

مواد سيراميكية مسامية مصنوعة على أساس أكسيد المغنيسيوم لتنقية المياه من
الانسكابات النفطية

**POROUS CERAMIC MATERIALS BASED ON MAGNESIUM OXIDE
FOR WATER PURIFICATION FROM OIL PRODUCTS**

د.مروان فرحان سيف حسن الكمالي^{1,2*}

أ.د.أندريه أندريوفيتش بويكا³

صلاح محمد السيد الشربيني⁴

¹ باحث في معمل أبحاث السيراميك التقني والمواد النانوية، أستاذ مشارك في قسم "الإلكترونيات الصناعية" بجامعة سوخوي التقنية الحكومية، غوميل، 246029، جمهورية بيلاروسيا، سكوبس: 58547258100-، <https://orcid.org/0009-0004-3503-1373>

² المنظمة العلمية للبحوث والإبتكارات، الجمهورية اليمنية

³ مختبرات أبحاث السيراميك والمواد النانوية التقنية و بروفيسور بقسم "علم المواد في الهندسة الميكانيكية" بجامعة سوخوي التقنية الحكومية، غوميل، 246029، جمهورية بيلاروسيا، سكوبس: 58938190800

⁴ طالب دكتوراه في قسم "علم المواد في الهندسة الميكانيكية" بجامعة سوخوي التقنية الحكومية، غوميل، 246029، جمهورية بيلاروسيا.



مواد سيراميكية مسامية مصنوعة على أساس أكسيد المغنيسيوم لتنقية المياه من الانسكابات النفطية

د. مروان فرحان سيف حسن الكمالي^{1,2*}

أ.د. أندريه أندريوفيتش بويكا³

صلاح محمد السيد الشرييني⁴

¹باحث في معمل أبحاث السيراميك التقني والمواد النانوية، أستاذ مشارك في قسم "الإلكترونيات الصناعية" بجامعة سوخوي التقنية الحكومية، غوميل، 246029، جمهورية بيلاروسيا، سكوبس: 58547258100، <https://orcid.org/0009-0004-3503-1373>

²المنظمة العلمية للبحوث والابتكارات، الجمهورية اليمنية

³مختبرات أبحاث السيراميك والمواد النانوية التقنية و بروفيسور بقسم "علم المواد في الهندسة الميكانيكية" بجامعة سوخوي التقنية الحكومية، غوميل، 246029، جمهورية بيلاروسيا، سكوبس: 58938190800

⁴طالب دكتوراه في قسم "علم المواد في الهندسة الميكانيكية" بجامعة سوخوي التقنية الحكومية، غوميل، 246029، جمهورية بيلاروسيا.

الملخص:

للمنتجات البترولية تصل إلى 180% من وزن المادة عند معالجتها حرارياً في درجات حرارة تتراوح بين 600 و650 درجة مئوية. تم تطوير نموذج أولي لمرشح عملي متعدد الطبقات مما يدل على كفاءة عالية في تنقية المياه تعتبر المواد الخزفية التي تم الحصول عليها على أساس أكسيد المغنيسيوم مناسبة لتصنيع المرشحات لتنقية المياه الملوثة بالنفط.

الكلمات المفتاحية: المواد النانوية المركبة، تنقية المياه، امتصاص الزيت، تكنولوجيا السول جيل، الأغشية المسامية، إزالة الملوثات، الاستدامة، التحليل البنيوي.

بحثت هذه الدراسة في تطوير مرشحات نانوية مسامية عالية الكفاءة لتنقية المياه الملوثة بالمنتجات البترولية باستخدام تقنية السول-جيل. صنع مركب نانوي هجين يتكون من $MgO:SiO_2:CaO:BaO$ ، على شكل أقراص حيث كشف تحليل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عن تكوين بنية مسامية موحدة تتكون من جسيمات نانوية كروية تتراوح أقطارها بين 33 و74 نانومتر كما أكد حيود الأشعة السينية (XRD) وطيف الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDS) التركيب المركب حيث يمثل أكسيد المغنيسيوم حوالي 82% وتتوزع المكونات السباتكية بالتساوي حيث تتميز المواد الخزفية الناتجة بقدرة امتصاص عالية

POROUS CERAMIC MATERIALS BASED ON MAGNESIUM OXIDE FOR WATER PURIFICATION FROM OIL PRODUCTS

Marwan F. S. H. AL-Kamali^{1,2*}

Andrei A. Boika²

Salah M.E. Elsherbini⁴

*1*Technical Ceramics and Nanomaterials Research Laboratories, junior research & Ph.D. associate Professor Department of "Industrial Electronics" at Sukhoi State Technical University, Gomel, 246029, Republic of Belarus., Scopus: 58547258100, <https://orcid.org/0009-0004-3503-1373>.

*2*Scientific Organization for Research and Innovation, Yemen .

*3*Technical Ceramics and Nanomaterials Research Laboratories and Professor Department of "Science of materials in mechanical engineering" of the Sukhoi State Technical University, Gomel, 246029, Republic of Belarus., Scopus: 58938190800

4 PhD. Student of the Department "Science of materials in mechanical engineering" at Sukhoi State Technical University, Gomel, 246029, Republic of Belarus.

