

تحضير السيليكون النقي من الرمل السوري الخام

نوزت النبغلي*، عبدالرزاق حمال**

*أستاذ في قسم العلوم الأساسية، كلية الهندسة المدنية، جامعة حلب

**مدرس متمرّن في قسم العلوم الأساسية، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب

الملخص

تم في هذا البحث تحضير السيليكون النقي من الرمل السوري الخام المأخوذ من منطقة النبك، حيث أجريت العديد من الاختبارات الفيزيائية والكيميائية لتوصيف عينة الرمل المدروسة، ثم تم تنقية الرمل بالطريقة الحمضية الحرارية، بعدها تم طحن الرمل وفرزه لعدة حجوم حبيبية مزج كل منها مع بودرة معدن المغنيزيوم بنسبة مولية تعادل 1:2 (رمل:مغنيزيوم)

أجريت بعدها دراسة مفصلة لعلاقة مردود التفاعل بكل من درجة حرارة المعالجة، الحجم الحبيبي للرمل، زمن المعالجة، أثبتت النتائج امكانية تحضير السيليكون بمردود مرتفع يصل حتى 94% وفقاً للشروط الآتية: درجة حرارة المعالجة هي 800°C، الحجم الحبيبي للرمل أقل من 63µ، زمن المعالجة الحرارية 120min. كما دلت نتائج دراسة البنية السطحية للسيليكون المحضر أنه على شكل أنابيب نانوية وبلغت خشونة السطح Sa = 286 nm.

الكلمات المفتاحية: السيليكون-الرمل-الخامات الطبيعية

ورد البحث للمجلة بتاريخ 2023/7/17

قبل للنشر بتاريخ 2023/8/2

1-المقدمة

يعتبر عنصر السيليكون Si من أشباه المعادن وهو ثاني أكثر العناصر شيوعاً على سطح القشرة الأرضية بعد الأكسجين، وذلك بنسبة 27.72% من تكوين القشرة الأرضية. لا يوجد السيليكون حرّاً في الطبيعة وإنما مرتبطاً مع العديد من العناصر المختلفة ليشكل مركبات وبنى بلورية عديدة أهمها الكوارتز والسيليكات بأشكالها المتعددة. كما إن الوفرة الهائلة من السيليكون تجعله محل اهتمام عالمي كمادة كيميائية خام، وقد شجع تنوع مواصفاته الكيميائية على المزيد والمزيد من الاستخدامات التي يجب تطويرها من خلال البحث المكثف [1, 2].

إن أبرز تطبيقات السيلكون هي استخدامه في مجال إنتاج الطاقة المتجددة، حيث أنه تزداد أهمية مصادر الطاقة المتجددة يوماً بعد يوم، وتمثل الطاقة الشمسية إحدى أهم أنواع الطاقة النظيفة والمتجددة الواعدة حيث تشكل الخلايا الكهروضوئية السيليكونية ما يقرب من 90% من مجموع الخلايا الشمسية المصنعة والمستخدمه في جميع أنحاء العالم [3].

يعتبر السيلكون البلوري من أشباه الموصلات (أنصاف النواقل) الأكثر استخداماً في تطبيقات الطاقة الشمسية نظراً لانخفاض تكلفه إنتاجه وكفاءة التحويل العالية نسبياً التي يتمتع بها، بالتالي فإن إنتاج السيليكون بتقنية فعالة من حيث التكلفة وصديقة للبيئة أصبح أمراً بالغ الأهمية [4-6].

يستخدم السيليكون المعدني والكوارتز ذو النقاوة العالية في تطبيقات السيليكون الكهروضوئية، ويمثل الكوارتز أحد الأشكال البلورية للسيليكا (SiO_2)، حيث يتواجد في مجموعة متنوعة من الصخور المتحولة، بما في ذلك الجرانيت والبيغماتيت، كما يتواجد الكوارتز في الكثبان الرملية [7-10].

الرمل عبارة عن صخور متفتتة ناتجة عن تأثير عوامل تعرية الصخور، فهي تنتج بالبداية على شكل كتل صخرية مدبية لا تلبث أن تستدير نتيجة لنقلها بالسيول والأنهار، وتتحول إلى حصى مستديرة لا تحوي زوايا حادة [11-15].

