مجلة جامعة بابل / العلوم الصرفة والتطبيقية / العدد (٦) / المجلد (٢٥) : ٢٠١٧

# دراسة تاثير المرشحات السيراميكية على النمو البكتيري للماء المرشح

**وفاء عبد الخالق حسين انتصارحسين علي**

*الجامعة التكنولوجية – فرع العلوم التطبيقية*

**ايمان مطلب سليمان**

*الجامعة التكنولوجية – فرع العلوم التطبيقية*

cat87bute@yahoo.com

## الخلاصة

ترشيح المياه الخزفي هي العملية التي تستعمل وسط سيراميكي مسامي لترشيح المايكروبات او الملوثات الاخرى من الماء. الهدف من هذا البحث هو تحضير مرشح ماء سيراميكي من مواد متوفرة وغير مكلفة. شكلت الاجسام السيراميكية من اطيان الكاؤولين بحجمين حبيبيين (45 –63) مايكرون للحجم الناعم و(105– 150) مايكرون للحجم الخشن مع اضافة المواد القابلة للاحتراق (الفحم والياف الجزر) التي تعمل كعوامل لخلق المسامية. شكلت الاجسام السيراميكية بطريقة القولبة الانزلاقية للحصول على مرشح قرصي، وثم حرقت بدرجة حرارة تصل الى (1100 °م). تم دراسة بعض الاختبارات الفيزيائية مثل(المسامية الظاهرية، والنفاذية)، بالاضافة الى الفحوصات الحيوية، وحساب كفاءة المرشحات لازالة المواد الصلبة العالقة.

**الكلمات الرئيسية:** مرشح سيراميكي ; الكاؤولين ; المسامية الظاهرية; الصب الانزلاقي; النفاذية.

## Abstract

Ceramic water filtration is the process that makes use of a porous ceramic medium to filter microbes or other contaminants from water. The objective of this research is prepared ceramic water filter from available and inexpensive material. Ceramic bodies were formulated from kaolinite with two particle sizes,(45-63) μm for fine size and (105-150) μm for coarse size with add combustible materials (charcoal, carrot fiber) which act as pore-creating agent. The formulated ceramic bodies were shaped into filters (disk) slip casting technique, and then fired at (1100°C). Some physical tests such as (apparent porosity, and permeability), in addition to biological tests have been studied, and the efficiency of filters to remove suspended solids materials has been calculated.

**Keywords:** ceramic filter; kaolin; apparent porosity; slip casting; permeability.

## المقدمة:

تعد المياه من اهم الموارد الطبيعية على الاطلاق كونها عاملا اساسيا ترتكز عليه حياة الانسان وقد شهدت مصادر المياه تدهورا كبيرا في الاونة الاخيرة لعدم توجيه قدر وافر من الاهتمام بها. فقد تميزت السنوات العشرون الاخيرة بتدهور كبير في البيئة الطبيعية العراقية، ابتداء من تلوث الهواء وانتهاء بتلوث التربة والمياه (منتظر،2009).

فيعرف التلوث على أنه أي تغيير في الخصائص الفيزيائية، والكيميائية والبايولوجية للبيئة المائية ويكون كافيا لأحداث الضرر في الصحة العامة والأنظمة البيئية المختلفة وبسبب ازدياد النشاطات الصناعية والزراعيه والتنمويه في كثير من النواحي فقد ادت الى زياده تلوث المياه.

يحظى موضوع تصنيع المرشحات(الفلاتر) بأهمية كبيرة لدى الباحثين نظرا لتطبيقاته الواسعة في عمليات الترشيح كترشيح السوائل الكيميائية أو للحصول على مساحات سطحية واسعة ضمن حجم قليل لزيادة المساحة المتوفرة لتسريع التفاعل الكيميائي أو لإعطاء مساحة سطحية كافية لتشجيع نمو الأحياء المجهرية في عمليات الاختبار البيولوجية(Xiandong,Xiaorong,2003).

الترشيح هي العملية الاكثر شيوعا في معالجة المياه وازالة المواد العالقة منها وكذلك المايكروبات، وأن المرشح هو العنصر الأساسي في منظومة ترشيح السوائل (Kawamura, 1999). لذلك يؤخذ بالحسبان مواصفات المرشح لتصميم منظومة الترشيح ومنها المسامية(Porosity) والنفاذية (Permeability) وتحمل المرشح لدرجات الحرارة (سعد واخرون، 2009).

تعرف المسامية بانها طور موجود في معظم المواد السيراميكية المحضرة من اندماج المساحيق والمعاملة الحرارية، ويمكن وصفها بانها فراغات ولها مقاس وشكل وترتيب معين وغالبا ما يكون هناك اتصال او تشابك بين الاكثرية منها (Brownell, 1976).

قيم الباحثان (Albertus and Jean ،2011)، جودة مرشح سيراميكي لمعالجة المياه وهو مصنوع بطريقة الصب الانزلاقي، وباستخدام مادة ليثيوم سليكات ألالومينا مع النشاء، وتوصلوا الى أن المرشح فعال في توفير الحماية من البكتريا والمواد الصلبة العالقة الموجودة في المياه الطبيعية. وايضا استخدم مجموعة من الباحثين اربعة انواع مختلفة من المرشحات في جنوب افريقيا للترشيح المياه، واستنتجوا ان جميع المرشحات قللت من التلوث الكيميائي والبكتيري للماء المرشح من خلالها وبنسب متفاوتة(Mwabi،2011 ). وصنع الباحث زياد .Zyad R. Z، مرشحات الماء الخزفية الشمعية من المواد الاولية (الكاؤولين، فحم الخشب، والبورسيلين) وبحجم حبيبي اقل من 75 مايكرون وحرقت عند 1200م°. تم فحص المسامية، والامتصاصية، والكثافة الظاهرية، وفحص المواد الصلبة الذائبة كليا، وفحص العكورة، وتوصل الى افضل نسبة للمسامية هي 62.3% مع ازالة البكتريا البرازية *E.coli* وانخفاض درجة عكورة الماء(Zyad, 2013). وكذلك طور الباحثون غشاء عالي الترشيح من اطيان الكاؤولين كمادة اساسية مع استخدام نشأ الذرة و كحول البولي فينيل بطريقة الصب الانزلاقي وبدرجه حرارة (1150م°)، وتم الوصول الى ان الغشاء يمتلك نفاذية عالية تساوي 78 (لتراساعة. متر مربع. بار)، مع متوسط حجم مسام يصل الى 11 نانومتر ( Rekik and, Bouaziz, 2016).

