجراء عملية الترشيح ، والشكل (d2-4) يمثل مجموع الاشكال (c,b,a) .

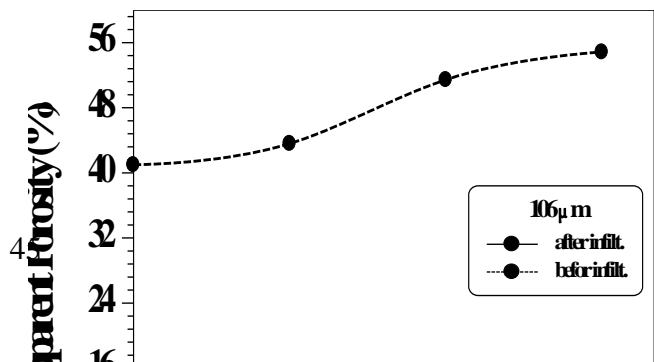
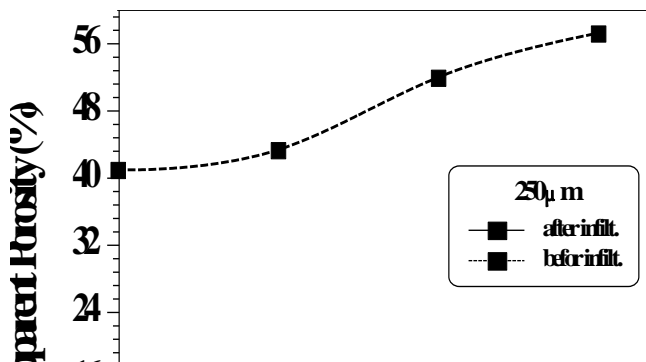
الاشكال (c,b,a1-4) تبين ارتفاع المسامية الظاهرية بزيادة نسبة الاضافة من مادة نشارة الخشب ولكل حجم حبيبي مستخدم للعينات المشكلة يدويا ، اذ ان وجود المواد المتطايرة مع الأطيان او المواد التي تتحلل بتأثير درجة الحرارة فتحرر غازات فانها تترك أماكنها فارغة وبهذا تزداد المسامية ، حيث انها تتأثر بشكل الحبيبات والمقاس الحبيبي والتدرج الحبيبي لها [37] .

الحجم الحبيبي لنشارة الخشب له تأثير واضح على نسبة المسامية الظاهرية ، اذ بزيادة الحجم الحبيبي تزداد المسامية وهذا مايمكن ملاحظته من الشكل (d1-4) حيث ان الحجم الحبيبي الكبير اعطى مسامية اعلى من الحجم الحبيبي الصغير، فعلى سبيل المثال بلغت نسبة المسامية عند حجم حبيبي (106µm) لنشارة الخشب ما قيمته (41.654%) في حين ارتفعت المسامية الى (48.169%) عند زيادة الحجم الحبيبي الى (425µm) ولنفس نسبة الاضافة في العينات المكبوسة ، وهذا يعود الى ان مساحة التلامس السطحية بين

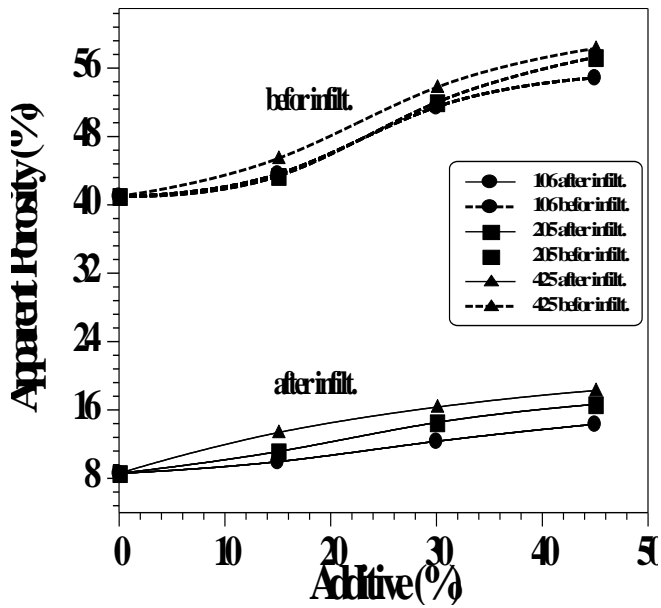
الحبيبات صغيرة الحجم تكون اكبر من مساحة التلامس السطحية بين الحبيبات كبيرة الحجم ، ومن ثم فان الحبيبات الصغيرة تنتج عدد اكبر من نقاط الالتقاء والتماس وبالتالي نحصل على مسامية منخفضة نسبيا بعد اجراء عملية الحرق واحتراق نشارة الخشب وخروجها بشكل غازات تاركة مكانها فراغات .

الشكل (2-4) نلاحظ انه يسلك سلوك مشابه لما موجود في الشكل السابق ، حيث تزداد المسامية الظاهرية بزيادة كل من نسبة مادة الاضافة (نشارة الخشب) وحجمها الحبيبي ، ولكن عند مقارنة الشكلين نجد فرقا في قيم المسامية الناتجة باختلاف عملية التصنيع لكل نسبة وحجم حبيبي لنشارة الخشب ، قيمة المسامية الناتجة عن استخدام طريقة التشكيل بالقولبة اليدوية هي اعلى من المسامية الناتجة عن استخدام طريقة التشكيل بالكبس . فمثلا بلغت النسبة المئوية للمسامية عند استخدام طريقة التشكيل اليدوي (40.99%) في حين بلغت النسبة المئوية للمسامية (29.892%) عند استخدام طريقة الكبس لنفس الخلطة ومن دون اضافة . هذا يعود الى انخفاض قيمة الضغط المستخدم في عملية التشكيل اليدوي ، اما في عملية الكبس فقد استخدم ضغط كبس عال نسبيا بالمقارنة مع الطريقة السابقة اذ بلغ ضغط الكبس المستخدم (26MPa) ، وان الضغط العالي في عملية التشكيل ينتج عنه رص الحبيبات بصورة اكبر ومن ثم انخفاض المسامية الكلية بشكل واضح ، اذ تعتمد المسامية على طريقة التشكيل المستخدمة ومن ثم امكانية تكون القنوات والفجوات داخل الجسم بسبب تحرر الغازات [66,65] .

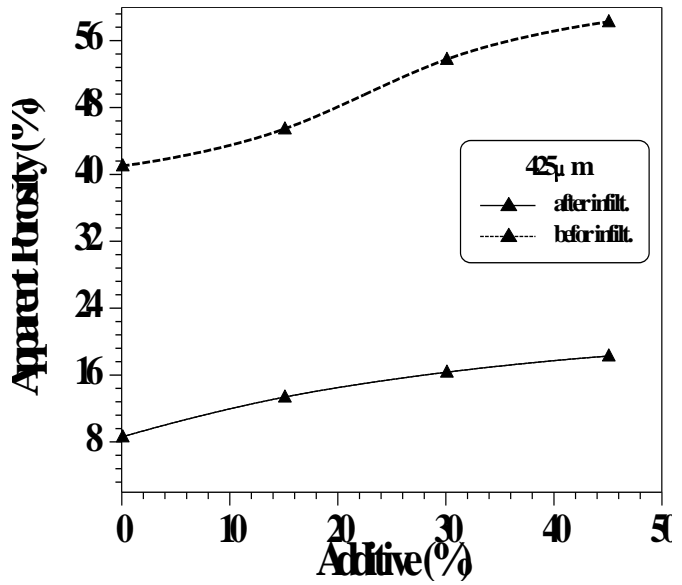
عند غمر النماذج السيراميكية في المادة البوليمرية وإجراء عملية الترشيح وتشبعها بالمادة الراشحة ، نلاحظ انخفاض المسامية الكلية بشكل كبير عن قيمها قبل الترشيح ، وذلك يعود الى تغلغل المادة البوليمرية في مسامات الهيكل السيراميكي ، حيث وجد ان اعلى مسامية بعد الترشيح هي اقل بكثير من اقل مسامية قبل الترشيح مع ملاحظة بقاء نسبة مسامية حتى وان كانت منخفضة حيث وجد ان زيادة نسبة المسامية قبل الغمر لم تؤدي الى ترشيح نسبة اكبر من البوليمر وبالتالي غلق المسامية بشكل تام بعد الغمر ناهيك من ان الزيادة في المسامية يؤدي الى إضعاف البنية ومن ثم خفض الخواص الميكانيكية . المسامية النهائية للعينات بعد اجراء عملية الترشيح تعطي دلالة واضحة على ملء المسامات من قبل البوليمر وبالتالي مدى تأثيره على الخواص الميكانيكية للمادة الناتجة ، حيث ان المسامية على ارتباط وثيق مع خواص الجسم الاخرى اذ بارتفاع نسبتها تنخفض قوة تحمل الجسم بشكل عام [64] .



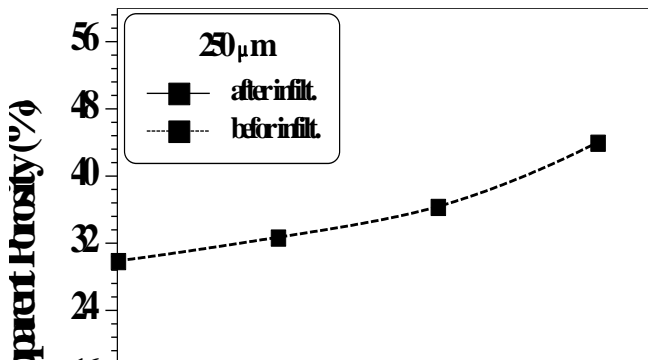
-b-



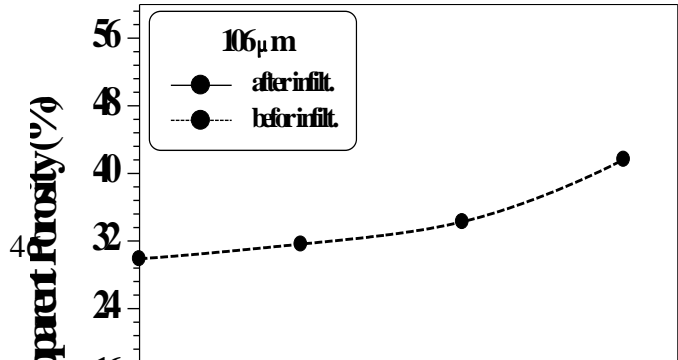
-a-



-d-

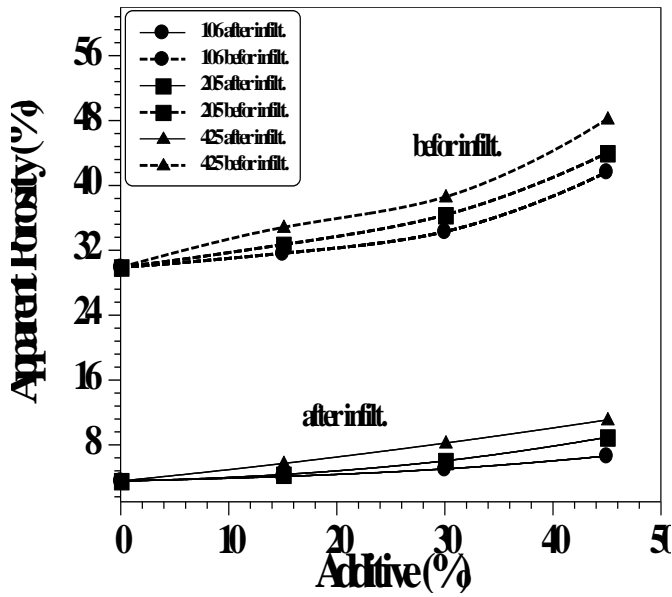


-c-

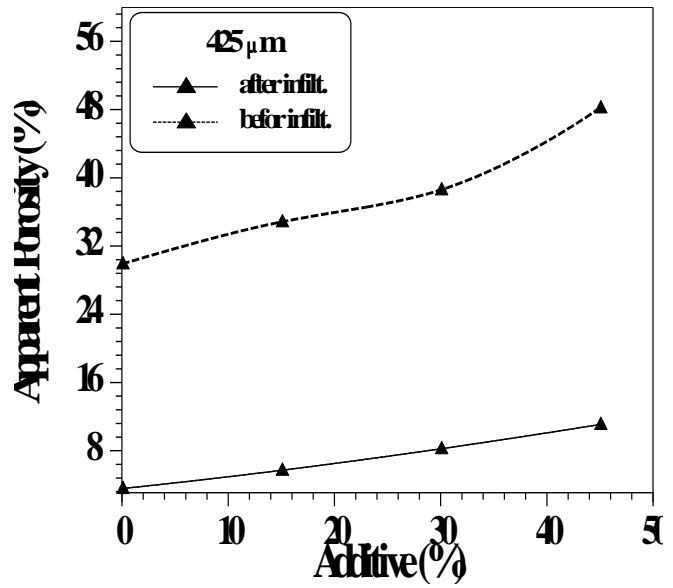


الشكل (4-1) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على المسامية الظاهرية للعينات المشكلة يدويا
 - a عند حجم حبيبي (106µm) ، -b عند حجم حبيبي (250µm) ، -c عند حجم حبيبي (425µm) ، -d مجموع الاشكال (a,b,c) .

-b-



-a-



-d-

-c-

الشكل (2-4) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على المسامية الظاهرية للعينات المكبوسة
 -a عند حجم حبيبي (106µm)، -b عند حجم حبيبي (250µm)، -c عند حجم
 حبيبي (425µm)، -d مجموع الاشكال (c,b,a).

الكثافة (Density) 2-2-4

تم حساب كثافة العينات السيراميكية وبيان تأثير عملية الترشيح عليها ، والجدول (3) في ملحق النتائج يبين قيم الكثافة للعينات السيراميكية المشكلة يدويا ، الجدول (4) في

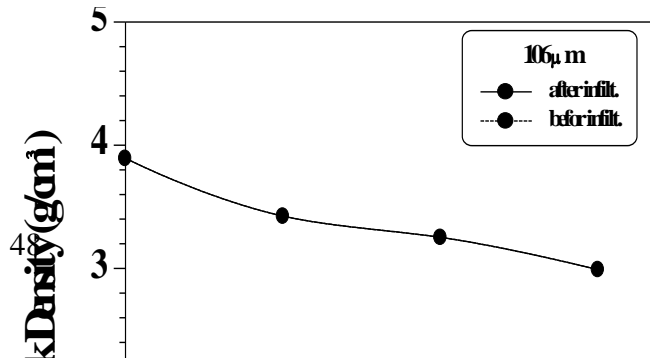
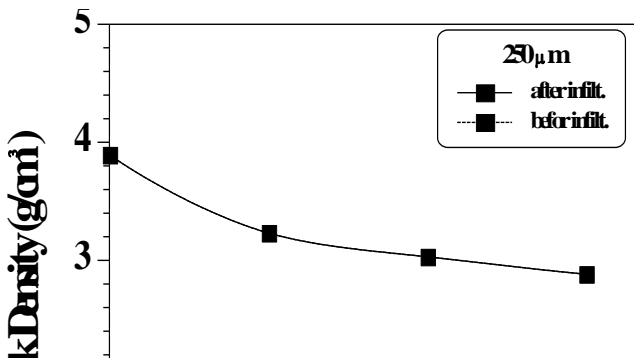
ملحق النتائج يبين قيم الكثافة للعينات السيراميكية المكبوسة ، وان كل نتيجة تمثل معدل لثلاثة نماذج .