ABSTRACT

This study investigated the development of highly efficient nanoporous filters for purifying water contaminated with petroleum products using sol-gel technology.

A hybrid nanocomposite consisting of $\text{MgO}:\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{BaO}$, shaped into disks, was fabricated. Scanning electron microscopy (SEM) analysis revealed the formation of a uniform porous structure consisting of spherical nanoparticles with diameters ranging from **33 to 74 nm**.

X-ray diffraction (XRD) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) confirmed the composite composition, in which magnesium oxide accounts for approximately **82%**, and the alloyed components are uniformly distributed.

The resulting ceramic materials exhibit high adsorption capacity for petroleum products, reaching up to **180%** of the material weight when heat-treated at temperatures ranging from **600 to 650°C**.

A prototype of a practical multilayer filter has been developed, demonstrating high water purification efficiency. The obtained ceramic materials based on magnesium oxide are suitable for the manufacture of filters for purifying oil-contaminated waters.

Keywords Composite nanomaterials, water purification, oil adsorption, sol-gel technology, porous membranes, pollutant removal, sustainability, structural analysis.

I. المقدمة

يُعتبر الماء عنصراً حيوياً لاستمرار الحياة البشرية وتطوُّرها فعلى الرغم من تغطية المياه لما يقارب 71% من سطح الأرض، فإن نسبة المياه العذبة المتاحة للاستخدام المباشر محدودة للغاية مع التسارع الصناعي المتزايد وتوسع النشاط البشري في مجالات متعددة كقطاع المعادن، واستخدام الأسمدة، والمدايح، والتعدين، وصناعة الورق والبطاريات والمبيدات الحشرية، أصبحت البيئة المائية معرضة لدخول كميات كبيرة من الملوثات العضوية وغير العضوية، مما يهدد جودة المياه وسلامة النظم البيئية [1-5]. من بين هذه الملوثات، تبرز أيونات المعادن الثقيلة كمواد خطيرة نظراً لصعوبة تحليلها الحيوي وقد تؤدي هذه الأيونات، عند انتقالها عبر السلسلة الغذائية إلى جسم الإنسان، إلى حدوث أضرار صحية مزمنة فعلى سبيل المثال، يرتبط التعرض للزئبق بمشاكل في الجهاز العصبي المركزي كالصداع والتهاب الفم، بينما يتسبب الرصاص في إعاقة نمو الأطفال وإضعاف السمع، كما يؤثر الكاديوم سلباً على صحة العظام من خلال منع ترسب الكالسيوم الطبيعي. بالإضافة إلى ذلك، يؤدي تراكم الزرنيخ في الجسم إلى إعاقة عملية التمثيل الغذائي الخلوي، مما ينتج عنه تلف في الأعضاء [6].

أما الملوثات العضوية، مثل المبيدات الحشرية والهيدروكربونات والمنظفات والمخلفات الصيدلانية، فمصادرها متنوعة وتشمل مياه الصرف المنزلي والزراعي والصناعي وتستهلك هذه الملوثات كميات كبيرة من الأكسجين أثناء تحليلها، مما يقلل من مستوى الأكسجين الذائب في الماء، وهو أمر حيوي لاستمرار الكائنات المائية كما يمكن أن تؤدي الكائنات الحية الدقيقة الضارة في مصادر المياه إلى انتشار أمراض خطيرة كالإسهال والزحار [7-8].

لتحقيق تنقية فعالة للمياه والحفاظ على البيئة، يتعين على الحكومات والمجتمع العلمي التعاون لوضع حلول مستدامة. ومن بين التقنيات الواعدة في هذا المجال تقنية الترشيح الغشائي، التي تلقى اهتماماً متزايداً نظراً لكفاءتها العالية وقدرتها على العمل بدرجات حرارة منخفضة مع استهلاك طاقة محدود ورغم أن الأغشية ذات المسام الدقيقة (بأقطار 0.1 - 5 ميكرومتر) لا تسمح بترشيح الجسيمات متناهية الصغر فإن الأغشية النانوية أثبتت فاعلية كبيرة في إزالة مجموعة واسعة من الملوثات بما فيها الأيونات المعدنية والأملاح والمركبات العضوية والكائنات الدقيقة وذلك بفضل قدرتها على ترشيح الجسيمات بأحجام تتراوح بين 1 إلى 10 نانومتر [8-11].

طور العلماء أغشية جديدة مستخدمين مواد متطورة مثل الجرافين، وهناك أنواع عديدة من الأغشية، مثل الترشيح الفائق والترشيح النانوي والتناضح العكسي، وهي منتشرة في معالجة المياه [10-16].

في هذا البحث يتم تصنيع أغشية نانوية من السيراميك باستخدام طريقة السول-جل، مع تحسين خصائص الفلتر عبر إضافة مواد نانوية مثل أكسيد التيتانيوم وأكسيد البتريوم وأكسيد الكالسيوم بنسب مختلفة [1-4].