الهدف من هذا البحث هو تصنيع مرشحات سيراميكية مسامية من مواد متوفرة محلياً رخيصة الثمن وسهلة التصنيع لترشيح المياه باستخدام الكاؤولين بحجم حبيبي (ناعم وخشن) فضلا عن الياف الجزر والفحم كمواد عضوية لخلق المسامية بنسب مختلفة ودراسة الخصائص الفيزيائية(المسامية الظاهرية والنفاذية) والنمو البكتيري للماء المرشح وكذلك حساب كفاءة المرشحات في ازالة المواد الصلبة العالقة.

## المواد المستخدمة وطريقة التصنيع:

### ١- تحضير المواد الخام

بالتعاون مع الشركة العامة للمسح الجيولوجي والتعدين تم جلب مادة الكاؤولين والمأخوذة من منطقة دويخلة غربي العراق والتحليل الكيميائي للكاؤولين موضح بالجدول(1). وتم استخدام حجمين حبيبيين للكاؤولين (45-63) مايكرون للناعم، (105-150) مايكرون للخشن فضلاً عن مادتي الفحم والياف الجزر كمواد عضوية تحترق في اثناء التلبيد لخلق المسامات بالاحجام الحبيبية (25) و(45) مايكرون على التوالي.

الجدول (1) يبين التحليل الكيميائي للكاؤولين والذي اجري بتقنية التحليل اللوني (Color Analysis).

| الاوكسيد | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | L.O.I | $TiO_2$ |
|---|---|---|---|---|
| % | 48.72 | 33.55 | 12.74 | 0.88 |

### عملية تشكيل النماذج:

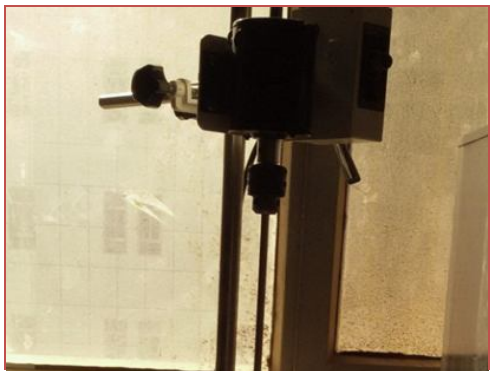
خُلِط الكاؤولين مع الفحم والياف الجزر بحسب النسب الوزنية المذكورة في الجدول (2) مع اضافة الماء بنسبة (140%) واضافة (6) قطرات من المواد المشتتة (سليكات الصوديوم) لكل (100) مل باستخدام خلاط ميكانيكي(كهربائي) كوري المنشأ المبين بالشكل (1)، ومزجهما جيدا للحصول على خليط متجانس يسمى الزلق ثم يصب هذا الزلق في القالب الجبسي (حيث تم إعداد قوالب تشكيل العينات باستخدام الماء والجبس الباريسي بعد خلط المادتين تم سكبها ببطء في اطار مربع الشكل مصنوع من الخشب وبابعاد معينة

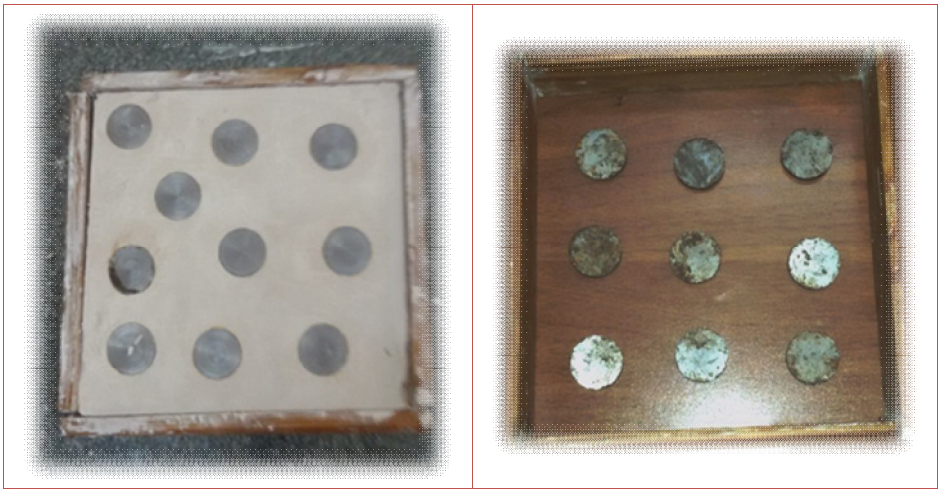
وبداخلها قطع من الحديد على شكل قرص بقطر(30 ملم) وسمك (5) ملم. وثم تركه في الهواء لمدة 24 ساعة لأزالة الماء بالكامل، وتم الحصول على قالب جبسي يتم من خلاله تحضير 10 عينات في نفس الوقت كما في الشكل (2).