الشكل (4-3) يبين تأثير نسبة مادة الاضافة من نشارة الخشب على تغير كثافة الجسم السيراميكي قبل عملية الترشيح وبعدها للعينات المشكلة يدويا ولكل حجم حبيبي مستخدم ، اما الشكل (4-4) فهو يبين تأثير نسبة مادة الاضافة من نشارة الخشب على تغير كثافة الجسم السيراميكي قبل عملية الترشيح وبعدها للعينات المكبوسة ولكل حجم حبيبي مستخدم .

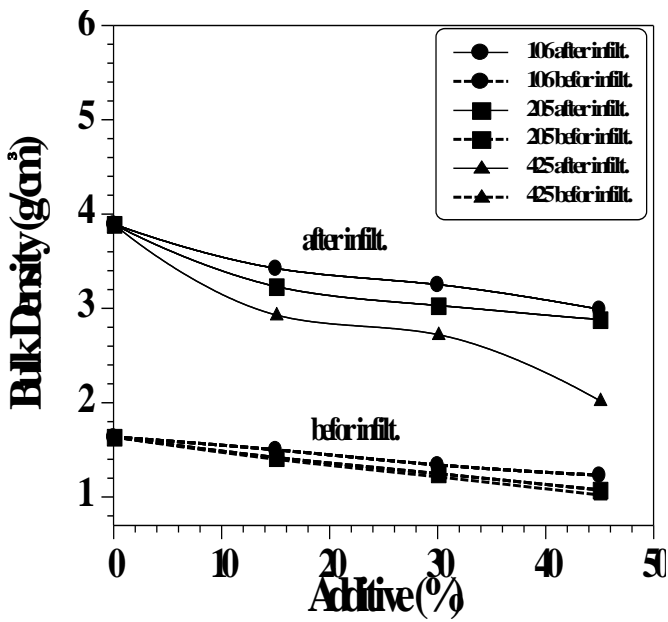
الشكلان المذكوران اعلاه يوضحان تغير قيمة الكثافة مع زيادة نسبة نشارة الخشب وتغير الحجم الحبيبي لها للنماذج المحروقة ، حيث تنخفض كثافة العينات السيراميكية بزيادة نسبة الاضافة كما تنخفض الكثافة بزيادة الحجم الحبيبي للنشارة نتيجة تكون مسامية عالية اذ انها تتغير أي الكثافة مع نسبة المسامات .

من العوامل المؤثرة بشكل واضح على الكثافة هي طريقة التصنيع المتبعة ، اذ أن الكثافة تعد دالة لعملية التصنيع . ومن الشكلين المذكورين اعلاه يمكن ملاحظة الفرق في الكثافة بين طريقتي التصنيع المتبعين ، اذ تكون الكثافة في النماذج المشكلة يدويا اقل من كثافة النماذج المكبوسة ، ويعود ذلك الى رص الحبيبات المكونة للنماذج . حيث ان استخدام الكبس شبه الجاف يساعد على رص الحبيبات اكثر مما في القولية اليدوية اذ يكون الضغط المستخدم فيها قليل . ان زيادة الكثافة ينتج عنها انخفاض في المسامية ، حيث تتعلق الكثافة بالمقاسات الحبيبية وظروف الإنتاج من طريقة التصنيع وضغط كبس مستخدم أثناء التشكيل ، العامل الآخر الذي يخفض الكثافة هو تحرر الغازات الناتجة من تحلل المواد العضوية المضافة الى الجسم السيراميكي او تحرر الماء البلوري للمواد الاولية اذ تسبب زيادة المسامية وخفض كثافة النماذج [67] .

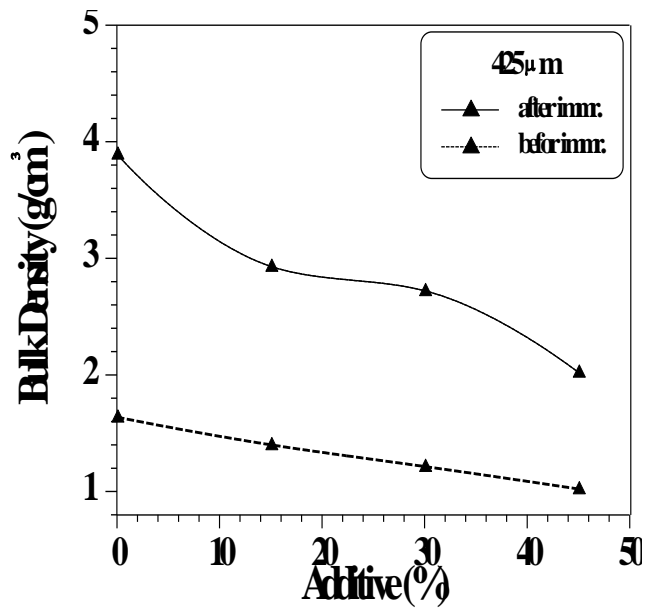
بعد اجراء عملية الترشيح نلاحظ زيادة في الكثافة بشكل واضح لكلا طريقتي التصنيع المستخدمتين ، حيث تم اضافة وزن إضافي إليها بحجم ثابت نتيجة ملاء الفراغات من قبل المادة البوليمرية الراشحة والتي أدت الى زيادة ملحوظة في الخواص الميكانيكية لان الكثافة العالية تزيد من قوة تحمل الجسم للصدمات و الاجهادات الخارجية [68] .



- b -



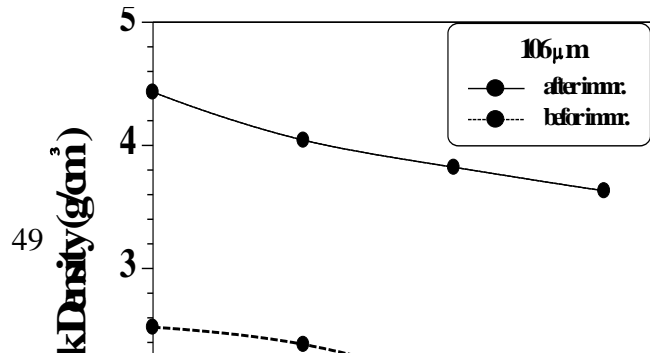
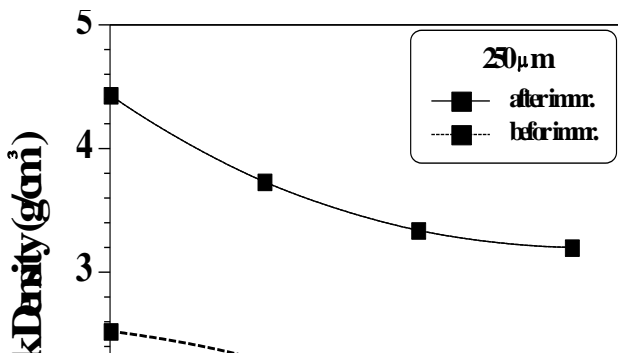
- a -

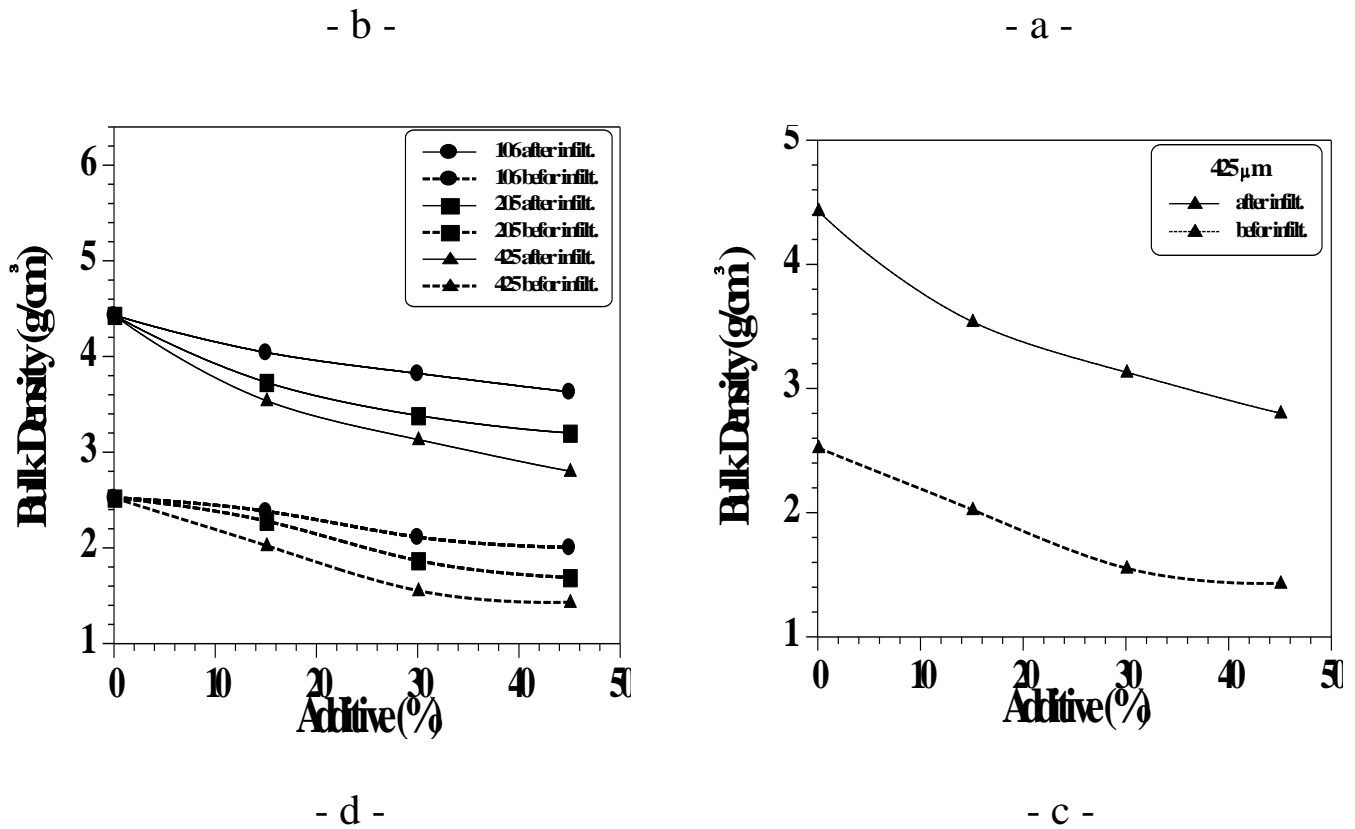


- d -

- c -

الشكل (3-4) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على الكثافة للعينات المشكلة يدويا
 - a عند حجم حبيبي (106µm) ، - b عند حجم حبيبي (250µm) ، - c عند حجم حبيبي
 (425µm) ، - d مجموع الاشكال (c,b,a) .





الشكل (4-4) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على الكثافة للعينات المكبوسة
 - a - عند حجم حبيبي (106μm) ، - b - عند حجم حبيبي (250μm) ، - c - عند حجم
 حبيبي (425μm) ، - d - مجموع الاشكال (c,b,a) .

الجدول (1-4) يبين الفرق بين كثافة النماذج قبل وبعد الغمر . الجدول يشير من الناحية العملية الى مقدار المادة البوليمرية التي تغلغلت داخل الجسم السيراميكي . من الجدول لايمكن ملاحظة توجهات لتغلغل المادة البوليمرية مع نسبة المادة المضافة من نشارة

الخشب ، ولكن هناك مؤشرات المادة المتغلغلة نسبة لحجم المادة المضافة والتي تعطي مؤشراً الى حجم الفجوات في الجسم المسامي . عموماً يمكن ملاحظة ان المادة السيراميكية التي تمتلك فجوات اصغر كالمصنعة بواسطة الكبس حيث قوة الكبس تعطي تراص اكثر لجزيئات الطين من القولية اليدوية ، ان الفجوات الأصغر تعطي كمية اكبر من التغلغل كما تبين الأرقام وذلك في النماذج المصنعة بدون نسبة اضافة من نشارة الخشب ولكلا الطريقتين المستخدمتين في التصنيع . طريقة الكبس اعطت عموماً كميات تغلغل اقل من الطريقة اليدوية ولجميع الخلطات عند مقارنة حجم الفجوات الناتجة مع حجم المادة المضافة نجد ان الكمية المتغلغلة للبوليمر اكبر في حجم الفجوات الصغيرة منها في الحجم الحبيبي الوسط والحجم الوسط اكبر من الحجم الحبيبي الكبير ولكلا الطريقتين مما يتيح التوقع بان المادة البوليمرية يمكن ان تتغلغل اكثر كلما كانت المسامات اصغر .

الجدول (1-4) الفرق بين كثافة النماذج قبل وبعد الغمر

فرق الكثافة للعينات المكبوسة (g/cm ³)	فرق الكثافة للعينات المشكلة يدويا (g/cm ³)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
1.909	2.256	0	106
1.659	1.924	15	
1.709	1.912	30	
1.627	1.758	45	
1.451	1.813	15	250
1.472	1.782	30	
1.511	1.808	45	
1.515	1.53	15	425
1.578	1.508	30	
1.37	1	45	

3-2-4 التقلص الطولي (Linear Shrinkage)

يعطي التقلص الطولي مؤشراً هاماً الى التغيرات الفيزيائية والكيميائية الحاصلة أثناء الحرق [69] ، تم حساب التقلص الطولي للنماذج السيراميكية بقياس أبعادها قبل عملية التليد وبعدها وحسب المعادلة (20) ، الجدول (5) في ملحق النتائج يمثل قيم التقلص

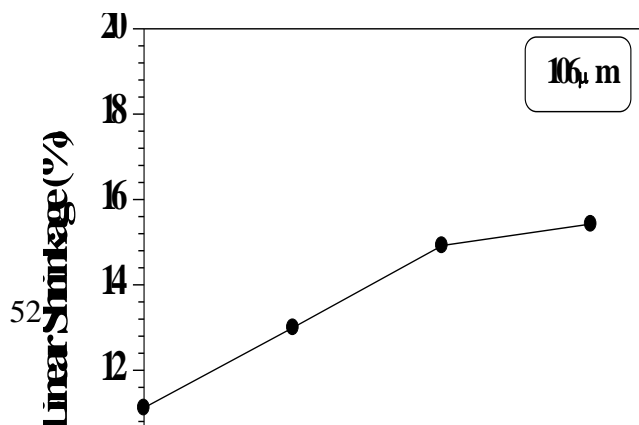
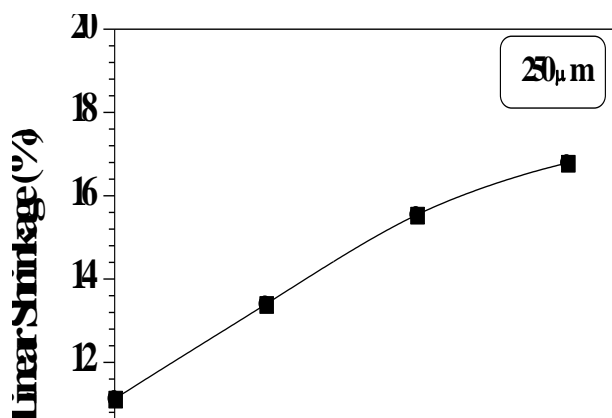
الطولي للعينات المشكلة يدويا ، والجدول (6) يمثل قيم التقلص الطولي للعينات المكبوسة، وان كل قيمة او نتيجة هي معدل لثلاثة نماذج .