الهدف هو صنع مرشحات قادرة على إزالة أنواع كثيرة من الملوثات، حتى الانسكابات النفطية حيث يشمل العمل أيضاً تصميم فلتر أولي يعتمد على أكسيد المغنيسيوم مع جسيمات نانوية ودراسة التغييرات في الهيكل والشكل بعد المعالجة الحرارية بهدف تحسين أداء الفلاتر في تنقية المياه.

II. الجانب العملي (طرق التحضير والقياس)

1. المواد الأولية:

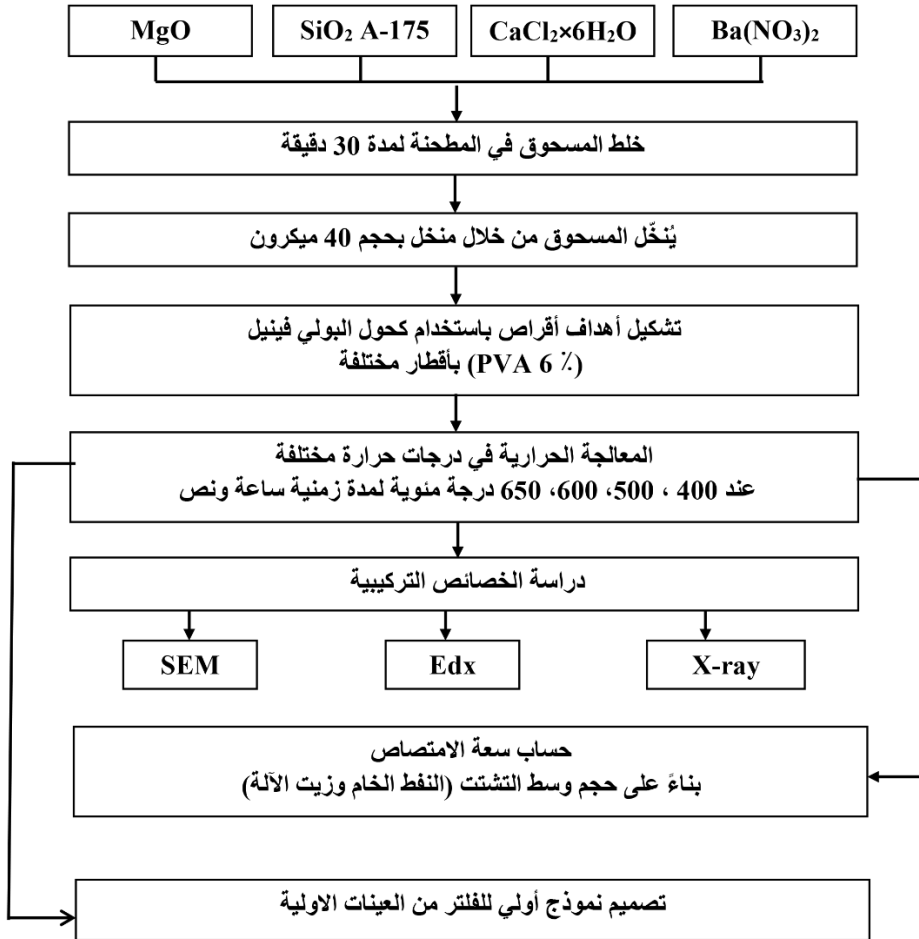
المواد الكيميائية المستخدمة في التحضير للعينات كانت كالآتي (أكسيد المغنيسيوم MgO وبنسبة نقاوة 98% ومسحوق بودر من السيليكا (الاسم التقني-ايروسيل) والرمز الكيميائي SiO_2 موديل A-175 وبنسبة نقاوة 99.9% ومعدل طحن بين 10 - 40 نانومتر حسب بيانات المصنع المنتج، كلوريد الكالسيوم $CaCl_2 \times 6H_2O$ وبنسبة نقاوة 97% ونترات الباريوم $Ba(NO_3)_2$ بنسبة 99.5% حيث استخدمت المواد الكيميائية كما جاءت من الشركة المنتجة دون أي تقنية أخرى حيث أن الشركة المنتجة للمواد الكيميائية هي (شركة فيكتون - روسيا الاتحادية) كما أنه استخدم الماء المقطر ثنائي المعالجة.

2. تحضير العينات

بناءً على نتائج البحث العلمي الذي أجراه الباحثون [10-16] طُوِّرت عملية تكنولوجية لإنتاج مركب قائم على أكسيد المغنيسيوم المشوب بأكاسيد SiO_2 و CaO و BaO باستخدام الطريقة الغروانية حيث يوضح الشكل 1 المخطط التكنولوجي لإنتاج المركب النانوي حيث استخدمت المواد الأولية الكيميائية كما موضح في بند المواد الأولية لتصنيع هلاميات جافة ومساحيق ومن ثم أيضاً من المساحيق التي تم تطويرها تم توليف اقراص بأقطار تتراوح بين 20 الى 40 ملم لاستخدامها كمرشحات للمياه.