الجدول (2) يبين نسب مكونات الخلطات السيراميكية.

| الياف الجزر % | الفحم % | كاؤولين % (ناعم والخشن) |
|---|---|---|
| – | – | 100 |
| 1 | 1 | 98 |
| 3 | 3 | 94 |
| 5 | 5 | 90 |
| 7 | 7 | 86 |
| 10 | 10 | 80 |
| 12 | 12 | 76 |

الشكل (1) الخلاط الميكانيكي.





الشكل (2) قالب الصب.

بعد ان شكلت النماذج تركت في الهواء لعدة أيام لتجف جفافاً اولياً طبيعياً ثم وضعت بعد ذلك في فرن تجفيف كهربائي بدرجة حرارة (100°م). اما الخطوة الأخيرة لإنتاج المرشح السيراميكي هي الحرق حيث أجريت عملية الحرق للنماذج بدرجة حرارية (1100 °م)، حيث كان برنامج الحرق هو برفع درجة الحرارة من درجة حرارة الغرفة الى(500°م) في ساعة ودقيقة ثم تركت النماذج لمدة نصف ساعة بالدرجة الحرارية نفسها ومن ثم رفعت درجة الحرارة مرة اخرى الى (1100°م) لمدة ساعتين ثم تركت النماذج في درجة حرارة التلبيد المطلوبة لمدة ساعة واحدة كزمن انضاج (Soaking Time) بعدها تم اطفاء الفرن.

**الفحوصات الفيزيائية:**

**المسامية الظاهرية (Apparent porosity):**

تعتمد المسامية الظاهرية .A.P على كمية الماء الممتص والذي يستطيع املاء المسامات المفتوحة حيث يتم حساب المسامية الظاهرية حسب قاعدة ارخميدس لايجاد اوزان النماذج وهي رطبة واوزانها وهي مغمورة في ماء او سائل وتحسب من العلاقة التالية (القيسي، 2003).

$$\text{Apparent Porosity (\%)} = \frac{Ws - Wd}{Ws - Wi} * 100\% \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث: $W_s$ : وزن النموذج وهو مشبع بالماء، $W_d$: وزن النموذج وهو جاف، $W_i$: وزن النموذج وهو معلق بالماء.

**النفاذية Permeability:**

النفاذية هي مقياس لقابلية المادة على إمرار الموائع فيها. وتدل النفاذية على موصلية الوسط المسامي بدلالة التغلغل للمائع في الجسم المسامي ولاتعتمد النفاذية على خواص المائع النافذ بالجسم بل تعتمد على خواص البنية المسامية (Dvllien, 1979).

تقاس النفاذية بشكل مباشر بإستخدام قانون Darcy's law (Poehls, 2009).

Permeability = (v * t)/ (T*A*H)..... (2).

Permeability: النفاذية (darcy).

v: حجم الماء المار في المرشح ($cm^3$)، t: سمك المرشح (cm)، T: زمن الجريان (Sec)، A: مساحة المقطع للمرشح ($cm^2$)، H: ضغط ارتفاع عمود الماء (cm).

**الفحص الحيوي للمرشح السيراميكي:**

في هذا الفحص يتم حساب كفاءة المرشح المصنع في ترشيح الماء من البكتريا، حيث جمعت عينات من ماء نهر دجلة في علب بلاستيكة معقمة ومرر الماء على المرشح المحضر من الكاؤولين والمواد العضوية. وبعدها اخذ الماء المرشح من المرشحات المصنعة وزرع في اوساط زرعية ( Culture media) وهي عبارة عن خليط من المواد التي تساعد على نمو البكتيريا. تم استخدام نوعين من الاوساط الزرعية وهي، الاوساط الاساسية (Nutrient agar)، والاوساط التفريقية (MacConkey agar).

وقد شخصت البكتيريا مجهرياً وباستخدام صبغة كرام. وتتم هذه الطريقة باخذ مسحة من المستعمرات النامية من البكتيريا باستخدام إلناشر ووضعها على السلايد وفرشها (نشرها) على السلايد بصوره متجانسة ومن ثم نثبت البكتريا على السلايد بواسطة لهب بنزن وبعدها تتم عملية الصبغة (صبغة كرام).

**كيفية التميز بين البكتيريا باستخدام صبغة كرام:**

يمكن التميز بين البكتيريا تحت المجهر الالكتروني (المايكروسكوب). حيث تاخذ البكتريا الصبغة البنفسجية فقط وتسمى موجبة لصبغة كرام، وتاخذ انواع اخرى صبغة الصفرانين وتظهر حمراء او زهرية

وتسمى بكتريا سالبة لصبغة كرام وبذلك يمكن تتميز هذين النوعين من البكتريا وتصنيفها، ويعتمد ذلك على الجدار الخلوي لكل نوع.

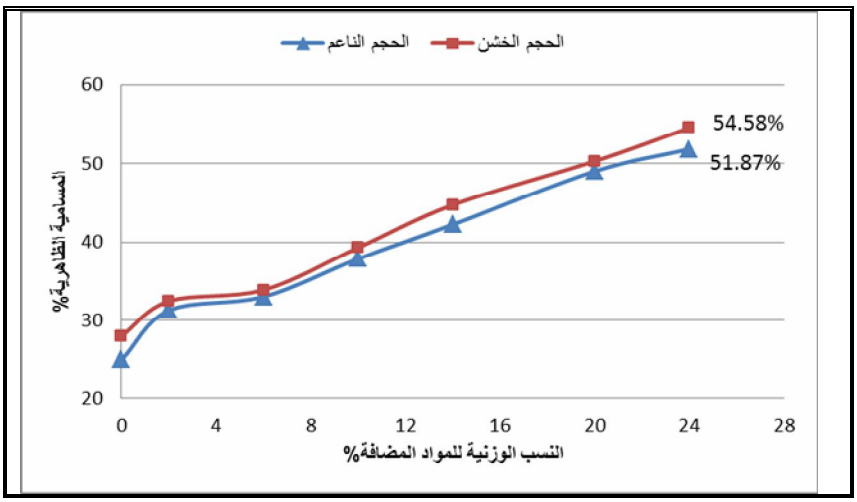
## النتائج والمناقشة:

### المسامية الظاهرية Apparent porosity:

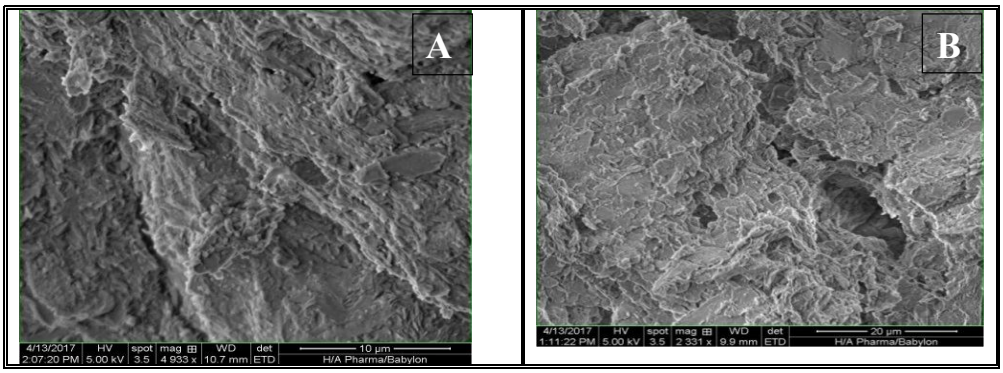
العلاقة بين المسامية الظاهرية ونسبة اضافة كل من (الياف الجزر والفحم) للمرشحات السيراميكية المصنعة موضحة في الشكل (3)، حيث نلاحظ ان زيادة نسبة الاضافة تؤدي الى زيادة المسامية الظاهرية، وذلك لان جسيمات المواد المضافة سوف تحترق خلال عملية تلبيد الجسم السيراميكي، فتعمل على خلق مسامات نتيجة خروج غازثنائي اوكسيد الكاربون ($CO_2$) والذي يزداد بزيادة الاضافة.

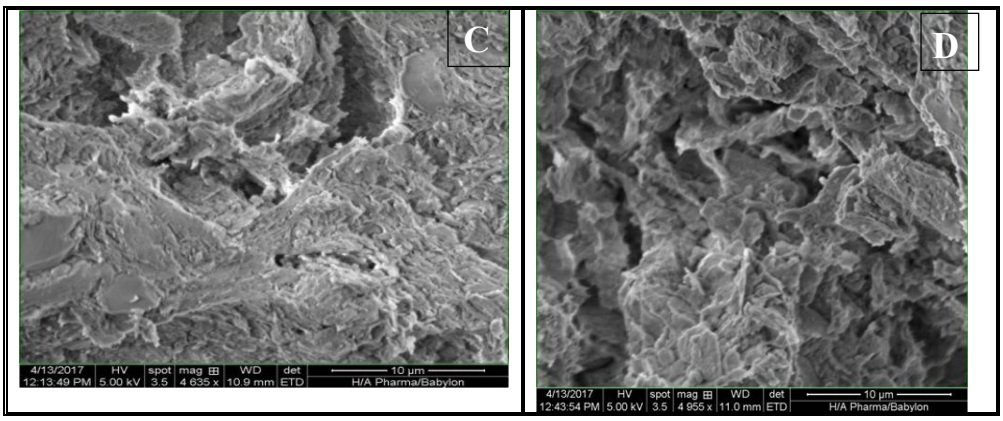
وتزداد المسامية الظاهرية مع زيادة الحجم الحبيبي للكاؤولين المستخدم. ان سبب هذه الزيادة يعود الى النقصان الحاصل في كمية الطور الزجاجي المتكون بسبب النقصان في المساحة السطحية وكذلك بسبب زيادة نسبة الفجوات والقنوات المتكونة بين الحبيبات حيث يكبر حجمها كلما كبر حجم الحبيبات (نوفل، 2008).

وهذا ما لوحظ من الصور التي تم الحصول عليها من فحص المجهر الالكتروني الماسح شكل(4). الشكل(A و B) تمثل صور النماذج المصنعة بالكاؤولين الناعم بنسب اضافة (2 و24%) على الترتيب، بينما (C و D) تمثل النماذج المصنعة بالكاؤولين الخشن بنسب اضافة (2 و24%) على الترتيب. حيث نلاحظ ان كمية المسامية في الصور تزداد بازدياد نسبة الاضافة و بزيادة الحجم الحبيبي للكاؤولين المستخدم في تصنيع المرشحات.




الشكل (3) يمثل علاقة المسامية الظاهرية مع النسب الوزنية للمواد المضافة.





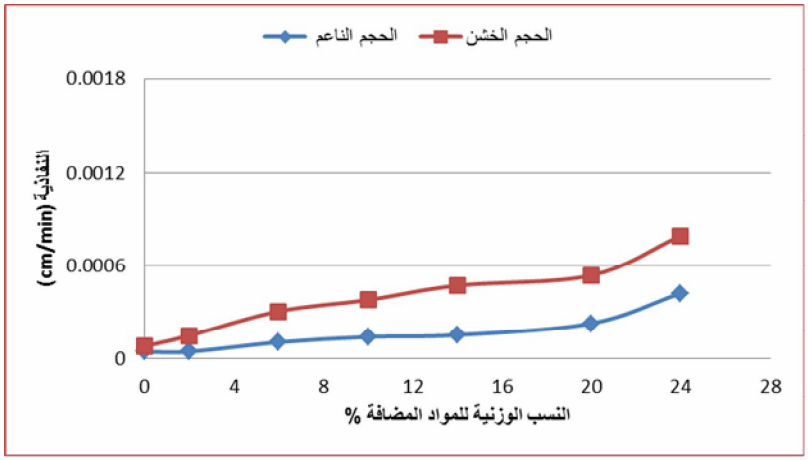

الشكل(4) يبين صور للمجهر الالكتروني الماسح. A: يمثل الحجم الناعم وبنسبة اضافة (2%)،B:الحجم الناعم بنسبة اضافة (24%)،C: يمثل الحجم الخشن وبنسبة اضافة (2%)،D:الحجم الخشن بنسبة اضافة (24%).