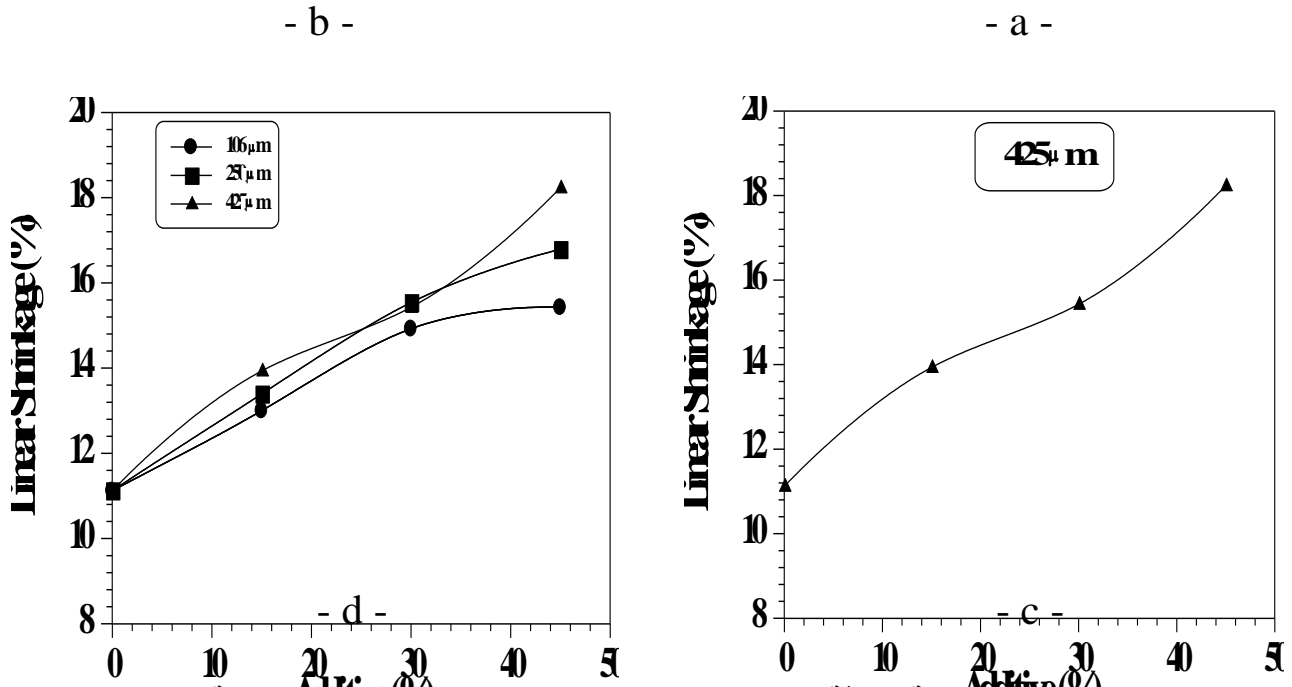
الشكل (4-5) يمثل العلاقة بين نسبة مادة الاضافة من نشارة الخشب والتقلص الطولي للعينات المشكلة يدويا ولكل حجم حبيبي ، و الشكل (4-6) يمثل العلاقة بين نسبة مادة الاضافة من نشارة الخشب والتقلص الطولي للعينات المكبوسة ولكل حجم حبيبي . المنحنيات تمثل النتائج قبل عملية الترشيح وبعدها .

من ملاحظة الاشكال المذكورة اعلاه نجد حدوث تقلص في أبعاد العينات السيراميكية ، حيث تمتلك المواد السيراميكية عموما بعد الحرق تقلص في أبعادها بسبب عملية التليد وتكون الأطوار السائلة وتقارب الجزيئات مع بعضها البعض [69] . ويزداد هذا التقلص بزيادة نسبة المادة المضافة من نشارة الخشب وزيادة الحجم الحبيبي لها ، اذ تحتوي نشارة الخشب على نسبة من الاكاسيد القلوية التي تعمل على تكوّن الطور الزجاجي بشكل اكبر كلما تواجدت بنسب اعلى والأطوار الزجاجية بدورها تزيد من التقلص الذي يعتمد مقداره على عدة عوامل منها طبيعة المادة وتركيبها ، مقاس الحبيبات وتدرجها ، ضغط التشكيل، نسبة ماء التشكيل وكذلك درجة حرارة الحرق [70] .

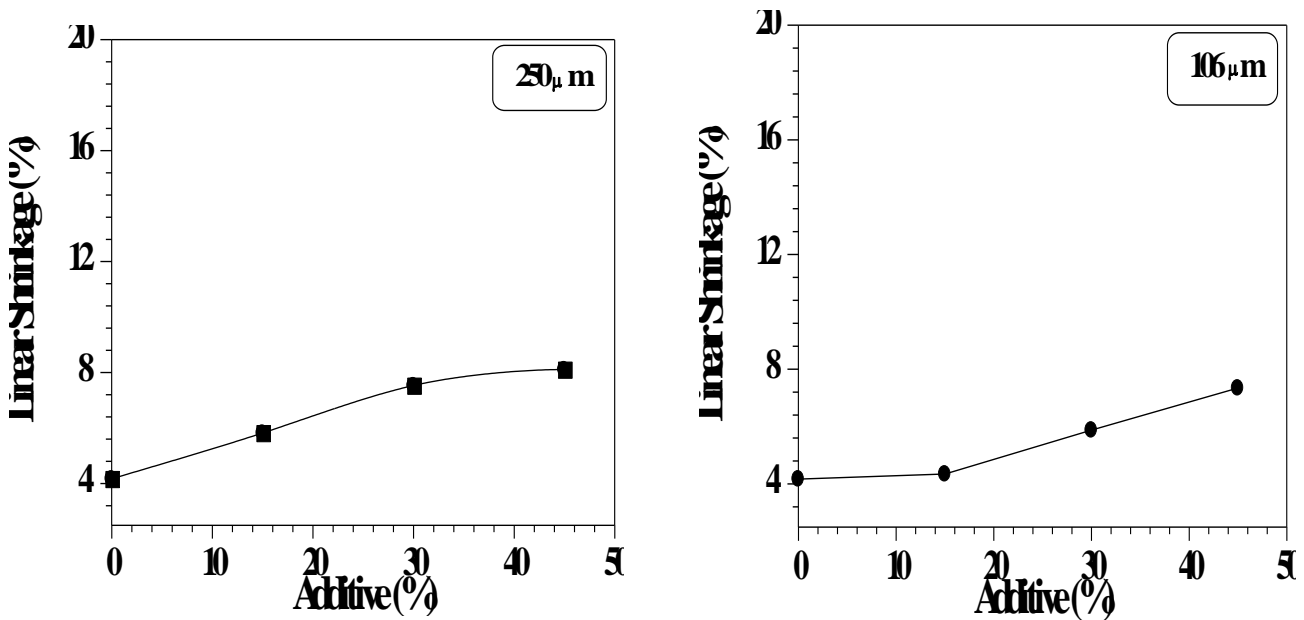
بالعودة الى الشكلين (4-5) ، (4-6) وبإجراء المقارنة بينهما نجد ان التقلص الطولي حدث بشكل اكبر في العينات المصنعة بطريقة القولية اليدوية مما هو عليه في العينات المصنعة بالكبس وذلك لارتفاع ماء التشكيل للأولى وانخفاض ماء التشكيل للثانية ، اضافة الى ذلك فان وجود الفجوات بكمية اكبر في النماذج المقولبة يدويا تجعل فرصة تقارب الجزيئات مع بعضها اكبر ومن ثم نجد ان التقلص بطريقة القولية يكون اكبر مما هو عليه بطريقة الكبس [71] .

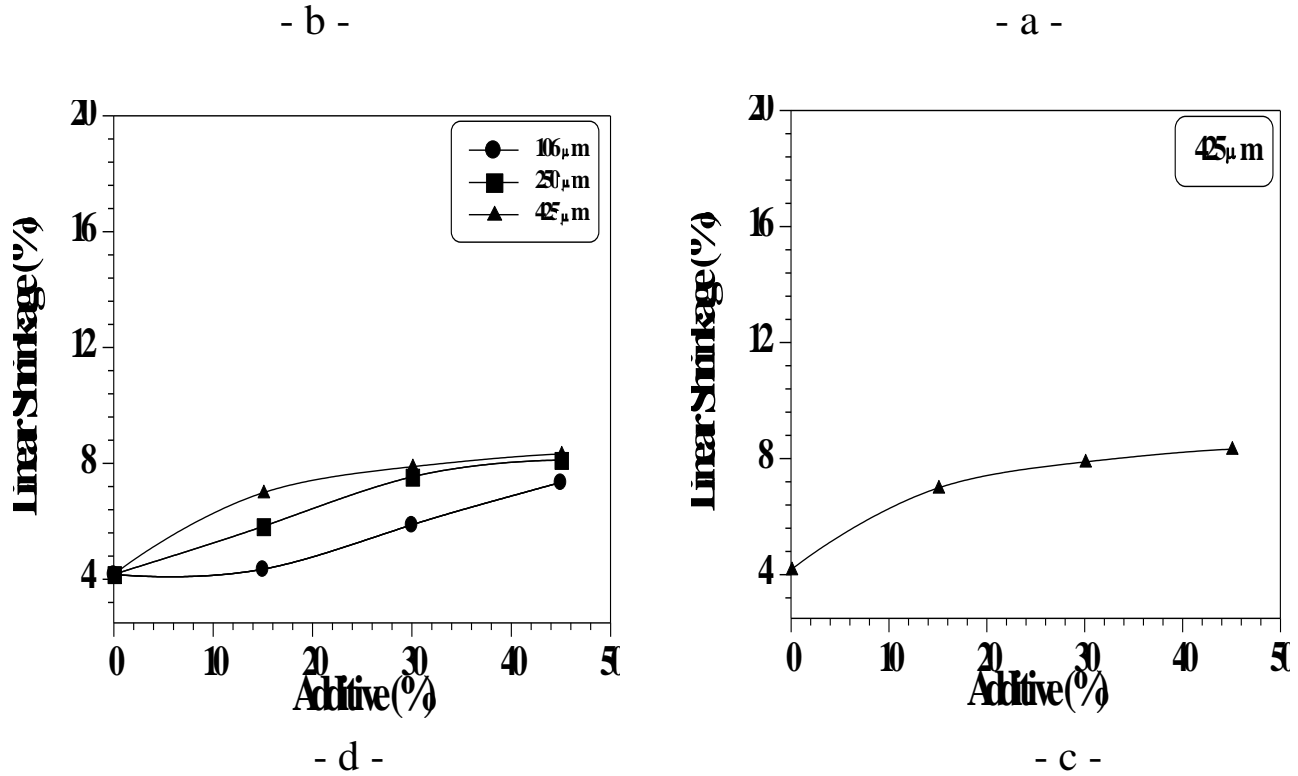
تم اجراء اختبار التقلص الطولي للعينات بعد اجراء عملية الترشيح وتغلغل المادة البوليمرية وقد وجد ان تغلغل البوليمر في مسامات الجسم السيراميكي لا يؤثر على تقلص النماذج لان النماذج قد اكتسبت مقاومتها وبنائها الداخلي بعد اجراء عملية التليد وبالتالي لم يظهر أي تغير في قيم التقلص الطولي بعد الترشيح .





الشكل (5-4) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على التقلص الطولي (Additive (%)) لمشكلة يدويا
 - a عند حجم حبيبي (106 μm) ، - b عند حجم حبيبي (250 μm) ، - c عند حجم حبيبي (425 μm) ، - d مجموع الاشكال (a,b,c).





الشكل (4-6) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على التقلص الطولي للعينات المكبوسة
 - a عند حجم حبيبي (106µm) ، - b عند حجم حبيبي (250µm) ، - c عند حجم
 حبيبي (425µm) ، - d - مجموع الاشكال (a,b,c).

3-4 الخواص الميكانيكية (Mechanical Properties)

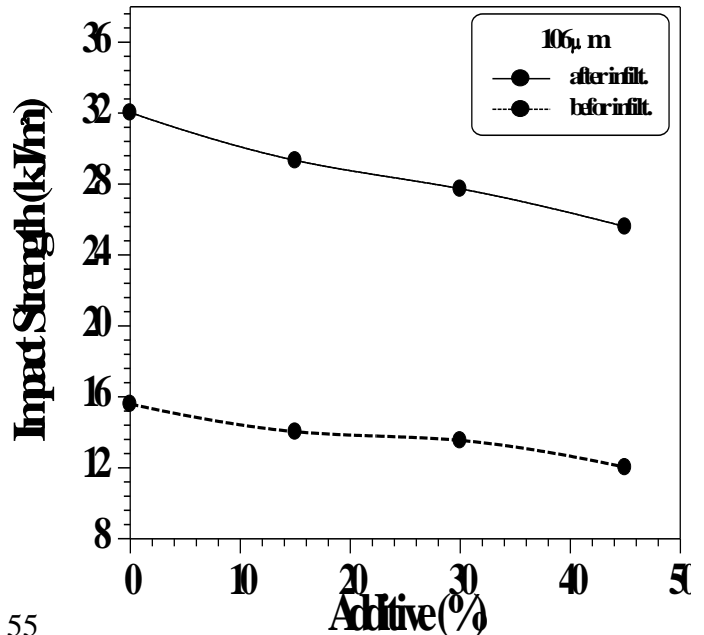
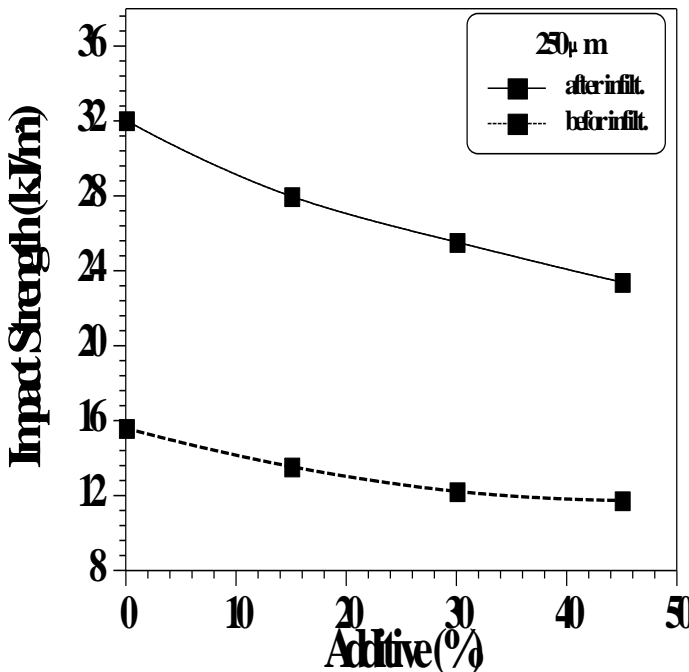
1-3-4 مقاومة الصدم (Impact Strength)

هذا الاختبار يمثل مقاسا لمتانة المادة وقدرتها على امتصاص الطاقة لغاية الكسر ، وهذه الصفة تمثل مؤشراً أساسياً في مدى صلاحية المادة لظروف الاستخدام .
 تم حساب مقاومة الصدم للنماذج بطريقة چاربي (Charpy) ، اذ يعبر عادة عن مقاومة الصدم بطاقة الكسر لوحدة مساحة المقطع العرضي للنموذج . الجدول (7) في ملحق النتائج يمثل قيم مقاومة الصدم للعينات المشكلة يدويا والجدول (8) يمثل قيم مقاومة الصدم للعينات المشكلة بالكبس ، وان كل قيمة او نتيجة هي معدل لثلاثة نماذج .
 الشكل (4-7) يمثل العلاقة بين مقاومة الصدم ونسبة مادة الاضافة من نشارة الخشب للعينات المشكلة يدويا لكل حجم حبيبي مستخدم قبل عملية الترشيح وبعدها .