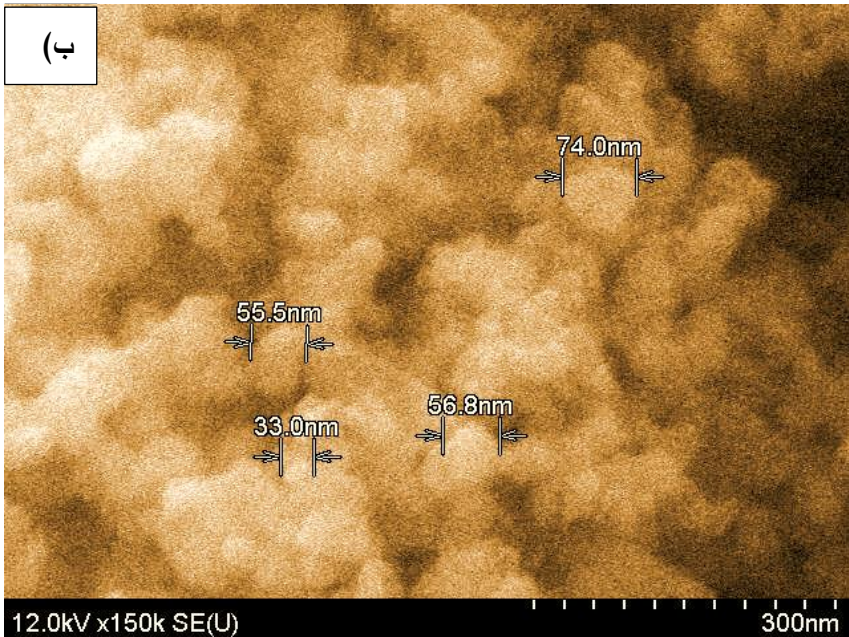
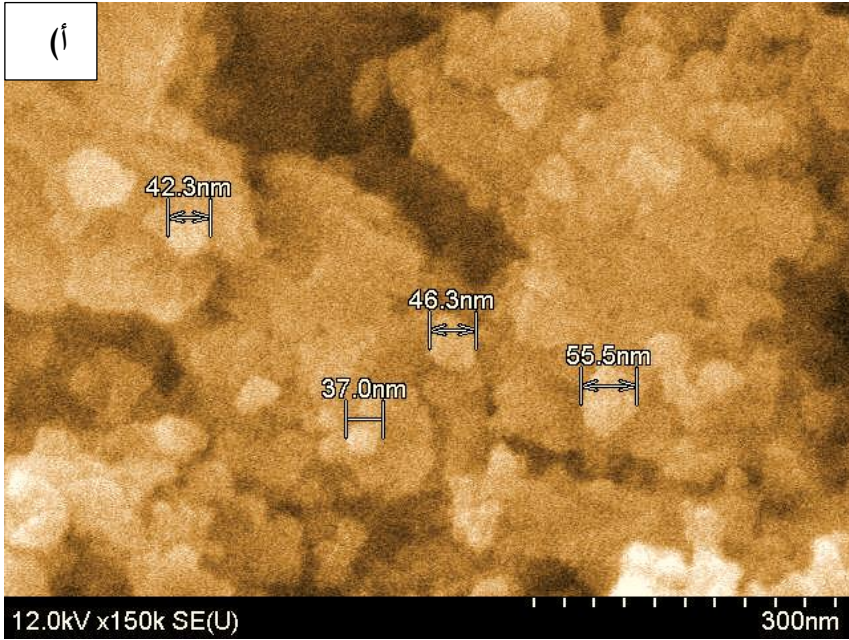
حُلِّلت تركيبة الطور للمواد الناتجة بواسطة تحليل حيود الأشعة السينية باستخدام جهاز حيود الأشعة السينية GNR APD 2000 PRO حيث دُرست الخصائص الهيكلية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح على جهاز Hitachi S-4800 (اليابان) والذي تم إجراء القياسات من قبل موظفي المركز العلمي والتقني "Belmicroanalysis" - فرع من "INTEGRAL" - JSC "Belmicronisty" - شركة إدارة القابضة "INTEGRAL".

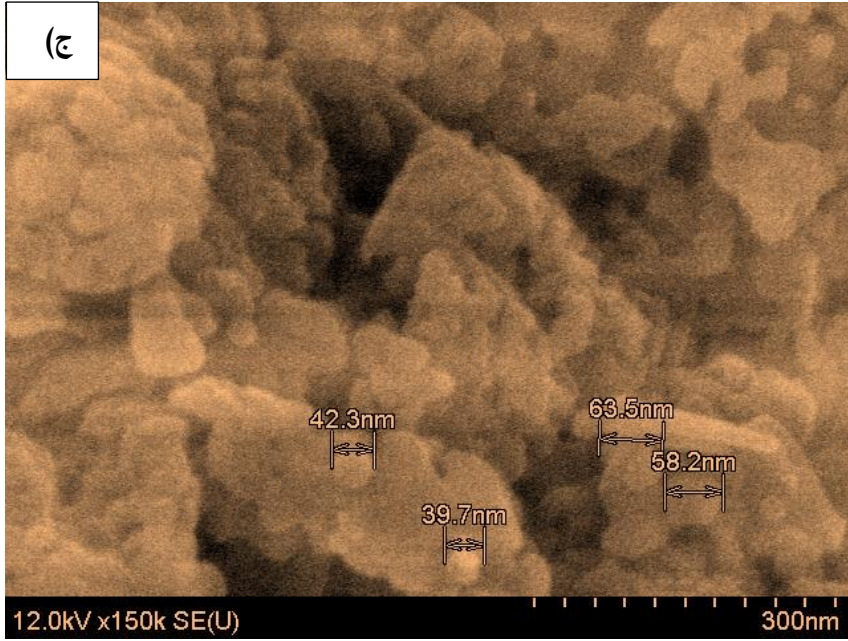
الشكل 1. مخطط انسيابي لإنتاج مركب نانوي قائم على أكسيد المغنيسيوم ودراسة خصائصه