**النفاذية permeability:**

تتأثر نفاذية الأجسام السيراميكية بشكل أساسي بنسبة القنوات المفتوحة المتصلة بين مسامات الجسم وجدارها الخارجي . وكذلك تتأثر بشكل كبير بحجم المسامة(Kanaoka, 2001).

الشكل (5) يوضح قيم النفاذية للنماذج السيراميكية مع تغير نسبة الاضافة لالياف الجزر والفحم للحجمين المستخدمين للكاؤولين (الناعم والخشن). نلاحظ من الشكل زيادة قيمة النفاذية بزيادة نسبة المواد المضافة وذلك لان النفاذية تعتمد على المسامات المفتوحة للعينة والتي تنتج عند احتراق المواد المضافة. ان تدفق السائل يمكن ان يحدث فقط في المسامات التي تستمر وتتصل مع السطح. وهذا واضح بالشكل(4)، وتزداد ايضاً نسبة المسامات المفتوحة في النماذج المصنعة بالكاؤولين الخشن.

ويمكن تتبع تأثير الحجم الحبيبي على النفاذية فعند زيادة الحجم الحبيبي للكاؤولين نجد ان قيم النفاذية للنماذج المصنعة بالكاؤولين الخشن لها قيم اعلى من النماذج المصنعة بالكاؤولين الناعم وهذا يعود الى صعوبة تكون كمية أكبر من الطور الزجاجي والذي يرجع كما سلف ذكره إلى المسافات الكبيرة بين الحبيبات في حالة الحجم الحبيبي الأكبر وكذلك الى شكل المسامات المتكونة في النماذج السيراميكية المصنعة بالكاؤولين الخشن والتي تكون على شكل مسامات نافذة، وهذا ما لوحظ في الصور التي تم الحصول عليها من المجهر الالكتروني الماسح المبينة في الاشكال (4).

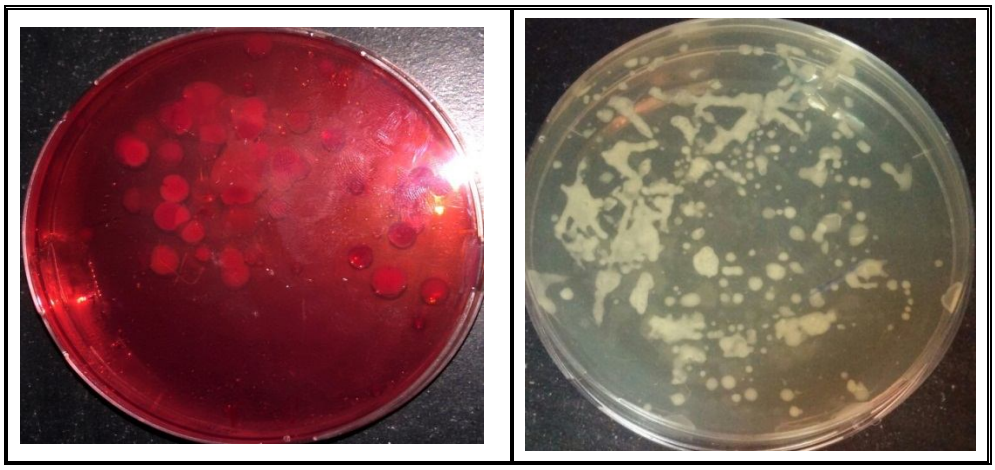



الشكل (5): يوضح علاقة النفاذية مع نسبة الاضافة باختلاف الحجم الحبيبي.