يتواجد السيليكون في الرمل على شكل ثنائي أكسيد السيليسيوم وهو المكون الأساسي في الرمل، حيث يتواجد وفق عدة أشكال بلورية ويتحول من شكل لآخر بتطبيق شروط محددة (حرارة-ضغط) وأهم الأشكال كما يأتي:

1-الكوارتز: وهو فلز شائع الانتشار في القشرة الأرضية فهو موجود في معظم الأنواع المختلفة من الصخور: الصخور النارية، الصخور المتحولة، والصخور الرسوبية. له بريق زجاجي، وعند تحطيم أو كسر بلوراته فإن مكسره) سطحها المنكسر (يكون منحنيًا ومشابهاً إلى حد بعيد لسطح الصدفة البحرية. تتألف بلورات الكوارتز النقية الشفافة من ثنائي أكسيد السيليسيوم SiO_2 بنسبة 100%، أما بلوراته الملونة فتحتوي على بعض الشوائب التي تعطيها ألواناً مختلفة. يمكن تصنيف الكوارتز إلى نوعين تبعاً لدرجة حرارة تشكله وهما:

-الكوارتز منخفض الحرارة α -Quartz: يتبلور عند درجة حرارة أقل من $573^\circ C$ وفق المنظومة الثلاثية وهو من أكثر أنواع الكوارتز وجوداً في الطبيعة (تسمية خام الكوارتز يقصد بها عادة هذا الشكل). يتحول بالتسخين إلى شكل آخر هو β -الكوارتز بدءاً من درجة الحرارة $573^\circ C$ وضغط 1 atm وتدعى هذه العملية الإنعكاس، لأنها تتضمن تغير طفيف في شكل ذرات السيليسيوم والأكسجين مع بقاء نفس التركيب البلوري، إن هذه العملية عكوسة (عند التبريد يعود الكوارتز إلى حالته البدائية) و كثافته α -الكوارتز هي 2.65 g/cm^3 .

-الكوارتز عالي الحرارة β -Quartz: يتبلور في المجال $(573-879)^\circ C$ وفق المنظومة السداسية الهرمية المضاعفة، كثافته 2.53 g/cm^3 [11-15].

2-التريديميت: يتبلور التريديميت في المجال الحراري $(870-1470)^\circ C$ وفق المنظومة السداسية ويسمى عندها β -Tridymite، أو التريديميت المرتفع، كثافته 2.26 g/cm^3 وقرينة انكساره 1.479، بينما الأشكال التي تتشكل عند درجة حرارة منخفضة فهي تتبلور وفق المنظومة المعينية القائمة وتسمى α -Tridymite أو التريديميت المنخفض، كثافته 2.27 g/cm^3 وقرينة انكساره 1.473، إن خام التريديميت ذو لون أبيض أو أبيض رمادي، أحياناً عديم اللون، مسحوقه ذو لون أبيض يتمتع

ببريق زجاجي، يتحول التريديميت المنخفض مع مرور الزمن إلى Quartz- α [11-15].

3-الكريستوباليت: سُمي بهذا الاسم نسبة لمكان العثور عليه (سان كريستوبال) في المكسيك. يتبلور في المجال الحراري $^{\circ}\text{C}$ (1710-1470) وفق المنظومة المكعبية ويسمى β -Cristobalite، الذي يتواجد بشكل ثماني الوجوه، تبلغ كثافته 2.20g/cm^3 ، قرينة انكساره 1.479، وعند تبريد الخام إلى الدرجة 268°C تتغير منظومته البلورية وتصبح رباعية، حيث يسمى α -Cristobalite، كثافته 2.32g/cm^3 وقرينة انكساره 1.487 لون هذا الخام أبيض، ويتمتع ببريق زجاجي، لون مسحوقه أبيض.

4-الكويسيت: يتبلور وفق المنظومة أحادية الميل، بلوراته عديمة اللون ذات أشكال موشورية متطاولة أو مسطحة. كثافته $(3.01-2.91)\text{g/cm}^3$ ، يتواجد بشكل تجمعات حبيبية غير منتظمة ويتشكل عند درجات حرارة مرتفعة $(800-500)^{\circ}\text{C}$ وبوجود الضغط المرتفع 35K.bar، قرينة انكساره 1.594، يتواجد في مناطق سقوط النيازك، وفي صخور الغرانيت [11-15].

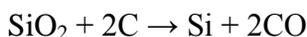
5-الستيشوفيت: يتبلور وفق المنظومة الرباعية، إلا أن بُنيته البلورية تكون من نمط الروتيل، بلوراته عديمة اللون، كثافته $(4.35-4.28)\text{g/cm}^3$ ، تتواجد بلوراته بشكل تجمعات شعرية أو أبرية ونادراً ما تكون مسطحة.