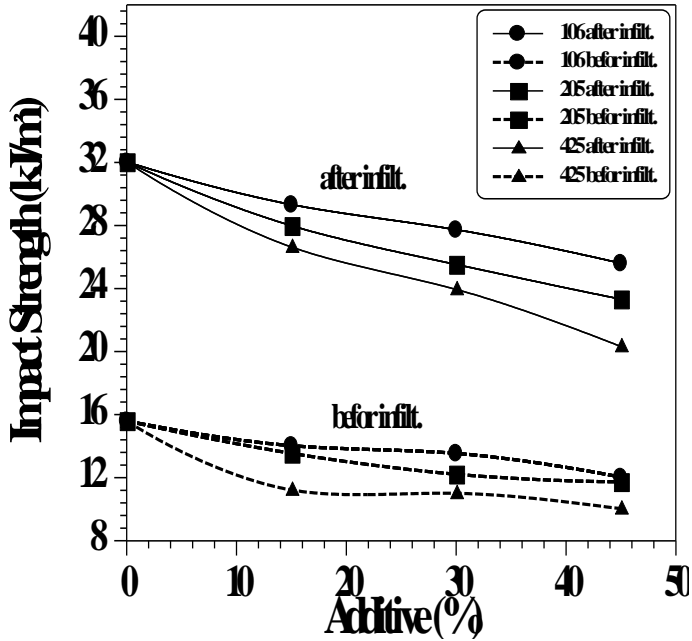
الشكل (4-8) يمثل العلاقة بين مقاومة الصدم ونسبة مادة الاضافة من نشارة الخشب للعينات المكبوسة لكل حجم حبيبي مستخدم قبل عملية الترشيح وبعدها .
 الشكل (4-7) والشكل (4-8) يبينان ان العينات السيراميكية تمتلك مقاومة صدم (والتي هي معيار لمتانة الكسر) منخفضة وذلك قبل اجراء عملية الترشيح ، حيث ان المواد السيراميكية عموماً تمتلك متانة كسر منخفضة بسبب انخفاض معدل تحرر طاقة الانفعال الحرج . فضلاً عن وجود المسامية بنسب كبيرة والتي تؤثر على معامل المرونة كما موضح في المعادلة (17) . إن وجود المسامية بنسبة كبيرة يعمل على تقليل متانة المادة من خلال تأثيرها كشقوق داخل المادة والتي تتقدم خلال المادة عند تعرضها لاجهاد صدم. من جهة اخرى نلاحظ أن اجراء عملية الترشيح أدت الى ارتفاع مقاومة الصدم للعينات السيراميكية ، فمن الواضح ان المادة البوليمرية المرشحة داخل الهيكل السيراميكي تتصرف كطور متمين تعمل على اعاقه تقدم الشق خلال المادة الاساس ولكن الانخفاض في سلوك المنحني مع تزايد نسبة الاضافة من نشارة الخشب هو نتيجة عدم امتلاء الفجوات بسبب مخلفات الحرق .

من ملاحظة الشكلين المذكورين اعلاه نجد ان هناك تأثيراً واضحاً لكل من نسبة حبيبات مادة الاضافة وحجمها على مقاومة الصدم للعينات السيراميكية قيد الدراسة ، حيث تنخفض مقاومة الصدم بزيادة كل من الحجم الحبيبي ونسبة الاضافة وبشكل تدريجي ولكلا طريقتي التشكيل المستخدمتين في تصنيع النماذج ، حيث ان استخدام حجم حبيبي صغير ونسبة اضافة قليلة أدت الى تكون مسامية بشكل اقل وهذا ما أوضحته الاشكال السابقة في اختبار المسامية ، مما يقلل من تواجد التشققات ومن ثم زيادة مقاومة الصدم ، حيث تعرف متانة الكسر بأنها الصفة الهندسية التي تصف مقاومة المواد لانتشار الشقوق والكسر [12] .

وبالعودة الى الشكلين ومن المقارنة بين طريقتي التصنيع نجد ان مقاومة الصدم للعينات المكبوسة اعلى من مقاومة الصدم للعينات المشكلة ، وهذا يعود الى تأثير طريقة التشكيل على تراص الحبيبات السيراميكية فيما بينها وبالتالي نسبة المسامية المتكونة بعد الحرق تكون اقل .

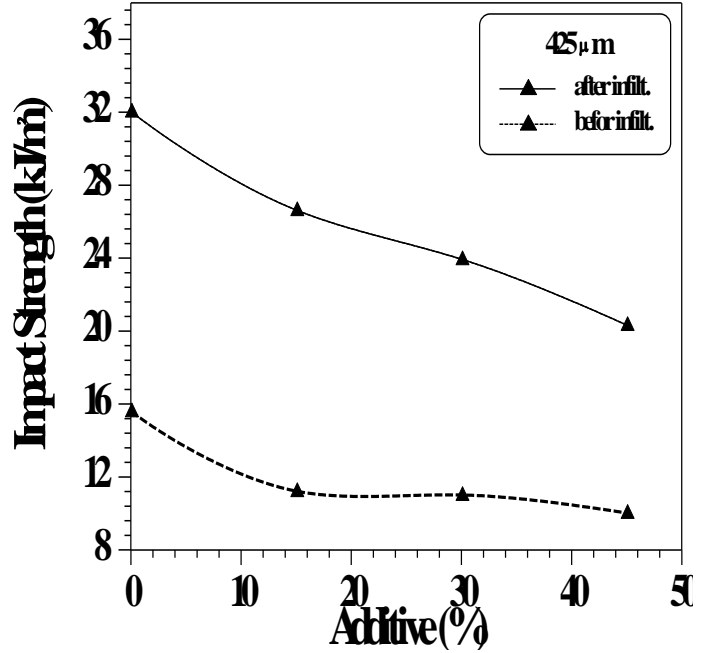


- b -



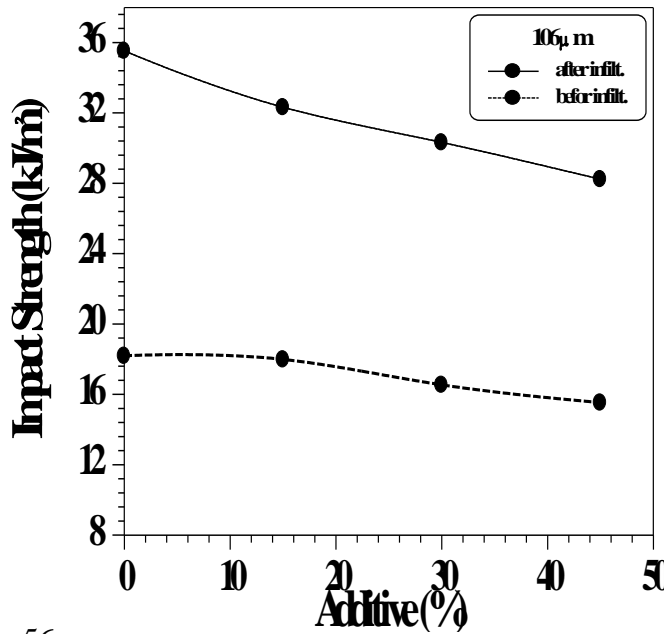
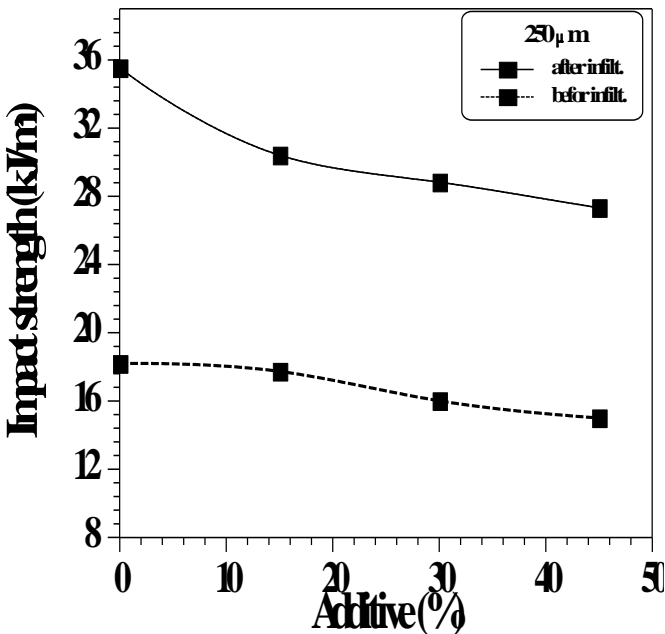
- d -

- a -



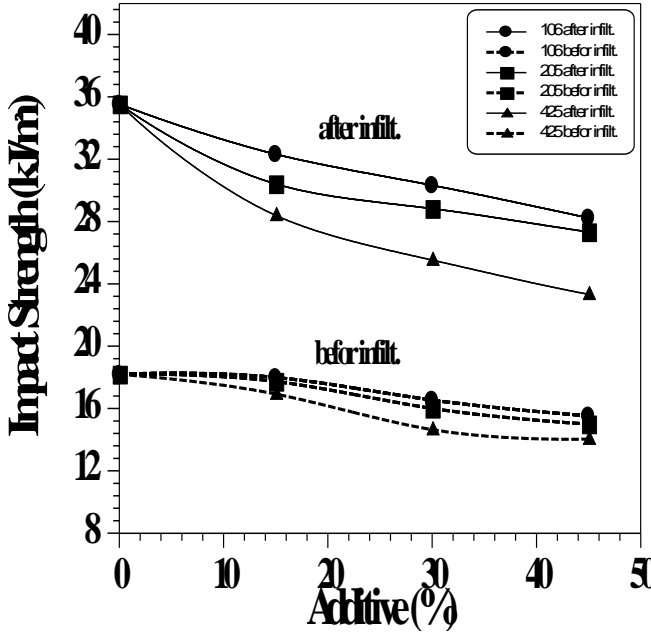
- c -

الشكل (7-4) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على مقاومة الصدم للعينات المشكلة يدويا
 - a عند حجم حبيبي (106µm) ، - b عند حجم حبيبي (250µm) ، - c عند حجم حبيبي (425µm) ، - d مجموع الاشكال (a,b,c).



- b -

- a -



- d -

- c -

الشكل (8-4) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على مقاومة الصدم للعينات المكبوسة .
 a - عند حجم حبيبي (106μm) ، b - عند حجم حبيبي (250μm) ، c - عند حجم
 حبيبي (425μm) ، d - مجموع الاشكال (c,b,a) .

2-3-4 مقاومة الانضغاط (Compressive Strength)

تعد مقاومة الانضغاط من الخواص الميكانيكية المهمة لوصف مقاومة المادة . تم حساب مقاومة الانضغاط للعينات السيراميكية قبل عملية الترشيح وبعدها ، والجدول (9) في ملحق النتائج يبين قيم مقاومة الانضغاط للنماذج السيراميكية المشكلة بالقولبة اليدوية ، اما الجدول (10) فيمثل قيم مقاومة الانضغاط للعينات السيراميكية المشكلة بالكبس وان كل قيمة هي معدل لثلاثة نماذج .

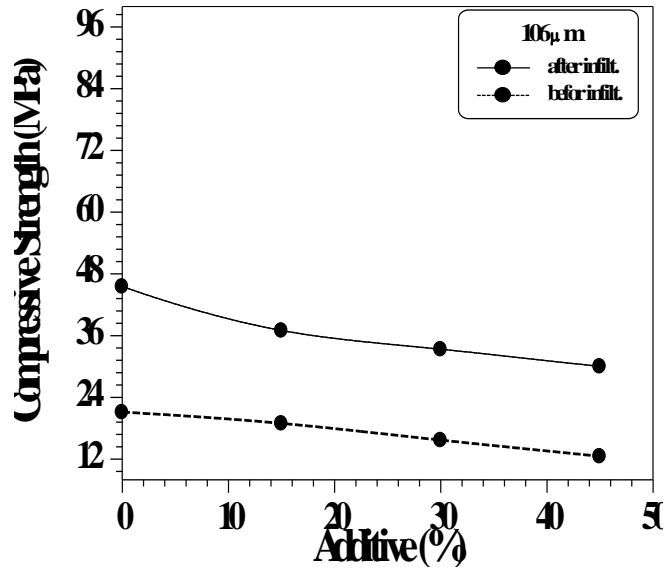
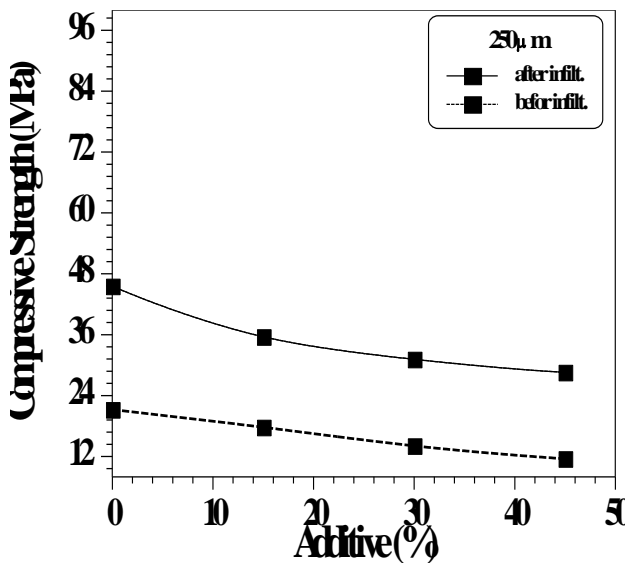
الشكل (9-4) يمثل العلاقة بين مقاومة الانضغاط ونسبة مادة الاضافة من نشارة الخشب للعينات المشكلة يدويا ولكل حجم حبيبي مستخدم قبل عملية الترشيح وبعدها .
 الشكل (10-4) يمثل العلاقة بين مقاومة الانضغاط ونسبة مادة الاضافة من نشارة الخشب للعينات المكبوسة ولكل حجم حبيبي مستخدم قبل عملية الترشيح وبعدها .