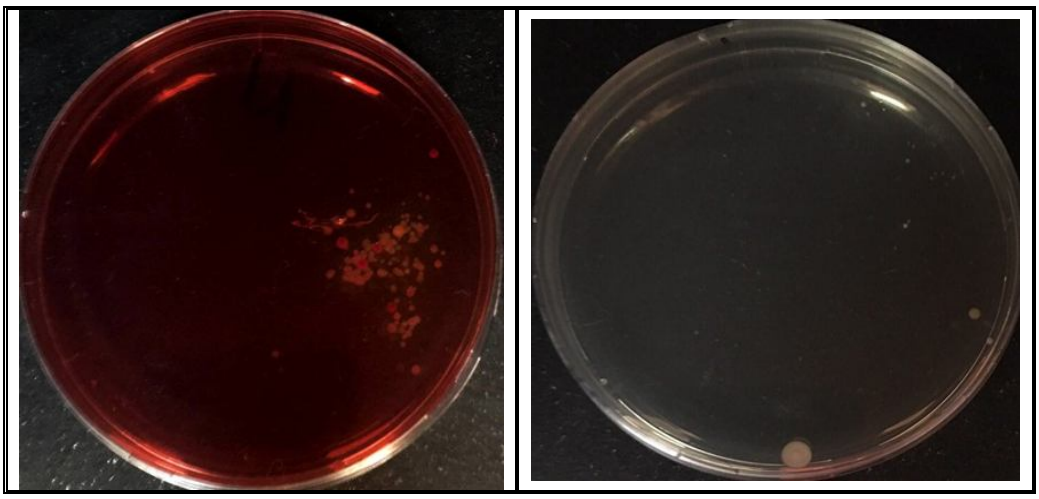
**تطبيقات المرشح السيراميكي المحضر:**

**فحص البكتريا المرضية:**

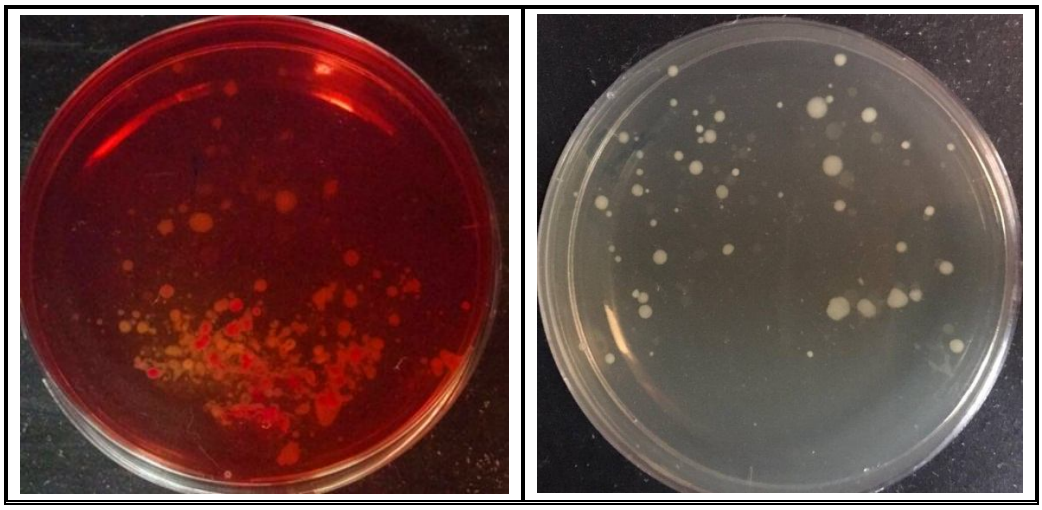
بعد اجراء اختبار زرع الماء المرشح بالمرشحات السيراميكية المصنعة بجميع النسب المختلفة من الكاؤولين والياف الجزر والفحم بينت النتائج واعتمادا على عدد المستعمرات التي ظهرت في اطباق البتري من وسط المرق الصلب ووسط الماكونكي الصلب وكما موضح بالاشكال الاتية. حيث يبين الشكل(6) شكل الاطباق قبل الترشيح، اما الاشكال(7)،(8) تبين شكل الاطباق للمرشحات المصنعه بالكاؤولين الناعم، والاشكال(9)،(10) شكل الاطباق للمرشحات المصنعة بالكاؤولين الخشن،حيث نلاحظ انه كلما زادت المسامية زادت اعداد البكتريا وكلما قلت المسامية سوف تقل اعداد البكتريا وبالتالي التلوث.



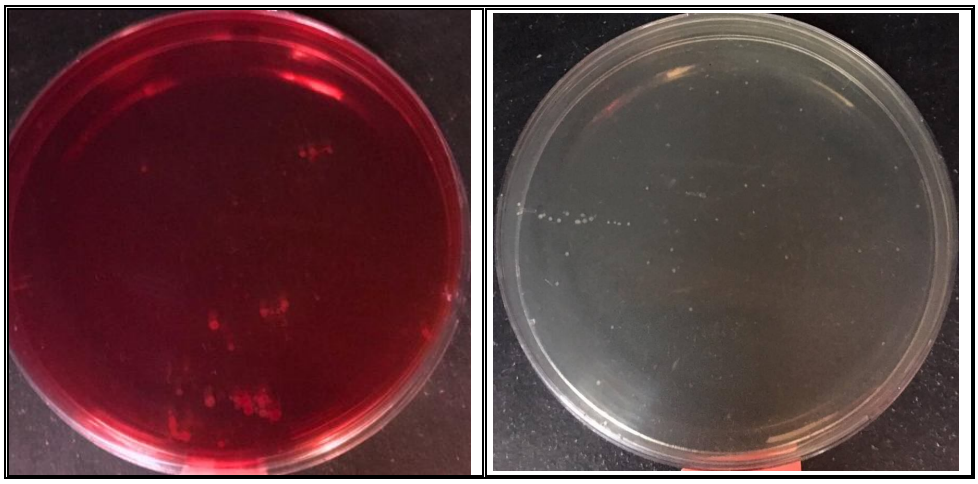
الشكل (6): يمثل نمو البكتريا بالماء الغير مرشح بالمرشحات المصنعة.



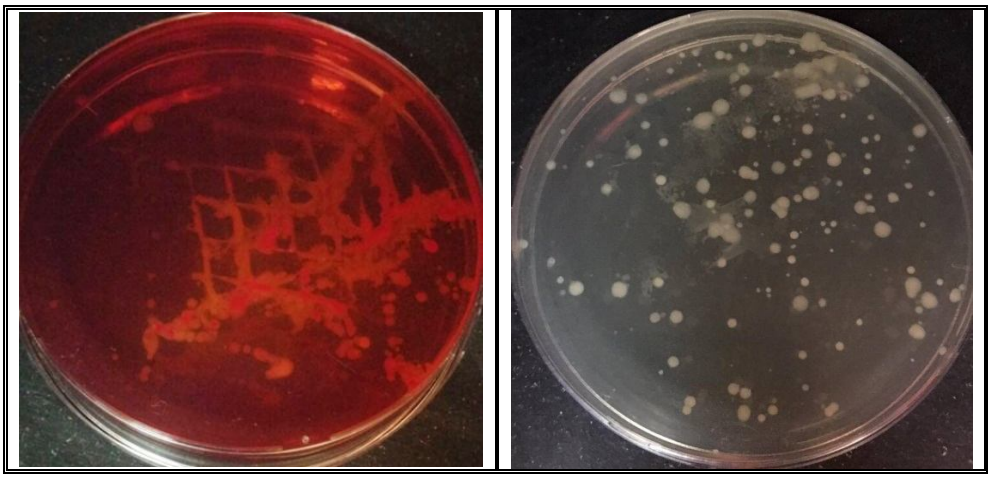
الشكل (7) : يمثل نمو البكتريا بالماء المرشح بالمرشحات المصنعة بالكاؤلين الناعم بسنبة اضافة 2%.