6-الكياتيت: هو أحد أشكال الكوارتز المصنعة مخبرياً (لا يتواجد في الطبيعة) بلوراته عديمة اللون، وهي تتبلور وفق المنظومة الرباعية. كثافته 2.50g/cm^3 وقرينة انكساره 1.522 [11-15].

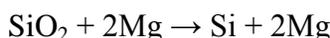
ينتشر الرمل في مناطق واسعة من الجمهورية العربية السورية، حيث تقدر كميته بأكثر من مليار طن وذلك بحسب تقديرات المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة المعدنية في الجمهورية العربية السورية، وأبرز التوضعات الرملية هي: توضعات القرنتين، توضعات جبل البشري، توضعات الثنايا، وتوضعات السحل حيث تحتوي

شوائب مختلفة نوعاً وكماً مما يجعلها قابلة للاستخدام في مجالات صناعية متعددة وبشكل رئيس في صناعة الزجاج ومواد البناء [11-15].

يمكن تحضير السيليكون Si النقي بتفاعل ارجاع لثنائي أكسيد السيليسيوم SiO_2 باستخدام فحم الكوك كعامل مرجع عند درجة حرارة عالية تصل إلى $1700-2200^{\circ}C$ وفق التفاعل الآتي:



كما يمكن أن يستخدم مسحوق المغنيسيوم بدلاً من فحم الكوك كعامل ارجاع الا أن هذا التفاعل يحتاج لدرجة حرارة أقل من التفاعل السابق تقدر بحوالي $800^{\circ}C$:



2- أهمية البحث وأهدافه The Importance of this Work and its Aims

يعتبر السيليكون من أهم العناصر المستخدمة في الصناعات الحالية ولا يوجد مصدر محلي لهذه المادة وإنما تؤمن عن طريق الاستيراد بالقطع الأجنبي، كما أن توافر الرمل بكميات كبيرة في الأراضي السورية يجعل اجراء دراسة انتاج السيليكون من الرمل المحلي أمراً ضرورياً ويفتح المجال أمام صناعات جديدة ويساعد على النهوض بالمستوى الاقتصادي.

3- القسم العملي Experimental Section

3-1- الأجهزة والكواشف المستخدمة Apparatus and Reagents

3-1-1- الأجهزة Apparatus.

- جهاز التحليل بالأشعة السينية التآلفية (XRF)، والذي يعمل بجهد (50 kv)، صنع شركة Panalytical. جامعة بايروت-ألمانيا.
- جهاز الأشعة السينية الإنعراجية (XRD)، بفلتر من النيكل Ni، وإشعاع CuK_{α} ، وطول الموجة ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$)، يعمل عند (40kv&20 mA) صنع شركة Panalytical. جامعة بايروت-ألمانيا.
- فرن كهربائي يعمل حتى درجة الحرارة $1700^{\circ}C$ مزود بعدة أنظمة تسخين، من إنتاج شركة Carbolite الانكليزية. الهندسة المدنية-جامعة حلب.
- مجهر القوة الذرية Nano surf -AFM كلية العلوم-جامعة حلب.

- جهاز تحديد التدرج الحبيبي ذو المناخل القياسية، صنع شركة Retch طراز (AS.200).
- مطحنة بورسلانية مخبرية سعة 5kg مع كرات طحن مختلفة الحجم. فرن تجفيف يعمل حتى الدرجة 200°C انتاج شركة JANAT.
- ميزان تحليلي حساس من نوع Denver Instrument نموذج AA-200 حساسيته 0.1mg ± أمريكي.

2-1- المواد الكيميائية Chemical Materials

- حمض كلور الماء النقي (HCl 36%)
- حمض فلور الماء النقي (HF 38%)
- بودرة مغنيزيوم نقيه (Mg %96)

جميع المواد من انتاج شركة Sigma-Aldrich

3-2- طرائق العمل

يتألف العمل المخبري من المراحل الآتية:

3-2-1- جمع عينات من الرمل الخام وتوصيفه

جمعت عينات الرمل من توضعات منطقة النبك وفق الطرائق الدولية المتبعة (ASTM C-33) أي بطريقة الأرباع, حيث أخذت من عدة مستويات في كومة الرمل ثم مزجت العينات مع بعضها بشكل جيد ثم تم إجراء الاختبارات اللازمة لتوصيف عينة الرمل وفق مايلي:

✦ الكثافة

أخذ 10g من الرمل المجفف عند الدرجة 105°C حتى ثبات الوزن ووضع في دورق حجمي وأكمل الحجم بالأسيتون بواسطة سحاحة إلى التدريجة النهائية مع الرج جيداً للتخلص من الفقاعات الهوائية، ومن الفرق بين حجم الدورق الحجمي وحجم الأسيتون المضاف من السحاحة حدد حجم العينة، ثم طبقت العلاقة التالية:

$$\frac{\text{الكثافة}}{\text{الحجم}} = (\text{g/cm}^3)$$

♦ الفاقد بالحرق

أخذ 10g من الرمل الجاف، ثم وضع في فرن درجة حرارته $(1000 \pm 50)^\circ\text{C}$ لمدة ساعة (أو حتى ثبات الوزن). حسبت النسبة المئوية للفاقد بالحرق من العلاقة التالية:

$$\% \text{الفاقد بالحرق} = \frac{\text{وزن العينة قبل الحرق} - \text{وزن العينة بعد الحرق}}{\text{وزن العينة قبل الحرق}} \times 100$$

♦ تحديد كمية المواد الغضارية المرافقة للرمل

أخذ 100g من الرمل الجاف وغسل عدة مرات بالماء المقطر حتى تتم إزالة المواد الغضارية عنها، ثم جفف حتى ثبات الوزن وحدد وزنه وحسبت كمية المواد الغضارية بالعلاقة الآتية:

$$\% \text{المواد الغضارية} = \frac{\text{وزن العينة قبل الغسيل} - \text{وزن العينة بعد الغسيل}}{\text{وزن العينة قبل الغسيل}} \times 100$$

♦ المقاومة الحمضية

أخذ 10g من الرمل الجاف، ثم غمرت العينة في محلول حمض كلور الماء تركيزه 15% لمدة 24 ساعة. بعدها غسلت العينة بالماء المقطر وجففت بشكل جيد عند الدرجة 105°C ، ثم حدد وزنها، حددت النسبة المئوية للمقاومة الحمضية من العلاقة:

$$\% \text{المقاومة الحمضية} = \frac{\text{وزن العينة قبل المعالجة} - \text{وزن العينة بعد المعالجة}}{\text{وزن العينة قبل المعالجة}} \times 100$$

♦ التحليل الكيميائي

حدد التركيب الكيميائي للرمل المدروس باستخدام الأشعة السينية (XRF) وفق الخطوات الآتية: طحن 25g من الرمل الجاف في مطحنة السحق لمدة 5min، ثم أخذ 10g من الرمل المطحون ومزج مع 3g من مسحوق حمض البور بشكل جيد ووضع المزيج بقالب من الألمنيوم، ثم ضغطت العينة بقوة حوالي 150 KN، وبعد عملية الضغط تم الحصول على عينة بشكل قرص دائري بقطر 30mm وبسماكة 5mm، ثم نقلت العينة مع الحامل إلى حجرة التحليل.

♦ تحديد الأطوار البلورية

حددت الأطوار باستخدام جهاز الأشعة السينية الإنعراجية XRD الذي يضم فلتر من النيكل وإشعاع $Cu K\alpha 1$ وطول موجة $(\lambda=1.5405\text{\AA})$.

3-2-2-2-تنقية الرمل

تمت تنقية الرمل الخام بهدف التخلص من الشوائب المرافقة لتحسين خواص السيليكون المراد تحضيره، وتمت المعالجة على ثلاث مراحل:

- غريلة لإزالة المركبات العضوية (التي تكون ذات حجم حبيبي صغير) ثم غسيل بالماء للتخلص من معظم المركبات العضوية المتبقية.
- معالجة بحمض كلور الماء الممدد بنسبة (1:1) مع التسخين للدرجة $80^{\circ}C$ والتحرك لمدة 60min للتخلص من أكاسيد الحديد والكربونات.
- غسيل نهائي بالماء المقطر، ثم تجفيف عند الدرجة $105^{\circ}C$.
- طحن الرمل بعد التنقية، ومن ثم تصنيفه إلى عدة مجموعات بحسب الحجم الحبيبي باستخدام مناخل قياسية مثبتة على هزاز كهربائي، أما الأحجام الحبيبية فكانت أقل من 63μ , $(63-100)\mu$, $(100-160)\mu$, $(160-300)\mu$ التي تمثل النسبة العظمى من حجم الرمل المطحون والتي اعتمدت لإجراء الدراسة اللاحقة.