يوضح الشكلان (4-9) ، (4-10) تأثير زيادة نسبة الاضافة من النشارة على مقاومة الانضغاط حيث تنخفض المقاومة بزيادة نسبة الاضافة ، اما تأثير الحجم الحبيبي للنشارة فهو واضح على مقاومة المادة حيث ان زيادة الحجم الحبيبي تؤدي الى انخفاض المقاومة، وذلك يعود الى ان زيادة كل من نسبة مادة الاضافة والحجم الحبيبي لها تؤدي الى زيادة النسبة المئوية للمسامية المتكونة داخل العينات السيراميكية والتي بدورها تضعف مقاومة الأجسام ، لان نسبة المسامات العالية تؤدي الى خفض المساحة السطحية المعرضة للحمل المسلط مما يؤدي الى زيادة الإجهاد المسلط على المادة كما تعمل المسامات أحيانا كرافعات اجهاد والتي تركز الإجهاد في نقطة معينة ومن ثم حصول الفشل ، حيث تتأثر مقاومة الانضغاط بالعديد من العوامل المتداخلة التأثير منها وجود المواد المتطايرة التي عند خروجها تترك فراغات مسببة زيادة المسامية وتعمل على إضعاف مقاومة الانضغاط للنماذج او وجود المكونات المعدنية وكذلك درجة حرارة الحرق [72,73,74] .

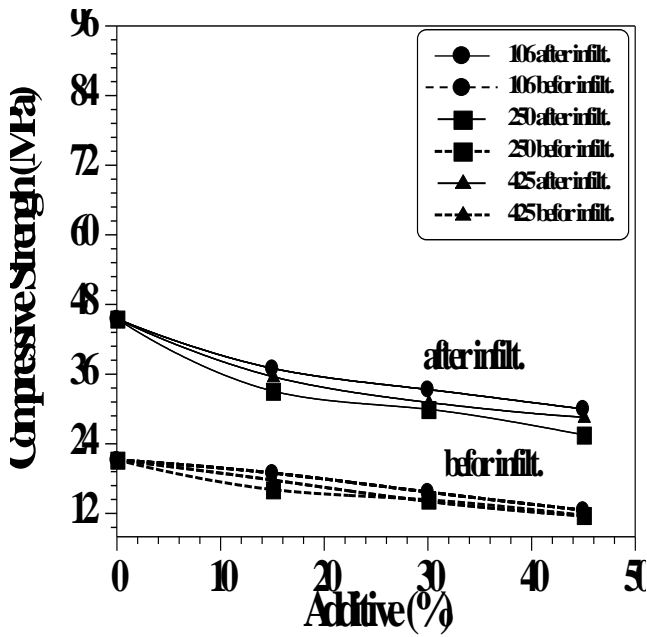
من ملاحظة الشكلين المذكورين اعلاه نجد ان قيمة مقاومة الانضغاط للنماذج المشكلة يدويا هي اقل مما هي عليه في النماذج المكبوسة ، وهذا يعود الى طبيعة عملية التشكيل وما ينتج عنها من خواص حيث نجد ان نسبة المسامية في العينات المشكلة يدويا هي اعلى من نسبة المسامية في العينات المكبوسة وكما مبين سابقا في اختبار المسامية ، حيث ان المسامية العالية تؤدي الى انخفاض نسبي في خاصية المقاومة . فيما يتعلق بالعينات المصنعة بالتشكيل يدويا فان مقاومة انضغاطها تتأثر بمحتوى ماء التشكيل للنماذج ، حيث تنخفض المقاومة بزيادة ماء التشكيل ويعود هذا الى ان زيادة محتوى الماء يؤدي الى زيادة حساسية الأطيان أثناء عملية التجفيف وما ينتج عنها من تقلص عالٍ وظهور التشققات ولاسيما عند السطح السفلي للنموذج ، حيث ان هذه التشققات تسبب انخفاض مقاومة الانضغاط [69] .

بعد اجراء عملية الترشيح نلاحظ ارتفاع مقاومة الانضغاط للعينات السيراميكية المرشحة بشكل ملحوظ ، وذلك يعود الى ان المادة البوليمرية المرشحة في مسامات النماذج عملت على ملئها فمن جهة أدت الى خفض المسامية بشكل كبير ومن ثم زيادة المساحة السطحية المعرضة للحمل المسلط أي زيادة مقاومة المادة ، ومن جهة اخرى فان المادة البوليمرية كونت وسادة داخل البنية المسامية تعيق انتشار التشققات (Crack Propagation) وتعزيز الترابط والتماسك بين جزيئات الجسم السيراميكي . هنا يظهر لنا جليا ان النماذج المخلوطة مع الحجوم الاقل من نشارة الخشب والتي تعطي عادة مسامات اصغر قد اعطت نتائج مقاومة اعلى من النماذج المخلوطة مع الحجوم الأكبر من نشارة الخشب وخاصة في النماذج المكبوسة . هنا يتأكد ما ذهبنا اليه في نتائج الكثافة حيث تبين ان النماذج ذات المسامية بحجم اصغر قد استوعبت كمية اكبر من المادة البوليمرية ، وبسبب كون الفجوات بحجم اصغر وفي داخلها كمية اكبر من البوليمر نتوقع ان جدران هذه الفجوات قد تبلل بمادة البوليمر اكثر من النماذج ذات المسامات الأكبر ان هذا التبلل يعني إعطاء تماسك اكبر للحبيبات السيراميكية مما انعكس ايجابيا على المقاومة عموما . هذا من ناحية اما الناحية الاخرى فان وجود نسبة عالية من الاضافات قد يخلف الكثير من المواد غير المتطايرة التي تبقى داخل الفوات ولا تسمح للبوليمر ان يدخل وهذا مما أدى

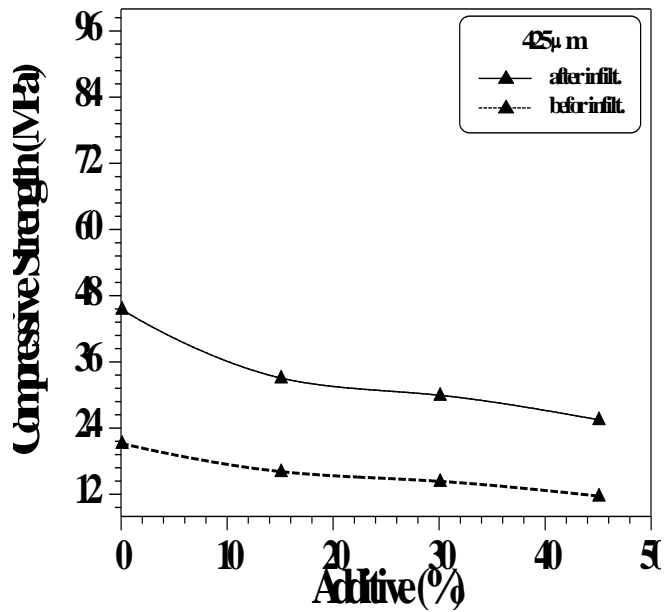
الى انخفاض كل من الكثافة ومقاومة الانضغاط مع زيادة نسبة نشارة الخشب وهذا يمكن ان يستدل عليه من خلال الفرق في الكثافة قبل الغمر وبعده .



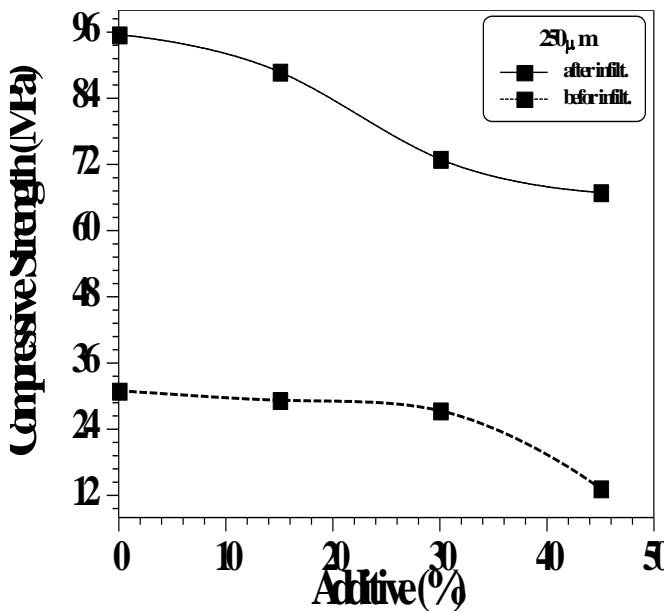
- b -



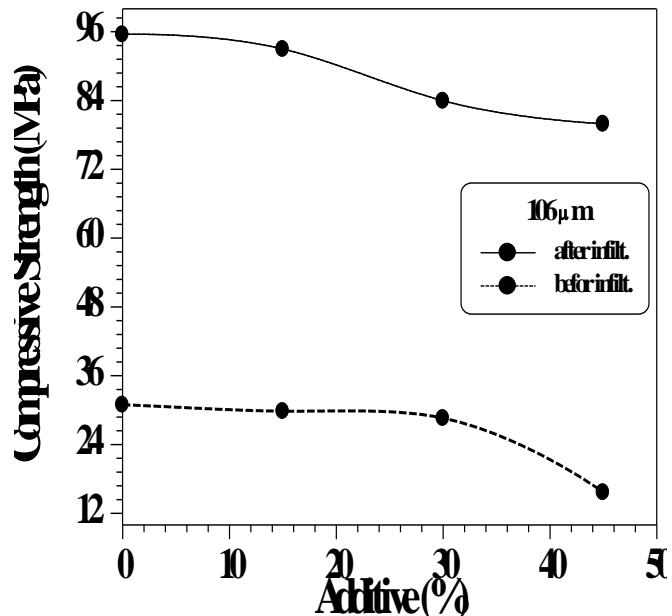
- a -



- d -

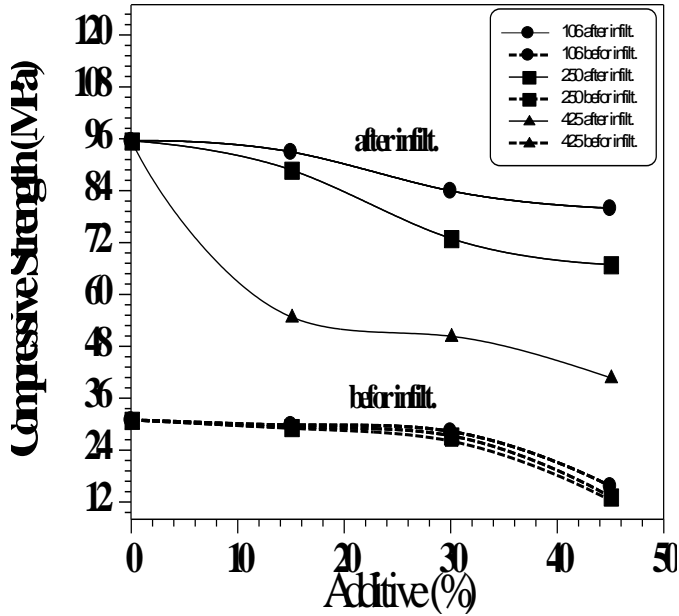


- c -

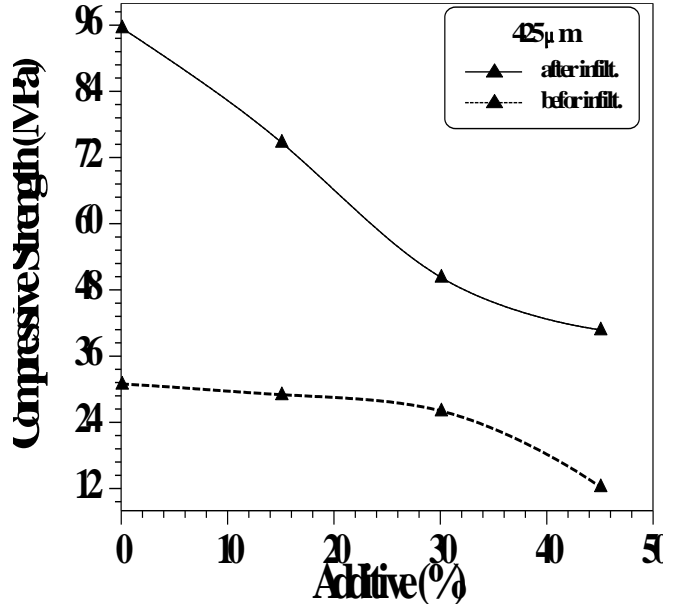


الشكل (4-9) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على مقاومة الانضغاط للعينات المشكلة يدويا
 - a عند حجم حبيبي (106µm) ، - b عند حجم حبيبي (250µm) ، - c عند حجم حبيبي (425µm) ، - d مجموع الاشكال (a,b,c) .

- b -



- a -



- d -

- c -

الشكل (4-10) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على مقاومة الانضغاط للعينات المكبوسة
 a - عند حجم حبيبي (106µm) ، b - عند حجم حبيبي (250µm) ، c - عند حجم
 حبيبي (425µm) ، d - مجموع الاشكال (a,b,c) .