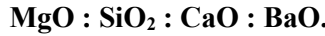
III. النتائج والمناقشة

في الشكل 2 التركيب السطحي للمركب النانوي MgO:SiO₂:CaO:BaO عند درجات الحرارة للمعالجة 400 ، 500 ، 600 درجة مئوية والتي تم اخذها بالمجهر الإلكتروني الماسح





الشكل 2 : صور المجهر الإلكتروني الماسح للمركبات النانوية الناتجة، المكونة من :



والمُلدنة في الهواء لمدة ساعة ونصف عند درجات حرارة: أ- درجة حرارة 400 درجة مئوية؛

ب- درجة حرارة 500 درجة مئوية؛ ج- درجة حرارة 600 درجة مئوية

يظهر تحليل صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) أن المادة الناتجة المبنية على أساس أكسيد المغنيسيوم تتميز ببنية مسامية مترابطة تتألف من تجمعات جسيمية ذات شكل كروي حيث تتشكل هذه التجمعات من جسيمات أولية ذات توزيع حجمي ضيق يتراوح قطرها بين 33 و74 نانومتر. ولقد تبين أن إضافة عناصر السبائك إلى مصفوفة أكسيد المغنيسيوم أثرت بشكل ملحوظ على تكوين الجسيمات الأولية حيث أدت إلى تعزيز الميل لتشكيل بنى كروية منظمة كما زادت من ميل الجسيمات نحو التكتل مما أدى إلى إنتاج مساحيق متعددة التشتت بجودة عالية وعند تحليل تأثير درجة الحرارة على توزيع أحجام الجسيمات الأولية أظهرت النتائج ما يلي:

- عند 400 درجة مئوية، تراوح حجم الجسيمات بين 37 و56 نانومتر.
- عند 500 درجة مئوية، تراوح حجم الجسيمات بين 33 و74 نانومتر.
- عند 600 درجة مئوية، تراوح حجم الجسيمات بين 40 و64 نانومتر.

يشير هذا التغير في توزيع الأحجام مع ارتفاع درجة الحرارة إلى عملية نمو تدريجية في الجسيمات الأولية يعقبها مرحلة ضغط ودمج لهذه الجسيمات مع استمرار المعالجة الحرارية هذا السلوك يعكس تطور البنية الداخلية للمادة وتأثير الحرارة في تحسين خصائصها البنائية خلال المعالجة.

تم تحديد التركيب العنصري للمركب النانوي المحضر $MgO:SiO_2:CaO:BaO$ باستخدام تقنية مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX) (انظر الشكل 3) حيث أظهرت النتائج وجود قمم طيفية بارزة تنتمي إلى عنصري الأكسجين (O) والمغنيسيوم (Mg) مما يؤكد أنهما يشكلان المكونين الأساسيين في البنية كما سُجلت إشارات طيفية ثانوية تعزى إلى وجود السيليكون (Si)، والكالسيوم (Ca)، والباريوم (Ba)، وهو ما يتوافق مع إدخال هذه العناصر ضمن التركيب المستهدف. حيث تتفق هذه النتائج مع تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) مما يدعم فرضية تكون طور مركب نانوي هجين قائم على أكسيد المغنيسيوم مع وجود نسب محددة من السيليكا (SiO_2) وأكاسيد الكالسيوم (CaO) والباريوم (BaO) كمكونات مضافة وتحليل الكميات النسبية للعناصر تبين أن التوزيع الوزني التقريبي للمكونات الأساسية كالآتي:

أكسيد المغنيسيوم (MgO): نحو 82.0 % ، ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2): نحو 9.0 %، أكسيد الكالسيوم (CaO): نحو 5.0 % أيضاً أكسيد الباريوم (BaO): نحو 2.6 %