الشكل (8) : يمثل نمو البكتريا بالماء المرشح بالمرشحات المصنعة بالكاؤلين الناعم بنسبة 24%.

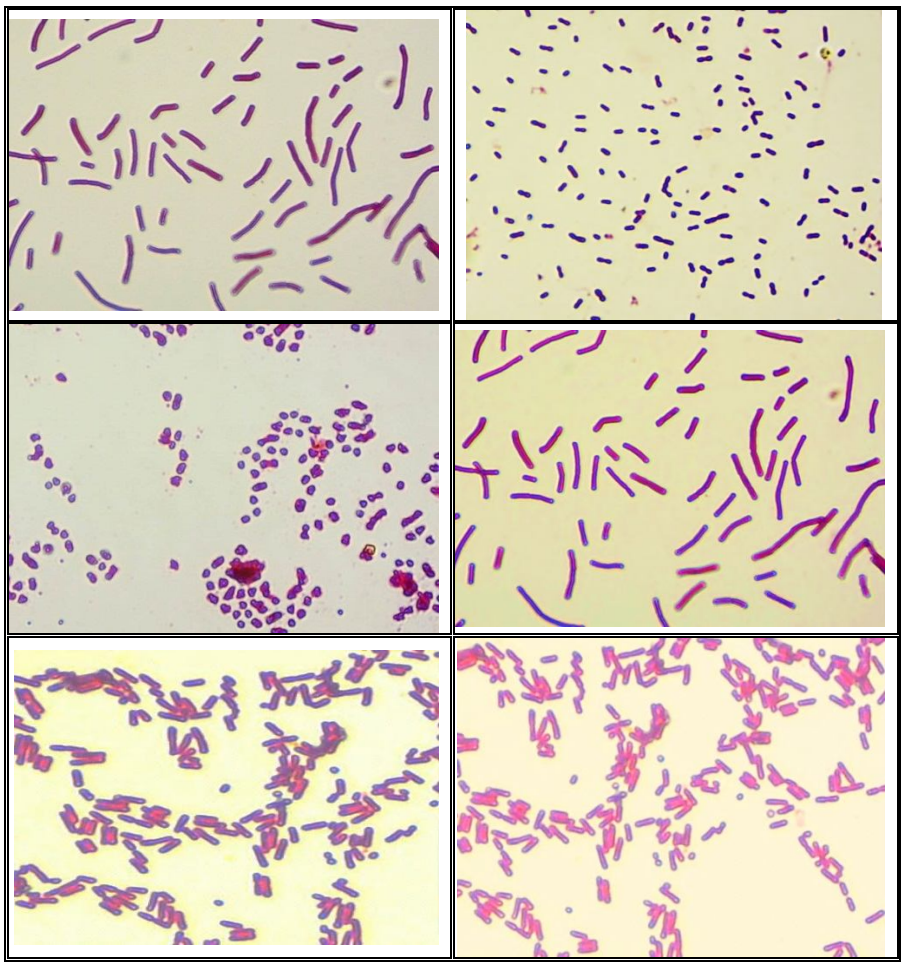


الشكل (9) : يمثل نمو البكتريا بالماء المرشح بالمرشحات المصنعة بالكاؤلين الخشن بنسبة 2%.



الشكل (10) : يمثل نمو البكتريا بالماء المرشح بالمرشحات المصنعة بالكاؤلين الخشن بنسبة 24%.

وعند اجراء الفحص التشخيصي للبكتريا التي نمت على الاوساط بالفحص المجهري بعد اجراء صبغة كرام للسلايدات تبين وجود بكتريا *E.coli* وبكتريا *Staphylococcus* وكما موضح بالشكل (11).

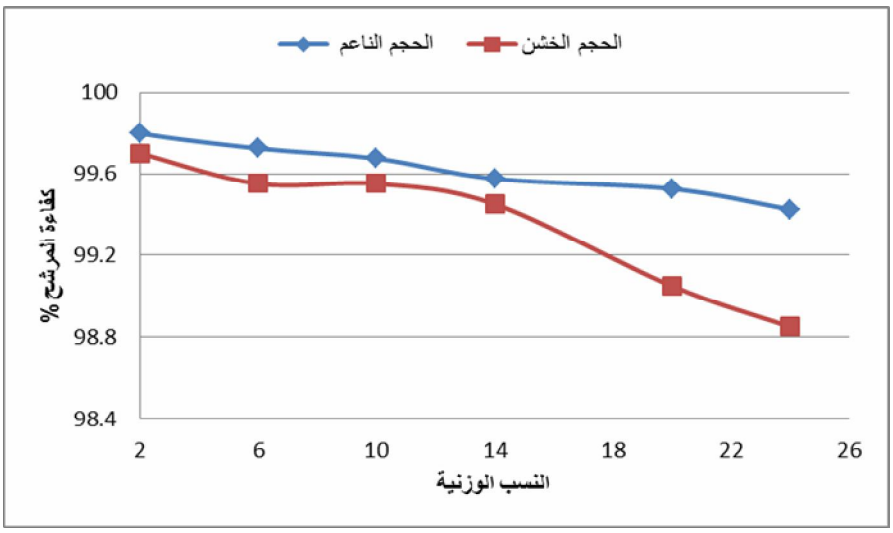


الشكل(11): يبين شكل البكتريا تحت المجهر بعد تصبيغها بصبغة كرام وبقوة تكبير (X100).