3-3-4 مقاومة الانحناء (Bending Strength)

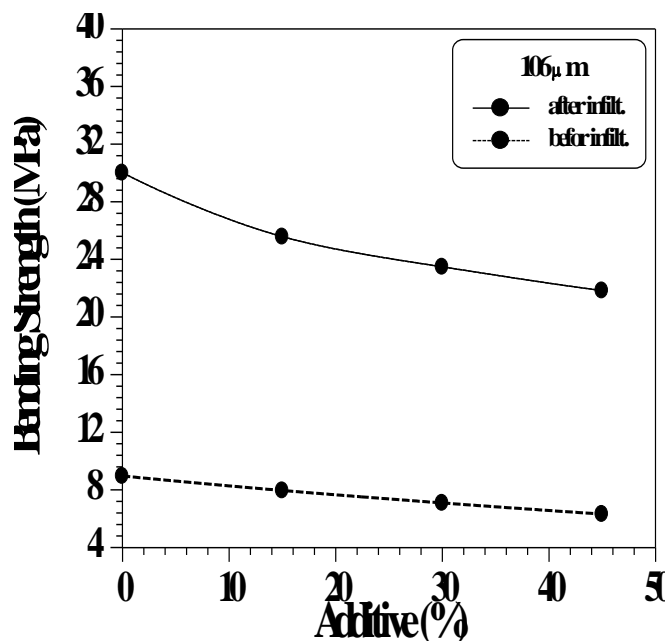
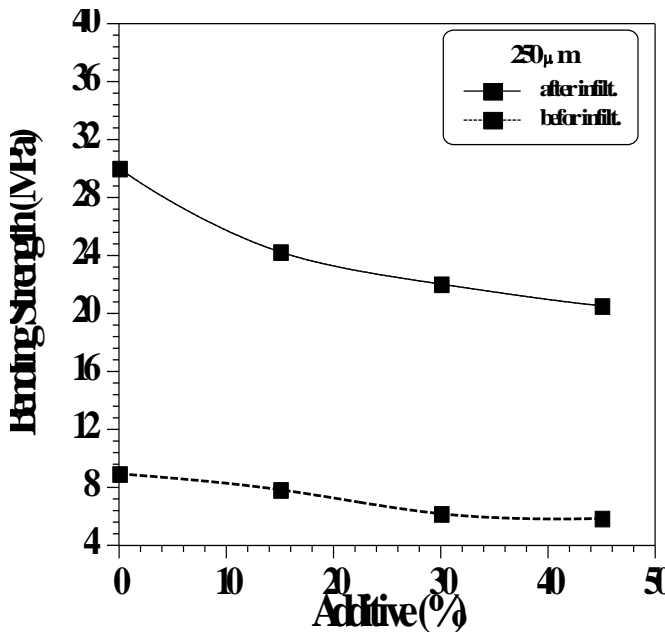
إن دراسة مقاومة الانحناء تعطي تصوراً عن مقاومة المادة لاجهادات الشد . تم قياس مقاومة الانحناء للعينات السيراميكية قبل اجراء عملية الترشيح وبعدها ، الجدول (11) في ملحق النتائج يمثل قيم مقاومة الانحناء للعينات السيراميكية المشكلة يدويا ، والجدول (12) يمثل قيم مقاومة الانحناء للعينات السيراميكية المكبوسة وان كل قيمة أو نتيجة هي معدل لثلاثة نماذج .

الشكل (4-11) يمثل تأثير نسبة الاضافة من نشارة الخشب على مقاومة الانحناء للعينات السيراميكية المشكلة يدويا لكل حجم حبيبي مستخدم قبل اجراء عملية الترشيح وبعدها. الشكل (4-12) يمثل تأثير نسبة الاضافة من نشارة الخشب على مقاومة الانحناء للعينات المكبوسة ولكل حجم حبيبي مستعمل قبل وبعد اجراء عملية الترشيح .

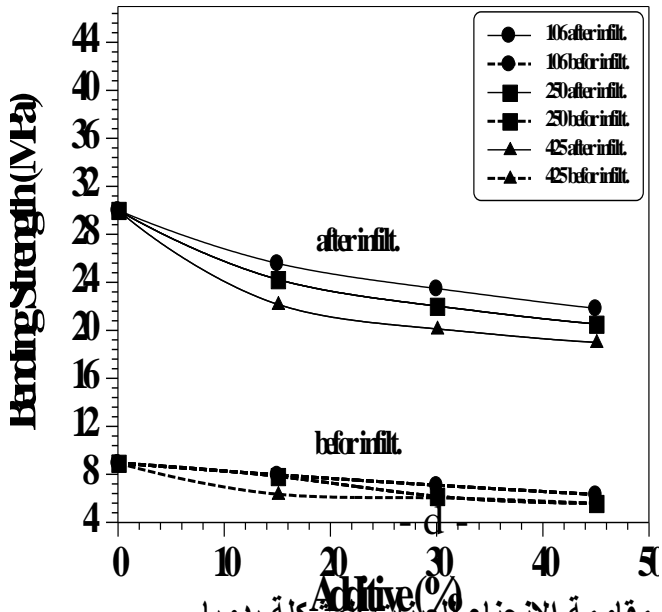
يوضح الشكلان اعلاه انخفاض مقاومة الانحناء بزيادة النسبة المئوية لمادة نشارة الخشب ، كما يبين انخفاض المقاومة بزيادة الحجم الحبيبي لنشارة الخشب فمقاومة المادة تحددها العديد من العوامل منها التفاعلات الكيميائية التي تحصل بين المكونات وكثافة المادة التي تعتمد على المسامية ، حيث ان النسبة العالية من نشارة الخشب اعطت نماذج ذات مسامية عالية وكذلك عند زيادة الحجم الحبيبي للنشارة ازدادت المسامية ومن ثم قلت مقاومة المادة للاجهادات المسلطة عليها . من الشكلين السابقين يمكن ان نلاحظ ان مقاومة الانحناء للعينات المشكلة يدويا هي اقل من مقاومة الانحناء للعينات المكبوسة وذلك لتأثير عملية التصنيع على خواص المادة الناتجة .

بعد اجراء عملية الترشيح يمكن ان نلاحظ ارتفاع مقاومة الانحناء بشكل ملحوظ حيث وصلت الى ثلاث مرات بقدر قيمتها قبل الترشيح ، كذلك يلاحظ ان مقاومة الانحناء ترتفع بانخفاض النسبة المئوية للمسامية وقد يعود ذلك الى ان وجود المادة البوليمرية بكمية كبيرة داخل المسامات والتي تعد مادة لدنة بالمقارنة مع المادة الاساس والتي لها القابلية على التشوه اللدن قبل الكسر ، على العكس من المادة السيراميكية المعروفة بهشاشتها وخلوها من التشوه اللدن مما يزيد من قيمة اجهاد الانحناء المسلط حتى الكسر ، كما ان المادة البوليمرية وكما هو متوقع لها تعمل على غلق التشققات مما يزيد من تحمل المادة السيراميكية لاجهادات الشد المسلط عليها عن طريق الانحناء ، فضلاً عن تقليل عملية زحف الجزيئات السيراميكية حول بعضها البعض والذي يأتي بسبب اجهادات القص الناتجة من تسليط قوى شد او ضغط على النماذج ، من هنا يأتي تحسن الصفات الميكانيكية بعد الترشيح .

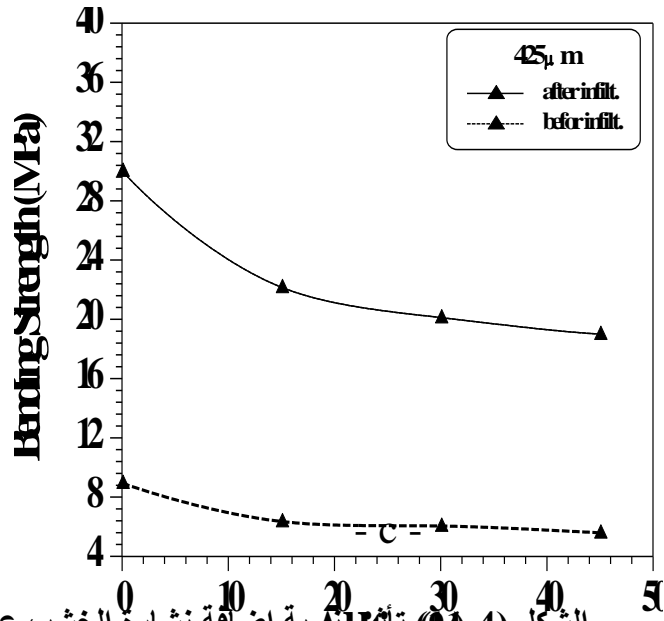
هنا ايضا يبدو واضحا ان الحجم الحبيبية الصغيرة لنشارة الخشب والتي تعطي في العادة مسامات صغيرة قد اعطت نتائج لمقاومة الانحناء أفضل من غيرها ويبدو ان نفس التفسير السابق ينطبق عليها حيث تتغلغل كمية اكبر من المادة البوليمرية مما يؤدي الى زيادة التبلل .



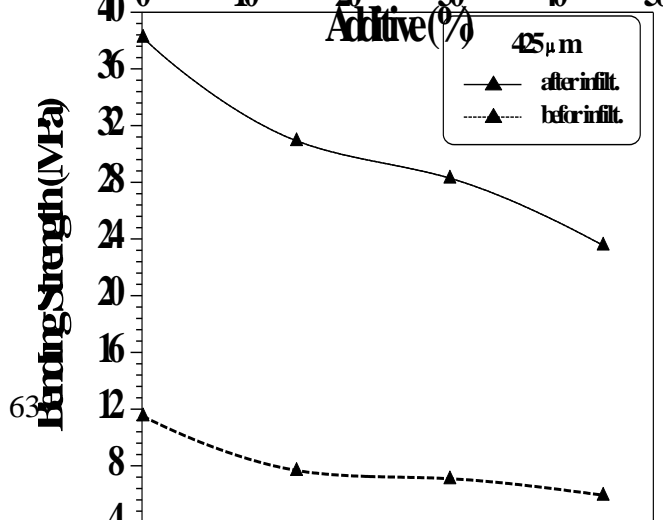
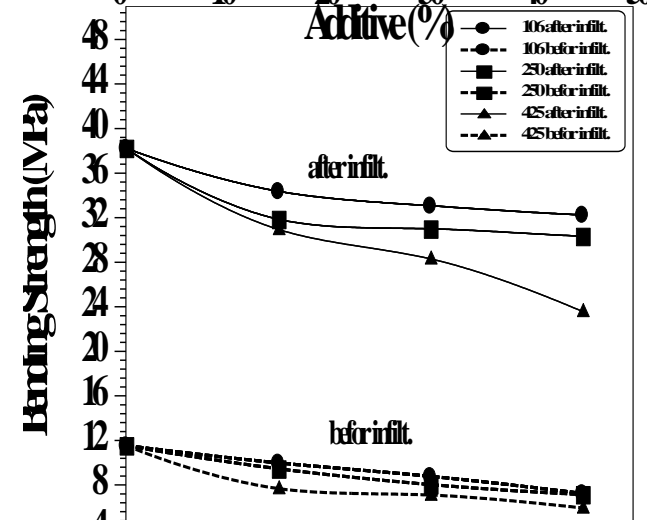
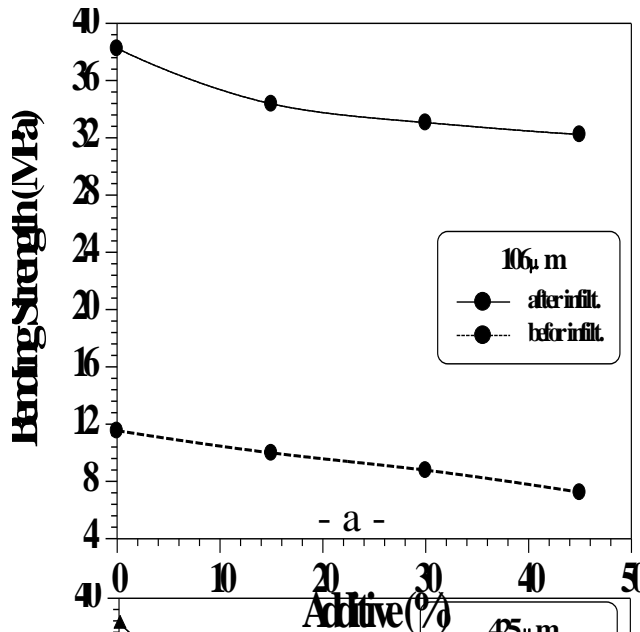
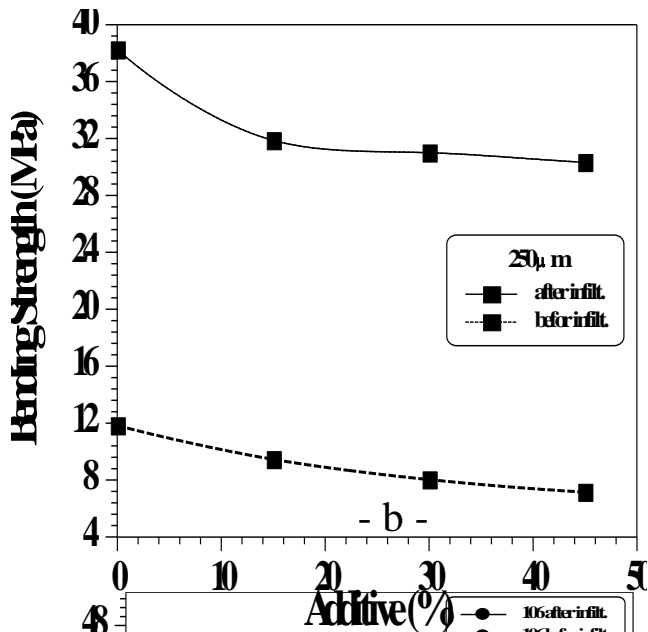
- b -



- a -



الشكل (4-4) نسبة اضافة نشارة الخشب على مقاومة الانحناء للعينات المشكلة يدويا
 a - عند حجم حبيبي (106µm) ، b - عند حجم حبيبي (250µm) ، c - عند حجم حبيبي (425µm) ، d - مجموع الاشكال (a,b,c) .



- d -

- c -

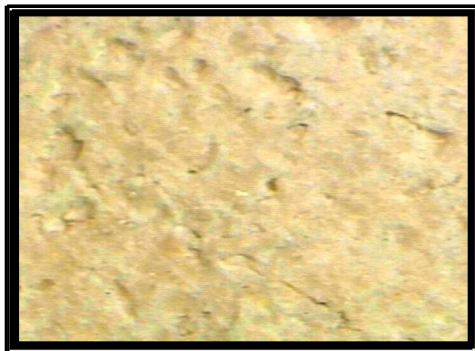
الشكل (4-12) تأثير نسبة اضافة نشارة الخشب على مقاومة الانحناء للعينات المكبوسة
 a - عند حجم حبيبي (106µm) ، b - عند حجم حبيبي (250µm) ، عند حجم
 حبيبي (425µm) ، d - مجموع الاشكال (c,b,a) .

4-4 اختبار الفحص المجهرى (Microscopic Test)

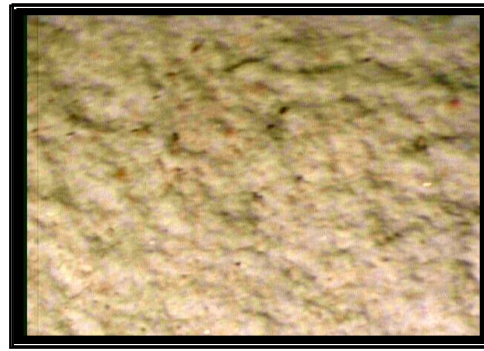
اجري اختبار الفحص المجهرى لمقاطع كسور العينات لتوضيح التركيب المجهرى
 للعينات قبل اجراء عملية الترشيح وبعدها والتي عند فحصها مجهرىا قد تبين ان هناك
 تشابه الى حد كبير بين مقاطع العينات المشكلة يدويا والمكبوسة ، لذا فقد تم عرض نموذج
 واحد من العينات المصورة تلافيا للتكرار .

والاشكال (4-13) ، (4-14) ، (4-15) ، (4-16) تبين الفحص المجهرى للعينات
 السيراميكية في حالة عدم اضافة مادة النشارة ، اضافة مادة النشارة بحجم (425µm) ،
 اضافة مادة النشارة بحجم حبيبي (250µm) ، وأخيرا بحجم (106µm) .