3-2-3-تحضير السيليكون ودراسة خواصه

تم تحضير السيليكون من الرمل المعالج والنقي وفق الخطوات الآتية:

1. تجفيف كل من الرمل المعالج وبودرة المغنيزيوم عند الدرجة $105^{\circ}C$ لمدة ساعتين لضمان عدم وجود أي رطوبة تؤثر على التفاعل اللاحق.
2. تحضير مزيج من الرمل مع بودرة المغنيزيوم وذلك بحسب الأمثال التفاعلية أي $(1:2) (SiO_2:Mg)$ وطحن المزيج بهاون بشكل جيد لتشكيل مزيج متجانس.
3. معالجة المزيج عند درجات حرارة مختلفة $(700-750-800-900)^{\circ}C$ لمدة ساعتين.

4. تبريد مزيج التفاعل ثم معالجته بحمض كلور الماء الممدد بنسبة 1:3 ثم بالماء المقطر للتخلص من أكسيد المغنيزيوم الناتج والمغنيزيوم غير المتفاعل وبقية المركبات الشائبة Mg_2Si المتشكلة للحصول على السيليكون مع نسبة من السيليكا غير المتفاعلة.

5. معالجة السيليكون الناتج بمحلول ممدد من حمض فلور الماء تركيزه 5% للتخلص من السيليكا غير المتفاعلة ورفع نقاوة السيليكون المنتج.

6. غسيل السيليكون بالماء المقطر عدة مرات وتجفيفه وحفظه لاجراء الاختبارات اللاحقة (XRD, AFM).

لدراسة البنية السطحية للسيليكون المحضر تم ضغط السيليكون المحضر على شكل قرص بقطر 1cm وسماكة 1mm استخدام قالب معدني اسطواني ومكبس هيدروليكي، تثبت العينة في حجرة المسح الضوئي العازلة للضوضاء والهواء ويُمسح سطح العينة بإبرة ذات رأس صغير من رتبة (nm) ذات حركة ميكانيكية دقيقة حيث يمكن التحكم بسرعة عملية المسح وإبطائها لإعطاء صورة ذات دقة عالية، كما يتيح الجهاز قياس أقطار الحبيبات وارتفاعاتها على السطح.

3-3-3 النتائج والمناقشة Results and Discussion

3-3-1- مواصفات الرمل Specifications of Sand

بينت نتائج الاختبارات للرمل الخام والموضحة في الجدولين رقم (1) ورقم (2) بأنه يحتوي على نسبة 92.62% من ثنائي أكسيد السيليسيوم SiO_2 بالإضافة لمجموعة من الشوائب أهمها أكسيد الحديد، أكسيد الألمنيوم، وكربونات الكالسيوم، أما بعد عملية التنقية، فقد ارتفعت نسبة ثنائي أكسيد السيليسيوم SiO_2 من 92.62% إلى 98.10% وانخفضت نسبة جميع الشوائب المرافقة، كما ازدادت كثافة الرمل ومقاومته الحمضية وتغير لون حبيبات الرمل من البرتقالي المصفر إلى الأبيض (نتيجة إزالة مركبات الحديد)، وهذه النتائج تدل على تحسن خواص الرمل واكتسابه مما يؤثر بشكل إيجابي على خواص السيليكون المراد تحضيره.

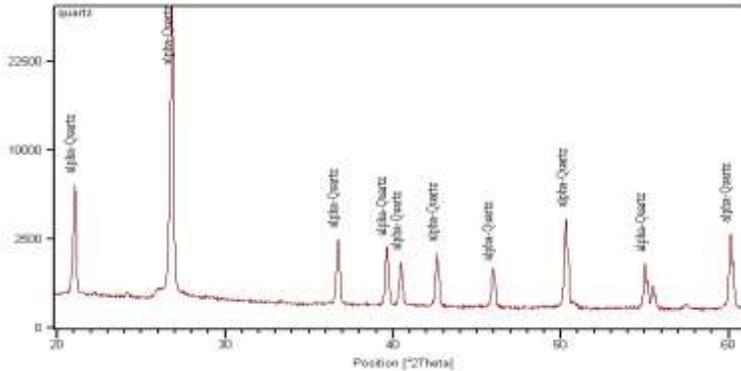
الجدول رقم (1) التحليل الكيميائي للرمل قبل وبعد المعالجة

المكون	قبل المعالجة %	بعد المعالجة %
SiO ₂	92.62	98.10
Al ₂ O ₃	1.29	0.78
Fe ₂ O ₃	1.26	0.03
CaO	5.77	0.51
MgO	0.43	0.27
SO ₃	0.01	0.00
K ₂ O	0.21	0.07
Na ₂ O	0.06	0.01
L.O.I	1.04	0.24