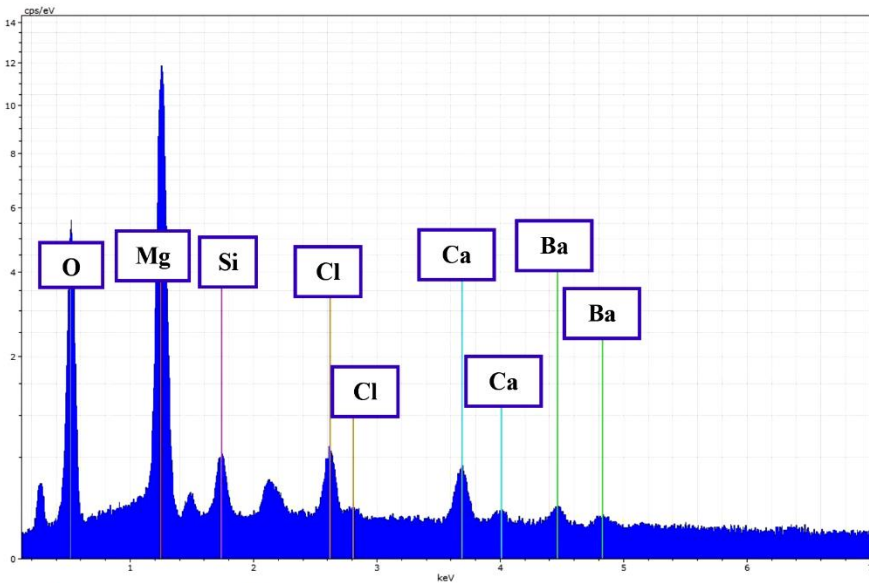
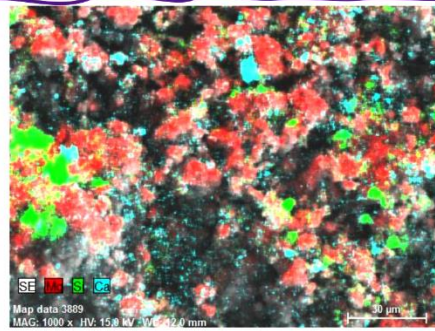
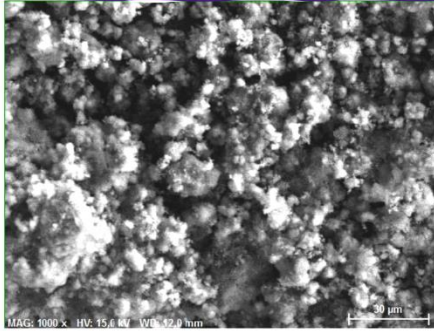
لما كشف التحليل عن وجود كميات ضئيلة من الكلور (Cl) كشوائب متبقية من عملية التحضير وقد لوحظ أن زيادة درجة حرارة المعالجة من 400 إلى 600 °م أدت إلى انخفاض محتوى الكلور المتبقي بمقدار 2.5 مرة مما يشير إلى تحسن في نقاوة العينة مع ارتفاع درجة الحرارة.

ويؤكد تحليل EDX نجاح تركيب المركب النانوي بالتركيبية المستهدفة مع هيمنة واضحة لأكسيد المغنيسيوم في البنية وهو ما يتسق مع التصميم التجريبي للمادة.

ولقد تم تشكيل المادة النانوية المركبة المصنعة ($MgO:SiO_2:CaO:BaO$) على هيئة أقراص مسامية بغرض استخدامها كمرشحات ضمن مبادرات التنمية المستدامة لمعالجة المياه الملوثة بالمشتقات النفطية (انظر الشكل 4).

حيث أظهرت النتائج التجريبية أن المادة تتمتع بكفاءة امتزاز عالية، حيث تمكنت من تنقية المياه بشكل فعال حتى مرحلة التشبع الكامل للمسام، مع قدرة امتصاص بلغت 180 % من وزن المادة بالنسبة للملوثات النفطية.