من الاشكال المذكورة نلاحظ ان حجم وتوزيع المسامات يتغير مع نسبة مادة النشارة
 المضافة وحجمها الحبيبي قبل اجراء عملية الترشيح في حين يظهر التغلغل الواضح
 للبوليمر داخل المسامات بعد عملية الترشيح مع بقاء نسبة معينة (منخفضة) من المسامية
 وقد يعود ذلك اما لوجود نسبة من المسامات المغلقة والتي لم يدخلها البوليمر ، او قد يكون
 زمن الترشيح غير كافٍ لملأ المسامات بشكل كامل .

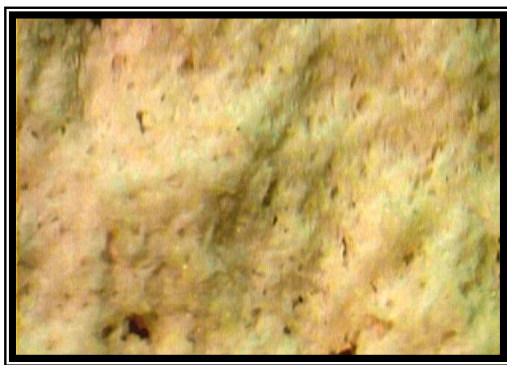


(b)

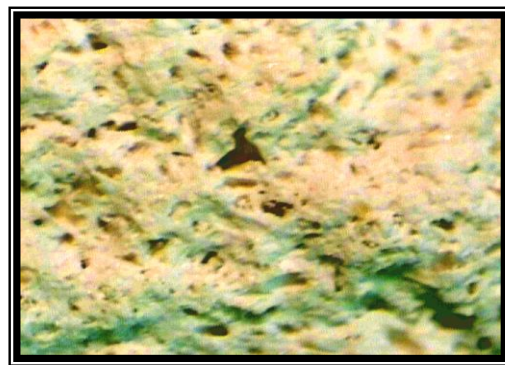


(a)

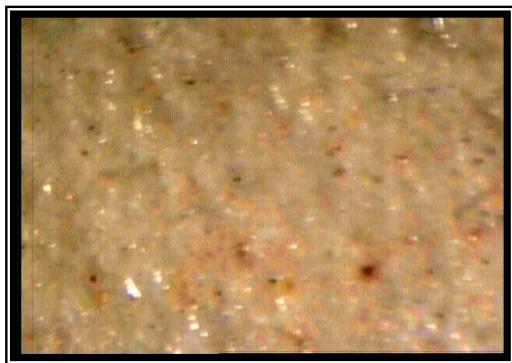
الشكل (4-13) التصوير المجهرى لمقطع الكسر للعينات السيراميكية المصنعة بدون مادة الاضافة
وبقوة تكبير (40X) حيث :
-a قبل الترشيح .
-b بعد الترشيح .



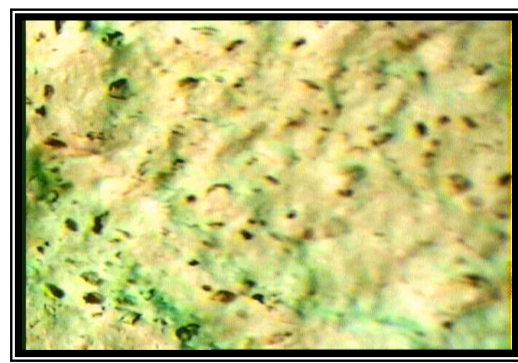
(b)



(a)



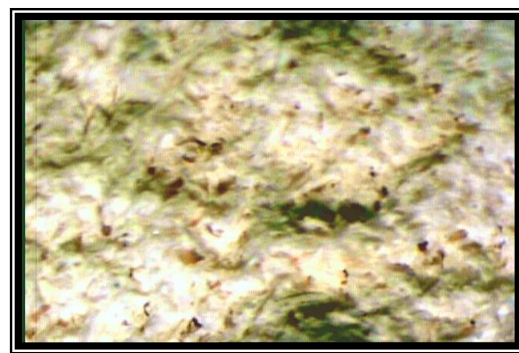
(d)



(c)



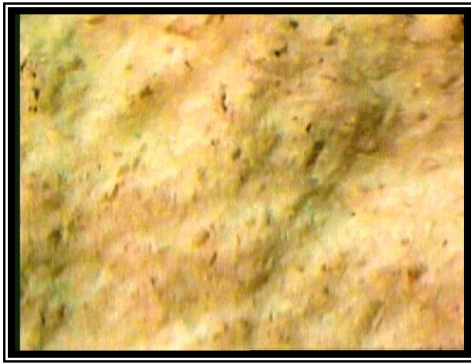
(f)



(e)

الشكل (4-14) التصوير المجهرى لمقطع الكسر للعينات السيراميكية باضافة النشارة بحجم حبيبي (425 μm) وبقوة تكبير (40X) حيث :

- a- نسبة الاضافة (45%) قبل الترشيح .
- b- نسبة الاضافة (45%) بعد الترشيح .
- c- نسبة الاضافة (30%) قبل الترشيح .
- d- نسبة الاضافة (30%) بعد الترشيح .
- e- نسبة الاضافة (15%) قبل الترشيح .
- f- نسبة الاضافة (15%) بعد الترشيح .



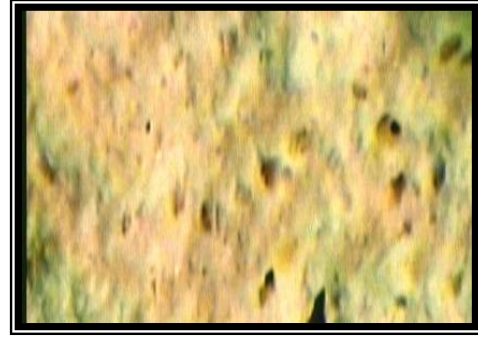
(b)



(a)



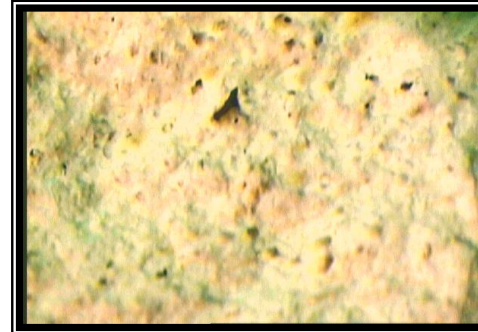
(d)



(c)



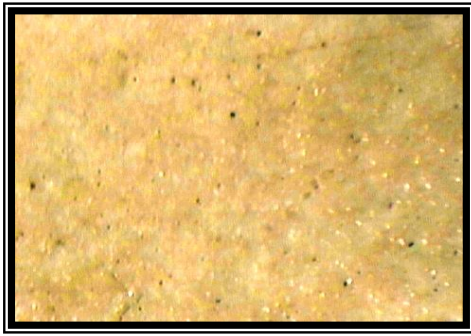
(f)



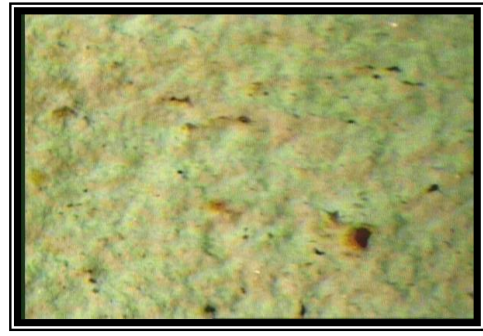
(e)

الشكل (4-15) التصوير المجهرى لمقطع الكسر للعينات السيراميكية باضافة النشارة بحجم حبيبي (250µm) وبقوة تكبير (40X) حيث :

- a- نسبة الاضافة (45%) قبل الترشيح .
- b- نسبة الاضافة (45%) بعد الترشيح .
- c- نسبة الاضافة (30%) قبل الترشيح .
- d- نسبة الاضافة (30%) بعد الترشيح .
- e- نسبة الاضافة (15%) قبل الترشيح .
- f- نسبة الاضافة (15%) بعد الترشيح .



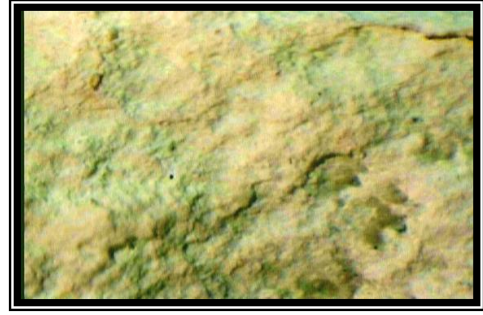
(b)



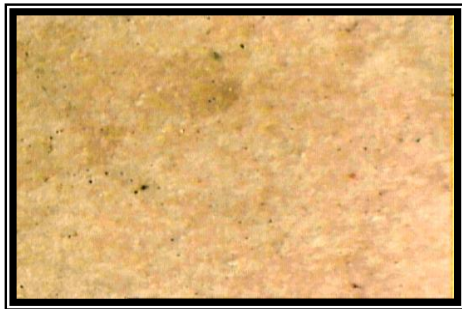
(a)



(d)



(c)



(f)



(e)

الشكل (4-16) التصوير المجهرى لمقطع الكسر للعينات السيراميكية باضافة النشارة بحجم حبيبي (106 μm) وبقوة تكبير (40X) حيث :

- a- نسبة الاضافة (45%) قبل الترشيح .
- b- نسبة الاضافة (45%) بعد الترشيح .
- c- نسبة الاضافة (30%) قبل الترشيح .
- d- نسبة الاضافة (30%) بعد الترشيح .
- e- نسبة الاضافة (15%) قبل الترشيح .
- f- نسبة الاضافة (15%) بعد الترشيح .

الفصل الخامس

الاستنتاجات والتوصيات

Conclusions and Recommendations

(Conclusions) 1-5 الاستنتاجات

- 1- امكانية استخدام نشارة الخشب كمادة اضافة عضوية لتكوين المسامية المطلوبة في الجسم السيراميكي حيث تغيرت نسب المسامية مع تغير كل من نسب الاضافة والحجم الحبيبي لمادة نشارة الخشب .
- 2- انخفاض الخواص الميكانيكية (مقاومة الصدم ، الانضغاط ، الانحناء) بزيادة نسبة المسامية ، اذ ان تكوين مسامية عالية لا يخدم الخواص الميكانيكية .
- 3- ان لطريقة التصنيع تأثير واضح في الخواص الميكانيكية للعينات السيراميكية اذ امتازت العينات المكبوسة بارتفاع خواصها الميكانيكية نسبيا مقارنة مع العينات المشكلة يدويا .
- 4- امكانية استخدام طريقة الترشيح بالغمر الكلي لجسم سيراميكي مسامي في سائل البوليمر في إنتاج مادة مركبة ذات أساس سيراميكي مقواة بالبوليمر .
- 5- انخفاض مسامية العينات بشكل واضح وزيادة كثافتها بعد اجراء عملية الترشيح .
- 6- وجد ان البوليمر المرشح داخل مسامات الجسم السيراميكي له تأثير واضح في الخواص الميكانيكية اذ ارتفعت الخواص الميكانيكية (مقاومة الصدم ، الانضغاط ، الانحناء) بعد اجراء عملية الترشيح .
- 7- اظهر التصوير المجهرى للعينات تغلغل المادة البوليمرية داخل مسامات الجسم السيراميكي .
- 8- اتضح ان المسامات الأصغر قد استوعبت مادة بوليمرية اكثر مما سبب تحسنا في الخواص الميكانيكية .

2-5 التوصيات (Recommendations)

- 1- عدم خلق مسامات إضافية اضافة الى المسامات التي يمتلكها الجسم السيراميكي لأنها سوف تضعف الخواص الميكانيكية قبل وبعد الترشيح .
- 2- في حالة صناعة مادة سيراميكية اخف نقترح خلق مسامات إضافية وتجربة طرق اخرى لخلق المسامات خاصة الصغيرة منها لإعطاء كثافات اقل والسماح لمادة البوليمر بالتغلغل اكثر .
- 3- استخدام ضغوط كبس مختلفة ودراسة تأثيرها على المسامية الناتجة .
- 4- دراسة امكانية تحسين خواص الجسم السيراميكي باستخدام مواد بوليمرية لدنة حراريا (Thermoplastic) بدلا من مادة البولي استر غير المشبع مع ملاحظة الفرق بينهما .
- 5- استخدام تقنية ترشيح مختلفة عن التقنية المستخدمة والمقارنة بين التقنيتين من الناحية الإنتاجية وتأثيرها على الخواص الميكانيكية ومدى تغلغل المادة البوليمرية .
- 6- دراسة تغيير لزوجة البوليمر المستخدم مع دراسة تأثير درجة الحرارة عليه .
- 7- دراسة تأثير تغيير زمن الترشيح على المسامية الناتجة بعد الترشيح .
- 8- يمكن اجراء الدراسة باستخدام الحسابات النظرية حسب قاعدة المخاليط (Rule of Mixture) او التحليل باستخدام الطرق العددية (Numerical Analyses) ومقارنة النتائج مع القيم العملية .

المصادر

References

- 1- Georgy S.B. , Henry R.C.and John A.V. ,"**MATERIALS HAND BOOK**", 15th Ed. , New York , (2002) .
- 2- Nicholas M.G. , "**JOINING OF CERAMICS** ", 1st Ed. , Hong Kong , (1990) .
- 3- Meyers A.M. and Chawla K.K. ,"**MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS**", Prentice Hall , New Jersey, (1998) .
- 4- Harper A.Ch. , "**HAND BOOK OF CERAMICS ,GLASSES, AND DIAMONDS**", Mc Graw-Hill publidium , (2002) .
- 5- Kingery W.D., Bowen H.k.and Uhlmann D.r., "**INTRODUCTION TO CERAMICS** ", 2nd Ed. ,New York , (1976) .
- 6- William D. Callister, Jr., "**MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING AN INTRODUCTION**", 5th Ed. , John Wiley & Sons, Inc., (2000) .
- 7- Crum N.G., Buckley C.P., & Bucknall C.B., "**PRINCIPLES OF POLYMER ENGINEERING**", 2nd Ed. , Oxford University Press , (1997) .
- 8- الدكتور كوركيس عبد آل ادم , الدكتور حسين علي كاشف الغطاء , "**تكنولوجيا وكيمياء البوليمرات**" , مطبعة جامعة البصرة , البصرة، (1981) .
- 9- Herman W.P., "**MATERIALS SCIENCE AND METALLURGY**", 3rd Ed ., Reston Publishing Company, Inc., (1981).
- 10- Rothero G.R., **Powder Metallurgy**, Vol.30 , No.2 , (1978) .
- 11- Jeannine S. W., Seoh C.E., **Amer. Ceram. Soc. Bull.**, Vol.71, No.2, PP. 1674-1682, (1992).
- 12- Singer F., & Singer S.S., "**INDUSTRIAL CERAMICS**", Chapman and Hall Ltd., London , (1963) .
- 13-Van Valck H.L. , "**ELEMENTS OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**", 4th Ed., (1980) .
- 14- Kenneth Sh., "**REFRATORIES AND THEIR USES**", 1st Ed., London , (1968) .
- 15- Budnikov P.P., "**THE TECHNOLOGY OF CERAMIC AND REFRATORIES**", M.I.T. Press, Cambridge, (1967) .