الجدول رقم (2) الخواص الفيزيائية للرمل قبل وبعد المعالجة

الخاصية	قبل المعالجة	بعد المعالجة
الكثافة (g/cm ³)	2.51	2.53
المواد الغضارية (%)	0.952	0.012
المقاومة الحمضية (%)	1.19	0.084
اللون	برتقالي مصفر	أبيض

تبين من خلال تسجيل طيف الأشعة السينية الإنعراجية XRD الموضح بالشكل رقم (1) أن الرمل بعد عملية التنقية يحتوي بشكل أساسي على الكوارتز بشكل بلورات رباعية الوجوه وبنقاوة عالية مع وجود قمم صغيرة تشير إلى وجود مركبات ثانوية أخرى بنسب ضئيلة جداً مثل الفلدسبار والهيماتيت وهذا يتوافق مع نتيجة التحليل الكيميائي.



الشكل رقم (1) طيف XRD للرمل الخام المدروس بعد التنقية

3-3-2- مواصفات السيليكون المحضر Specifications of prepared silicon

كان السيليكون الناتج بعد عملية التنقية على شكل بودرة ذات لون بني غامق وتم تحديد مردود التفاعل بتطبيق العلاقة:

$$\% \text{مردود السيليكون} = \frac{\text{وزن السيليكون الناتج}}{\text{وزن الرمل المستخدم}} \times 100$$

أوضحت نتائج حساب المردود تأثيراً واضحاً وقد أثرت درجة حرارة المعالجة بمردود التفاعل كما هو موضح بالجدول رقم (3)، فقد كان المردود ضعيفاً لدى المعالجة عند الدرجة 700°C حوالي 67% أما عند الدرجة 800°C ارتفع المردود إلى 91% وهو المردود الأفضل، يعود الانخفاض بالمردود بعد هذه الدرجة لتشكيل ثانوية نتيجةً لتفاعل السيليكون الناتج مع الأكسجين أو مع المغنيزيوم، لذا فمن غير المجدي إجراء التفاعل عند درجة حرارة أعلى من 800°C وهذا يتوافق مع المراجع الموضحة بالقسم النظري من هذا البحث.

الجدول رقم (3) تأثير درجة حرارة المعالجة على مردود التفاعل

درجة حرارة المعالجة °C	700	750	800	900
المردود %	67%	84%	91%	89%

بعد اختيار درجة الحرارة 800°C كأفضل درجة حرارية للمعالجة تم دراسة تأثير الحجم الحبيبي للرمل على مردود التفاعل وأدرجت النتائج في الجدول رقم (4)، حيث نلاحظ بأن أفضل مردود كان باستخدام رمل حجمه الحبيبي أقل من 63µ نتيجةً لزيادة السطح النوعي بالتالي تزداد مساحة سطح التفاعل. أما بالنسبة لزمن التفاعل فقد تم اختيار الزمن 120min بناءً على تجارب أولية لاحظنا من خلالها ثبات الوزن عند هذا الزمن للتفاعل، وثبات قيمة المردود مهما ازدادت فترة المعالجة لمدة أطول.

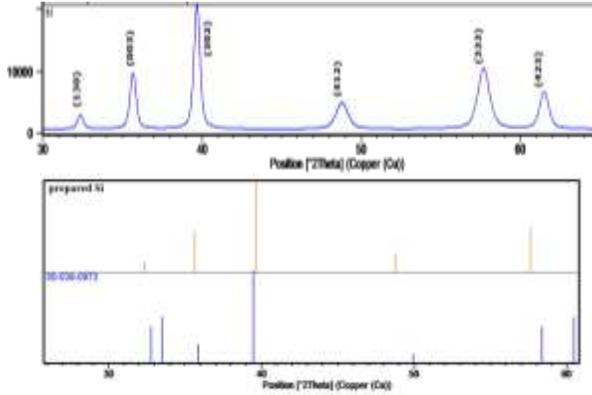
الجدول رقم (4) تأثير الحجم الحبيبي للرمل على مردود التفاعل

الحجم الحبيبي للرمل µ	أقل من 63	63-100	100-160	160-300
المردود %	94%	91%	79%	43%

استُخدمت مطيافية الأشعة السينية لمعرفة الخصائص البنوية للسيليكون المحضر، حيث تم تعيين بنية المركب ومعاملات بنوية مثل ثوابت الشبكة البلورية

(a, b, c) والمسافة بين المستويات البلورية المتوازية (d_{hkl}) وحجم التبلور (D) وكثافة إنخلاعات البنية البلورية δ وانفعال الشبكة البلورية.