**فحص كفاءة المرشحات في ازالة المواد الصلبة العالقة:**

الشكل (12) يبين العلاقة بين كفاءة المرشح في ازالة المواد الصلبة العالقة ونسبة اضافة المواد العضوية (الفحم والياف الجزر) والحجم الحبيبي للكاؤولين المستخدم في تصنيع المرشحات، من الشكل نجد ان قيم الكفاءة في ازالة المواد الصلبة العالقة عالية جدا تتراوح بين (98.85– 99.875) وتتاثر بصورة مباشرة بالمسامات النافذة اوالمفتوحة الطرفين. حيث نلاحظ ان بزيادة نسبة الاضافة للمواد العضوية (الفحم والياف الجزر) سوف تقل كفاءة المرشح في ازالة المواد الصلبة العالقة، وذلك لان المواد العضوية المضافة سوف تحترق في اثناء التلبيد وتترك وراءها مسامات وبزيادة نسبة الاضافة سوف تزداد المسامات ولاسيما النافذة منها او المفتوحة ومِن ثمُ تؤدي الى مرور المواد العالقة خلال المرشح المصنع وبذلك تقل كفاءة المرشح في ازالة هذه المواد.

كذلك يمكن ان نلاحظ ان بزيادة الحجم الحبيبي تقل كفاءة المرشح في ازالة المواد العالقة وذلك لان نسبة المسامية في الحجم الحبيبي الخشن تكون اكبر من المسامية في الحجم الحبيبي الناعم والتي نوقشت في فقرة المسامية الظاهرية والنفاذية.




الشكل (12) يبين كفاءة المرشح السيراميكي في ازالة المواد الصلبة العالقة من الماء المرشح.

## الاستنتاجات:

- المواد العضوية (الفحم والياف الجزر) تعمل على زيادة المسامية بعد احتراقها
- المسامية الظاهرية ونسبة امتصاصية الماء والنفاذية للعينات المصنعة تزداد بزيادة كل من نسبة الاضافة والحجم الحبيبي للكاؤولين المستخدم.
- كفاءة المرشحات عالية جدا في ازالة البكتريا وازالة المواد الصلبة العالقة.

## المصادر

م.د. منتظر فاضل البطاط، 2009، "تلوث المياه في العراق وآثاره البيئية"، مجلة القادسية للعلوم الإدارية والاقتصادية المجلد (11) العدد (4).

عابد،عبد القادر سفاريني،غازي؛خوري، هاني؛ الريماوي،عمر؛ الباشا،سعد؛ عميرة،بلال؛ ابو كركي، نجيب، جرار، غالب، (2004)، "أساسيات علم البيئة"، دار وائل للطباعة والنشر،عمان،الاردن : ٣٢٣ص.

Xiandong.S,Xiaorong. H, 2003,"The characterization and water purification behavior of gradient ceramic membranes", Separation and Purification Technology, Volume 32, Issues 1-3, , Pages 73-79.

Kawamura, S.,1999."Design and operation of high-rate filters", J.AWWA, Vol. 91, No. 12: (77-90).

سعد بدري حسون فريد، فاضل عطية جياد، غازي كمال سعيد، 2009،" تحضير المرشحات بطريقة التحام الحبيبات السيراميكية بالطور الزجاجي"،المجلة العراقية للفيزياء، المجلد 10 العدد 30-36 صفحات.

Brownell, W.E.,1976, "Structural Clay Products", Springer verlag, New York.

Jean. J. S, Albertus. K. B,2011, "Evaluation of a low-cost ceramic micro-porous filter for elimination of common disease microorganisms", Physics and Chemistry of the Earth 36, 1129–1134.

Mwabi. J.K., F.E. Adeyemo, Mahlangu. T.O, Mamba. B.B, Brouckaert. B.M, Swartz. C.D, Offringa .G, Mpenyana-Monyatsi. L, Momba. M.N.B,2011, "Household water treatment systems: A solution to the production of safe drinking water by the low-income communities of Southern Africa", Physics and Chemistry of the Earth 36 1120–1128.

Zyad R. Z,2013,"DEVELOPEMENT THE PERFORMANCE OF CERAMIC CANDLE FILTERS FOR WATER PURIFICATION USING LOCALLY

MATERIALS", The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, Vol.13, No.1.

Rekik. S. B, Bouaziz. J, Deratani. A, Baklouti. S, 2016,"Development of an Asymmetric Ultrafiltration Membrane from Naturally Occurring Kaolin Clays: Application for the Cuttlefish Effluents Treatment", Journal of Membrane Science & Technology, Volume 6 • Issue 3, ISSN: 2155-9589.

القيسي، فوزي عبد العزيز،2003، "تقنيات الخزف والزجاج"،الطبعة الاولى،دار الشروق للنشر والتوزيع، عمان.

Dvllien E.A.L. ,1979, Porous media fluid transport and pore structure, p.395.

Poehls, D. J. and Smith, G. J., 2009. Encyclopaedic Dictionary of Hydrogeology. Elsevier, pp. 1-517.

نوفل زهير وهيب، 2008،" تصنيع مرشحات سيراميكية من زجاج الصودا لايم مع الرمل المحلي"، رسالة ماجستير، جامعة بابل.

Kanaoka Ch., Amornkitbamrung M.,2001, "Effect of filter permeability on the release of captured dust from a rigid ceramic filter surface", Japan.