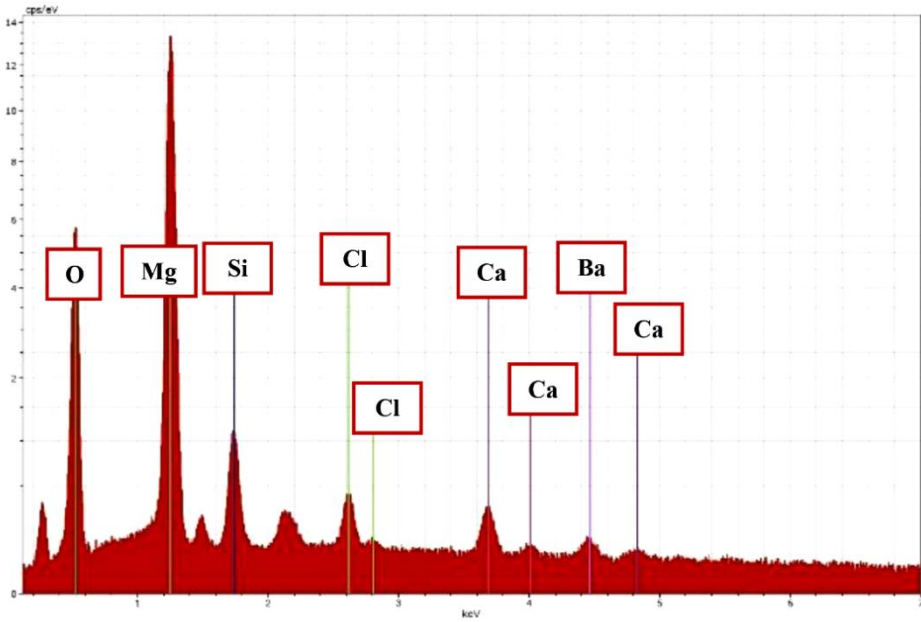
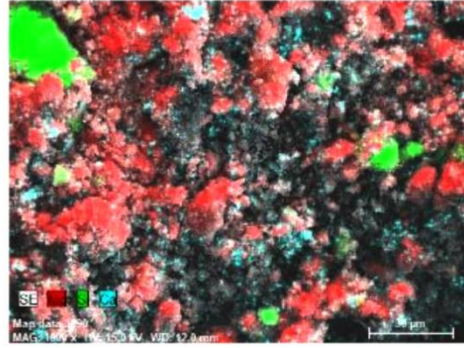
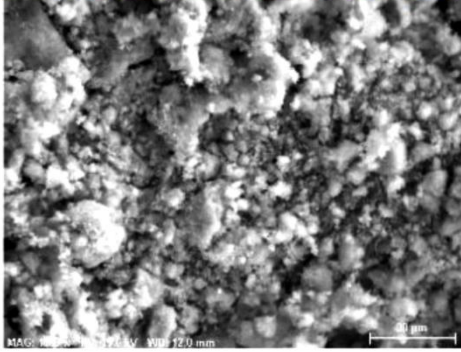
Sample №1 (MgO:SiO₂:CaO:BaO) at 400°C



Высокое напряжение: 15.0kV

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	Comp. C [wt.%]	norm. Comp. C [wt.%]	Error [wt.%]
O	8	K-series	25,62	37,79	50,00		0,00	0,00	3,1
Mg	12	K-series	33,76	49,80	43,38	MgO	82,59	55,99	1,8
Si	14	K-series	1,98	2,93	2,21	SiO ₂	6,26	4,24	0,1
Cl	17	K-series	2,50	3,69	2,20		3,69	2,50	0,1
Ca	20	K-series	2,38	3,52	1,86	CaO	4,92	3,34	0,1
Ba	56	L-series	1,55	2,28	0,35	BaO	2,54	1,73	0,1
Total:			67,79	100,00	100,00				

Sample №2 (MgO:SiO₂:CaO:BaO) at 500°C

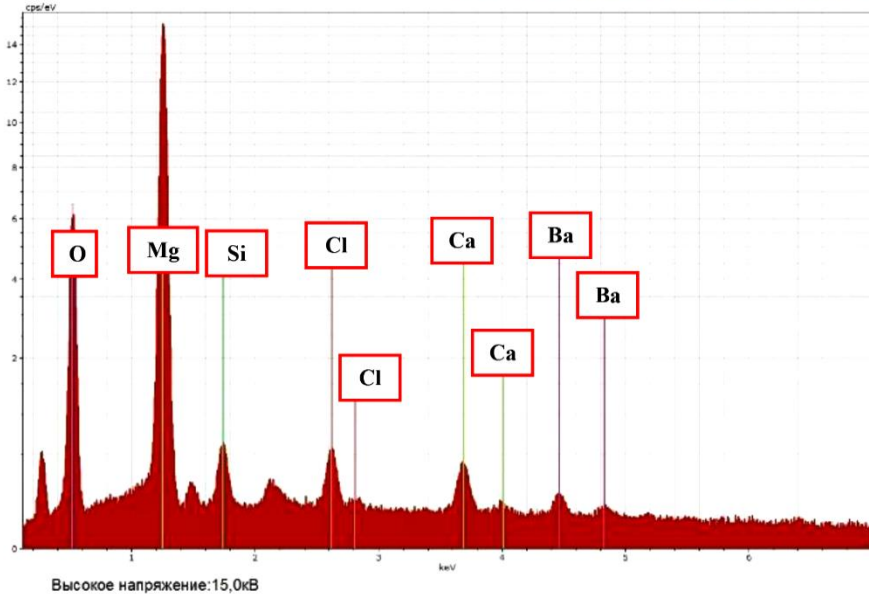
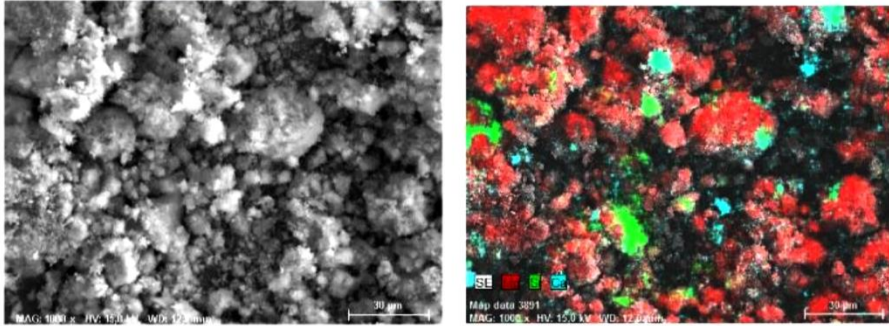