يبين الشكل رقم (2) طيف XRD لبنية السيليكون النقي المحضر مخبرياً مع طيف XRD لمرجعي فيلاحظ التوافق التام بين قمم طيف السيليكون المحضر والكود المرجعي 00-039-0973.



الشكل رقم (2) طيف XRD لبنية السيليكون النقي المحضر مخبرياً

بالاعتماد على قانون براغ لانعراج الأشعة السينية يمكن تعيين المسافة بين المستويات البلورية المحددة بقرائن ميلر (hkl) كمايلي:

$$2d_{hkl} \sin(\theta_{hkl}) = n\lambda$$

حيث:

- d_{hkl} المسافة بين المستويات البلورية المتوازية وفق الاتجاه hkl
- θ_{hkl} زاوية الانعراج
- n رتبة الانعراج
- λ طول موجة الأشعة السينية ($\lambda = 1.5401 \text{ \AA}$)

تحسب المسافة بين المستويات المتوازية بدلالة ثوابت الشبكة البلورية للبنية رباعية الشكل وثوابت الشبكة وفقاً للعلاقة التالية:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

يمكن تعيين معاملات أخرى من طيوف الأشعة السينية كما يلي:
بالاعتماد على علاقة Debye-Scherer وفق القانون التالي:

$$\beta_{hkl} = \frac{k\lambda}{D \cos \theta_{hkl}}$$

حيث β_{hkl} عرض منتصف الشدة لقمة الانعراج الموافقة للمستوي hkl ،
k ثابت يساوي 0.94 في حال الجسيمات الكروية، $\lambda = 1.5401 \text{ \AA}$ طول موجة الأشعة
السينية، D حجم التبلور، θ_{hkl} زاوية الانعراج الموافقة للمستوي hkl .
يمكن الإشارة إلى أنه يمكننا استخلاص بعض الخصائص الميكانيكية باعتماد على
علاقة Debye-Scherer من خلال القياسات البنيوية أيضاً مثل:

• **كثافة الانخلاعات δ** : تعني طول خط الانخلاع في واحدة حجم البلورة، حيث
يمكننا حساب كثافة الانخلاعات (δ) من خلال طيف انعراج الأشعة السينية
من العلاقة التالية:

$$\delta = \frac{n}{D^2}$$

حيث n هو ثابت يعادل الواحد وذلك بغية الحصول على أدنى قيمة لكثافة
الانخلاعات.

• **معامل الإجهاد أو الشد (انفعال الشبكة البلورية ε)**: يحسب من العلاقة التالية:

$$\varepsilon = \beta \cos \theta / 4$$

يوجد قانون ثاني لإيجاد انفعال الشبكة البلورية (القيمة الوسطى لانفعال الشبكة
البلورية) يعبر عنه بالعلاقة التالية:

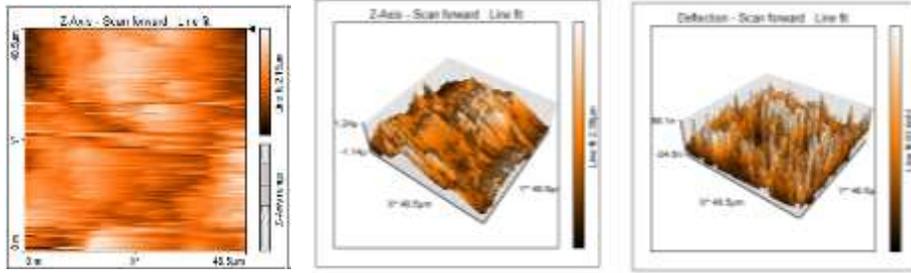
$$\varepsilon = \beta / 4 \tan \theta$$

حيث: β عرض المنتصف لقمة انعراج الأشعة السينية التابعة للمستوي المحدد وتقاس
بالراديان، θ الزاوية الموافقة لقمة انعراج المستوي المحدد مقاسة بالدرجات، يبين الجدول
رقم (5) نتائج هذه التجارب.

الجدول (5) مقياس التبلور وانفعال الشبكة البلورية وكثافة الانخلاعات للسليكون المحضر

Sample	2θ	hkl	d (Å)	مقياس التبلور D(nm)	كثافة الانخلاعات δ $10^{14} (\text{lines} \cdot \text{m}^{-2})$	انفعال الشبكة البلورية ε $(10^{-4} \text{lines}^{-2} \cdot \text{m}^{-4})$	β_{hkl}°
Si	39.642	302	2.273	35.282	8.032	10.37	0.4212

كما دلت نتائج التحليل بمجهر القوة الذرية AFM من خلال الصور ثنائية وثلاثية الأبعاد لسطح عينة السيليكون المحضر المأخوذة من زوايا مختلفة ووفقاً لبرنامج Nanosurf بأن السيليكون الناتج كان على شكل أنابيب نانوية وكانت خشونة السطح Sa = 286 nm كما هو موضح بالشكل رقم (3).