- 16- Robinson P.B. , **"Note On A new Method For The Determination Of Porosity"**, Engineering & Technology, Vol.45, No.33, (1996).
- 17- Sgalevich Y.O.and Larenkov A.P., **"The Effect of Firing On Dinas"**, Refractories Journal , Vol.15, No.4, March (1974).
- 18- Albano L., and Muller A., **"Powder Metallurgy International"**, Vol. 14 , No. 2, (1992) .
- 19- Bruce R.C., Tomovic M.M., Neely J.E., Kibbe R.R., **"MODERN MATERIALS AND MANUFACTURING PROCESSES"**, 2nd Ed., Prentice Hall, New Jersey, (1998) .
- 20- Slosarczyk A., **"Powder Metall. Interna."**, Vol.21, No. 4, (1990) .
- 21- Frank R.Jr., & Kevin P.T., **"Tailored Porosity Gradients Via Colloidal Infiltration Of Compression-Molded Sponges"**, Amer. Ceram. Soc., Vol.81, No.6, (1998) .
- 22-Al-Rawi W.A., MSc. Thesis, University of Technology, Baghdad, (1999) .
- 23- Gacek S.,Frydrych J. and Stolarz S., **"Powder Metallurgy International"**, Vol.13 , No.1, (1981) .
- 24- Lahaska J. and Rutkowski W., **"Infiltration of Liquid in Sintered Tungsten"**, Powder Metallurgy International, Vol. 19, No.2, (1987) .
- 25- Matins G.P., Olson D.L., & Edwards G.R., **"Modeling of Infiltration Kinetics for Liquid Processing of Composites"**, Metallurgical Transaction B, Vol.19 B , No.95 , (1988) .
- 26- Subramanian R. and Schneibel J.H., **"Composites - Melt infiltration processing"**, Materials Science and Engineering , A244, PP.103-112 , (1998) .
- 27- Khansaa D.S., Ph.D. Thesis, University of Technology, Baghdad - Iraq , (2003) .
- 28- Travitzky N.A. and Shlayan A., **"Material Science & Engineering"**A244, PP.154-160, (1998) .
- 29- Yamada H., Manas I., Feke D.L., **"Observation and Analysis Of The Infiltration Of Polymer Liquids Into Carbon Black Agglomerates"**, Chemical Engineering Science, Vol.53, No.11, (1998) .

- 30- Ahmed A.A., David L.M., Douglass H.A., Ihan A.A. and Robert K., *"Strengthening of Porous Ceramics with Polymers"*, Science & Engineering , Vol. 90, No.384, (2004) .
- 31- German R.M., *Journal of Materials*, PP.(26-29), August (1986) .
- 32- Glaus G.Goetzel, *"MATALS HAND BOOK"*, Volume 7, Powder Metallurgy, Amer. Soc. Metal , (1984) .
- 33- Mortensen A. and Jin I., *"International Materials Reviews"*, Vol. 37, No.101, (1992) .
- 34- Ani K.S., *"POWDER METALLURGY"*, 2nd Ed., Jullundur - Delhi, (1987) .
- 35- Lumpkins E.R., *"Powder Metallurgy International"*, Vol.17, No.3, (1995) .
- 36- Dvllien E.A.L., *"Porous Media Fluid Transport and Pore Structure"*, PP. 395, (1989) .
- 37- Al-Khalissi F.Q. , Worrall W.E. , *"The Mineralogical Composition Of Sedimentary Clays"*, Trans. , Journal of Brit. Ceram. Soc., Vol. 81, No.5 , (1982) .
- 38- Jacob B., *"DYNAMICS OF FLUIDS IN POROUS MEDIA"*, American Elsevier, Publishing Company, Inc., Canada, (1972) .
- 39- ASTM Annual Book of Standards , C373-1988, PP. (104-110) .
- 40- Frydrych J., Lezanski J. and Rutkowski W., *"MODERN DEVELOPMENTS IN POWDER METALLURGY"*, 1stEd., Plenum press - New York , (1966) .
- 41- Delannay F., Froyen L. and Deruyttere A., *"Journal of Materials Science"*, Vol.22, Chapman and Hall Ltd, (1987) .
- 42- Ernest A. Boucher, *"Journal of Material Science"*, Vol.11, No.2, Chapman and Hall Ltd, (1976) .
- 43- Lezanaski J., Rutkowski W. and Missol W., *"Modern Developments in Powder Metallurgy"*, International Powder Metallurgy Institute, (1996) .
- 44- Lin C. H. and Jean J., *"Journal of Materials Science"* , Vol.2, No.48 , (1983) .

- 45- Ramakrishnan K. N. and Upadhyaya G. S., *Journal of materials science*, Vol. 9, No.456, (1990) .
- 46- Dopler T., Modaresi A., & Michaud V., "*Simulation of Composite Materials Isothermal Infiltration Processing*" , Metallurgical and Materials Transactions ,Vol. 31B , (April 2000) .
- 47- German R.M., "*Phase Diagrams in Liquid Phase Sintering Treatments*", Journal of metals, (August 1986) .
- 48- Richard A.F. and Trojan P.K., "*ENGINEERING MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS*", 3rd Ed. , U.S.A., (1976) .
- 49- Barsoum M.W., "*FUNDAMENTALS OF CERAMICS*", The Mc Graw - Hill Companies , Inc., (1997) .
- 50- أشببي م. ف. ، جونيز ، "*المواد الهندسية مقدمة لخواصها وتطبيقاتها*" ، ترجمة د. جعفر طاهر الحيدري ، مطابع دار الحكمة ، بغداد ، (1990) .
- 51- Roman P., "*CERAMIC MATERIALS AN INTRODUCTION TO THEIR PROPERTIES*", Elsevier Scientific Publishing Company , (1976) .
- 52- Hamer F., "*THE POTTER'S DICTIONARY OF MATERIALS AND TECHNIQUES*", 1st Ed., Pitman Publishing, London , (1975) .
- 53- Hans-Georg E., Vohwinkel F., "*NEW COMMERCIAL POLYMERS 2*", Gordon and Breach Science Publishers , (1986).
- 54- Lawrence W.G., "*CERAMIC SCIENCE FOR POTTER*", Pennsy Ivania Chilton Book Comp., (1972) .
- 55- الطائي محمد حيدر ، "*خواص المواد الهندسية*" ، جامعة بغداد ، (1987) .
- 56- Beech D.G., "*Testing Method for Brick and Tile Manufacture*", Brit. Ceram. Res. Assoc., Publication No.84, (1994) .
- 57- Amstead B.H., Ostwald F.P., Begman L.M., "*MANUFACTURING PROCESSES*", 7th Ed., New York, (1979) .
- 58- Brownell W.E., "*STRUCTURAL CLAY PRODUCTS*", New York , (1979) .

- 59- "**ASTM Annul Book of Standards**", C773-1988, PP. (245-247) .
- 60- "**Japanese. Industrial Standard**", Testing of Flexural Strength (Modulus of Rupture) of High Performance Ceramic, JISR 1601,(1981) .
- 61- "**ASTM Annual Book of Standards**", C674-1988, PP.(200-203).
- 62- "**ASTM Annual Book of Standards**", C368-1988, PP. (98-100) .
- 63- Cahn R.W., Thompson M.W. and Word I.M., "**MECHANICAL BEHVIOR OF CERAMIC**", Alden Press, Oxford , (1980) .
- 64- Boch J.C., "**Porosity Effect On Mechanical Properties of Ceramics**", International Ceramic review, No.3, (June 1994) .
- 65- Grimshaw R., "**THE CHEMISTRY AND PHYSICS OF CLAY** ", Ltd., London , (1971).
- 66- Norton F.H., "**ELEMENTS OF CERAMICS**", 4th Ed., Addison Wesley Publishing Company , Inc., United States of America, (1994) .
- 67- د.صالح أمين , د. وليد محمد , د. طالب الشريف, "**خواص المواد الهندسية**", دار الكتب , بغداد (1980) .
- 68- Patankar A.N. and Mandal G., "**The Packing of Some Non-Spherical Solid Particles**", Trans. Brit. Ceram. Soc., Vol. 79, (1998) .
- 69- Serry M.A. and Hanna S.B., "**Composition And Properties of Some Dolomite Zirconia Refractories**", Trans. Brit. Ceram. Soc., Vol. 70, No.3, (1999).
- 70- Mangonan P., "**THE PRINCIPLES OF MATERIALS SELECTION FOR ENGINEERING DESIGN** ", New Jersey, (1999) .
- 71- ضحى عبد الأمير السعدي, "**دراسة العوامل المؤثرة على عملية التلبيد لمواد سيراميكية منتجة من مواد أولية محلية**", رسالة ماجستير مقدمة الى قسم الهندسة الكيماوية , الجامعة التكنولوجية , (1993).
- 72- Albaro J.L., "**Quality Control In The Tile Production**", International Ceramic review , No.2 , (1994) .

73- Hasse E. and Hilker E., **"Influence On Strength Development In The Ceramic Body"**, Journal of Material Science , Vol. 1, No.36, (1997).

74- Skoog Andraw J. and Moore R.E., **"Mullite And Its Uses As A Bonding Phase"**, Ceramic Bulletin , Vol. 67, No.7, (1988) .

ملاحق الكتاب

جدول (1) قيم اختبار المسامية الظاهرية للعينات المشكلة يدويا

المسامية بعد عملية الترشيح (%)	المسامية قبل عملية الترشيح (%)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
8.569	40.99	0	106
9.931	43.596	15	
12.312	51.443	30	
14.321	54.839	45	
11.112	43.333	15	250
14.521	51.965	30	
16.631	57.225	45	
13.331	45.398	15	425
16.321	53.723	30	
18.253	58.277	45	

جدول (2) قيم اختبار المسامية الظاهرية للعينات المكبوسة

المسامية بعد عملية الترشيح (%)	المسامية قبل عملية الترشيح (%)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
3.546	29.892	0	106
4.029	31.622	15	
5.012	34.279	30	
6.623	41.654	45	
4.331	32.677	15	250
6.012	36.338	30	
8.926	43.972	45	
5.689	34.805	15	425
8.211	38.556	30	
11.062	48.169	45	

جدول (3) قيم اختبار الكثافة للعينات المشكلة يدويا

الكثافة بعد عملية الترشيح (g/cm ³)	الكثافة قبل عملية الترشيح (g/cm ³)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
3.892	1.636	0	106
3.423	1.499	15	
3.251	1.349	30	
2.989	1.231	45	
3.231	1.418	15	250
3.029	1.247	30	
2.882	1.074	45	
2.929	1.399	15	425
2.721	1.213	30	
2.021	1.021	45	

جدول (4) قيم اختبار الكثافة للعينات المكبوسة

الكثافة بعد عملية الترشيح (g/cm ³)	الكثافة قبل عملية الترشيح (g/cm ³)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
4.431	2.522	0	106
4.041	2.382	15	
3.821	2.112	30	
3.630	2.003	45	
3.731	2.280	15	250
3.338	1.866	30	
3.200	1.689	45	
3.538	2.023	15	425
3.131	1.553	30	
2.801	1.431	45	

جدول (5) قيم اختبار التقلص الطولي للعينات المشكلة يدويا

التقلص الطولي بعد عملية الترشيح (%)	التقلص الطولي قبل عملية الترشيح (%)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
11.121	11.121	0	106
13.002	13.002	15	
14.922	14.922	30	
15.525	15.525	45	
13.393	13.393	15	250
15.538	15.538	30	
16.783	16.783	45	
13.931	13.931	15	425
15.425	15.425	30	
18.231	18.231	45	

جدول (6) قيم اختبار التقلص الطولي للعينات المكبوسة

التقلص الطولي بعد عملية الترشيح (%)	التقلص الطولي قبل عملية الترشيح (%)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
4.166	4.166	0	106
4.343	4.343	15	
5.877	5.877	30	
7.342	7.342	45	
5.821	5.821	15	250
7.531	7.531	30	
8.110	8.110	45	
6.981	6.981	15	425
7.882	7.882	30	
8.312	8.312	45	

جدول (7) قيم اختبار مقاومة الصدم للعينات المشكلة يدويا

مقاومة الصدم بعد عملية الترشيح (KJ/m ²)	مقاومة الصدم قبل عملية الترشيح (KJ/m ²)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
32.021	15.592	0	106
29.312	14.021	15	
27.721	13.531	30	
25.591	12.020	45	
27.972	13.531	15	250
25.521	12.212	30	
23.319	11.731	45	
26.621	11.213	15	425
23.931	11.001	30	
20.319	10.021	45	

جدول (8) قيم اختبار مقاومة الصدم للعينات المكبوسة

مقاومة الصدم بعد عملية الترشيح (KJ/m ²)	مقاومة الصدم قبل عملية الترشيح (KJ/m ²)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
35.523	18.181	0	106
32.313	17.981	15	
30.318	16.531	30	
28.219	15.521	45	
30.399	17.721	15	250
28.822	16.002	30	
27.321	14.992	45	
28.381	16.923	15	425
25.521	14.632	30	
23.312	14.031	45	

جدول (9) قيم اختبار مقاومة الانضغاط للعينات المشكلة يدويا

مقاومة الانضغاط بعد عملية الترشيح (MPa)	مقاومة الانضغاط قبل عملية الترشيح (MPa)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
45.521	21.221	0	106
36.962	18.931	15	
33.312	15.669	30	
30.002	12.538	45	
35.562	17.716	15	250
31.112	14.058	30	
28.552	11.528	45	
33.078	16.087	15	425
29.921	14.321	30	
25.515	11.656	45	

جدول (10) قيم اختبار مقاومة الانضغاط للعينات المكبوسة

مقاومة الانضغاط بعد عملية الترشيح (MPa)	مقاومة الانضغاط قبل عملية الترشيح (MPa)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
95.521	30.921	0	106
92.940	29.800	15	
83.932	28.321	30	
79.922	150644	45	
88.758	29.237	15	250
72.946	27.301	30	
66.911	13.204	45	
74.776	29.002	15	425
50.321	26.071	30	
40.744	12.335	45	

جدول (11) قيم اختبار مقاومة الانحناء للعينات المشكلة يدويا

مقاومة الانحناء بعد عملية الترشيح (MPa)	مقاومة الانحناء قبل عملية الترشيح (MPa)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
30.001	8.928	0	106
25.565	7.952	15	
23.475	7.084	30	
21.821	6.313	45	
24.238	7.823	15	250
22.021	6.170	30	
20.522	5.850	45	
22.155	6.341	15	425
20.112	6.032	30	
18.992	5.581	45	

جدول (12) قيم اختبار مقاومة الانحناء للعينات المكبوسة

مقاومة الانحناء بعد عملية الترشيح (MPa)	مقاومة الانحناء قبل عملية الترشيح (MPa)	نسبة النشارة (%)	الحجم الحبيبي لنشارة الخشب (µm)
38.231	11.523	0	106
34.362	9.982	15	
33.050	8.773	30	
32.233	7.230	45	
31.852	9.445	15	250
30.989	8.022	30	
30.321	7.143	45	
30.936	7.674	15	425
28.300	7.084	30	
23.577	5.929	45	