الشكل رقم (3) صور مجهر AFM ثنائية وثلاثية الأبعاد لعينة السيليكون

4-الاستنتاجات

1-دلت نتائج التجارب والاختبارات التي تم إجراؤها في هذا البحث على امكانية تحضير السيليكون النقي من الرمل السوري الخام وبمردود مرتفع وصل إلى 94% بإجراء تنقية حمضية للرمل وغسيل لاحق، من ثم طحن وفرز حبيبي للرمل، تليها عملية مزج للرمل مع بودرة معدن المغنيزيوم وإجراء معالجة حرارية وفقاً للشروط الآتية:

- نسبة المواد المتفاعلة المولية هي $SiO_2:Mg$ هي 1:2.
- درجة حرارة المعالجة هي $800^\circ C$.
- الحجم الحبيبي للرمل أقل من 63.
- زمن المعالجة الحرارية 120min.

2-دلت نتائج دراسة البنية السطحية للسيليكون المحضر أنه على شكل أنابيب نانوية وبلغت خشونة السطح Sa = 286 nm.

References

- [1] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M.D. Bazilian, N. Wagner, R. Gorini, The role of renewable energy in the global energy transformation, Energy Strategy Rev. 24 (2019) 38–50, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.

- [2] M. Kumar, Social, Economic, and Environmental Impacts of Renewable Energy Resources. In Wind Solar Hybrid Renewable Energy System; IntechOpen: London, UK, 2020.
- [3] A. Shahsavari, M. Akbari, Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 90 (2018) 275–291, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>
- [4] C. Battaglia, A. Cuevas, S. De Wolf, High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives, *Energy Environ. Sci.* 9 (5) (2016) 1552–1576, <https://doi.org/10.1039/C5EE03380B>
- [5] J. Szlufcik, S. Sivoththaman, J.F. Nlis, R.P. Mertens, R. Van Overstraeten, Lowcost industrial technologies of crystalline silicon solar cells, *Proc. IEEE* 85 (5) (1997) 711–730, <https://doi.org/10.1109/5.588971>
- [6] S. Maldonado, The importance of new “sand-to-silicon” processes for the rapid future increase of photovoltaics, *ACS Energy Lett.* 5 (11) (2020) 3628–3632, <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.0c02100>
- [7] S. Medjahed, A. Kheloufi, E. Bobocioiu, A. Kefafi, F. Kerkar, K. Lebbou, Quartz ore beneficiation by reverse flotation for silicon production, *Silicon* (2020) 1–11, <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00790-x>
- [8] G. Charalampides, K. Vatalis, A. Baklavaridis, V. Karayannis, N.P. Benetis, Chemical and mineralogical analysis of high-purity quartz from new deposits in a Greek Island, for Potential Exploration, *EUREKA Phys. Eng.* 4 (2020) 29–37, <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001357>
- [9] N. Mahdadi, S. Chihi, H. Bouguettaia, S. Beddiaf, M.L. Mechri, Chromatic classification of Ouargla (Algeria) dunes sand: determination of main compositions and color causes, by using XRD, FTIR and XRF. *Silicon* 9 (2) (2017) 211–221, <https://doi.org/10.1007/s12633-016-9432-x>.
- [10] H.C. Monger, E.F. Kelly, Silica minerals, *Soil Mineral. Environ. Appl.* 7 (2002) 611–636, <https://doi.org/10.2136/sssabookser7>.
- [11] JAMES J.; SHACKELFORD F.; ROBERT H.; DOREMUS E., 2008- Ceramic and Glass Materials Structure, Properties and Processing. Springer 1st ed, New York, 209 pages.
- [12] ARIFFIN A., 2004 - What is Silica Sand. Mineral Perindustrian, Malaysia 425 Pages.

- [13]MANDRAGORA L., 2002- Applied Ceramic Technology. Via Selice Provinciale, 1st, Italy, 444 Pages.
- [14]RAMASAMY V., DHEENATHAYALU M., PONNUSAMY V., MURUGESAN S., 2003-Characterisation of Quartz and Feldspars in White Granites. Journal of Current Sciences, PP: 181-190.
- [15]BORMANS P., 2003- Ceramicare More than Clay. Cambridge International Science Publishing, 1st, UK, 373 Pages.