Высокое напряжение: 15,0kV

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	Comp. C [wt.%]	norm. Comp. C [wt.%]	Error [wt.%]
O	8	K-series	28,29	39,45	51,69		0,00	0,00	3,4
Mg	12	K-series	33,70	47,00	40,54	MgO	77,95	55,89	1,8
Si	14	K-series	4,53	6,32	4,72	SiO ₂	13,52	9,70	0,2
Ca	20	K-series	1,84	2,57	1,35	CaO	3,60	2,58	0,1
Cl	17	K-series	1,63	2,27	1,34		2,27	1,63	0,1
Ba	56	L-series	1,71	2,38	0,36	BaO	2,66	1,91	0,1
Total:			71,71	100,00	100,00				

(ب)

Sample №3 (MgO:SiO₂:CaO:BaO) at 600°C



El	AN	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Compound	Comp. C [wt. %]	norm. Comp. C [wt. %]	Error [wt. %]
O	8	K-series	27,94	38,04	50,49		0,00	0,00	3,4
Mg	12	K-series	36,07	49,12	42,92	MgO	81,46	59,82	1,9
Si	14	K-series	2,60	3,54	2,67	SiO ₂	7,56	5,55	0,1
Ca	20	K-series	2,40	3,27	1,73	CaO	4,57	3,36	0,1
Cl	17	K-series	2,07	2,82	1,69		2,82	2,07	0,1
Ba	56	L-series	2,36	3,21	0,50	BaO	3,59	2,63	0,1
Total:			73,44	100,00	100,00				

(ج)

الشكل 3. نتائج التحليل العنصري لعينة هلام جاف أجريت باستخدام مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX) للتركيب (MgO:BaO:CaO:SiO₂) عند درجات حرارة المعالجة:
أ- 400 درجة مئوية ، ب- 500 درجة مئوية ، ج- 600 درجة مئوية



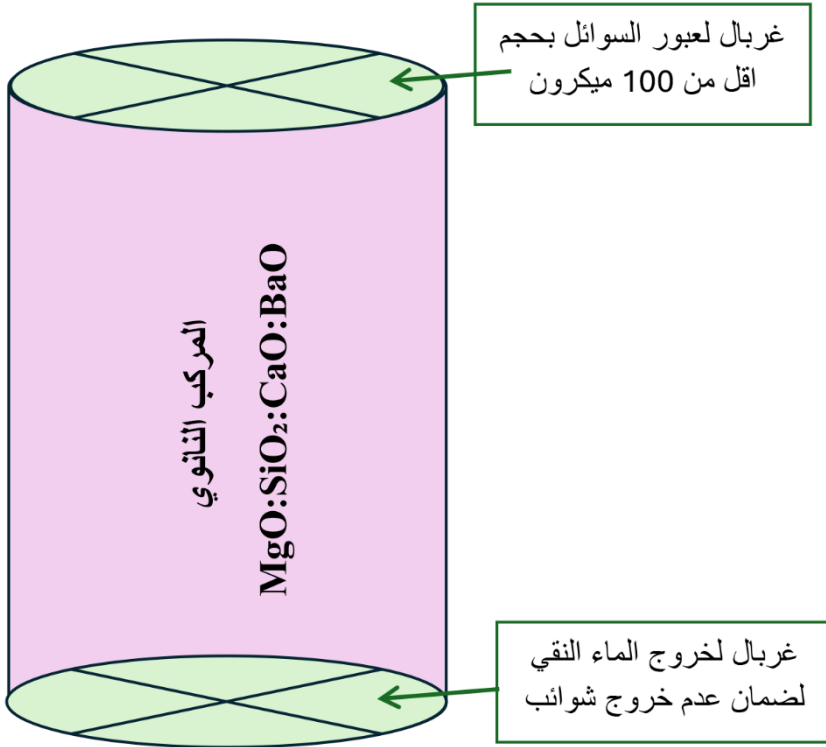
الشكل 4. المظهر الخارجي للمرشحات التي تم الحصول عليها من هدف التركيبة $(\text{MgO}:\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{BaO})$ عند درجة حرارة المعالجة الحرارية 650 درجة مئوية و 600 درجة مئوية و 500 درجة مئوية.

ولقد جرت عملية تقييم أداء المرشحات تحت ظروف تشغيلية مختلفة، وكشفت النتائج ترابط كفاءة الإزالة مع درجة حرارة المعالجة الحرارية للمادة، حيث تم تحقيق النتائج التالية

- العينات المعالجة عند 400°م: حققت كفاءة إزالة بلغت 85٪
- العينات المعالجة عند 500°م: حققت كفاءة إزالة بلغت 90٪
- العينات المعالجة في المدى 600-650°م: حققت إزالة كاملة للملوثات النفطية .

يُعزى هذا التحسن في الأداء مع ارتفاع درجة حرارة المعالجة إلى زيادة التماسك البنيوي للمادة وزيادة النشاط المسامي لها وهذه النتائج تتماشى مع الدراسات السابقة التي أكدت تحسّن خصائص الامتزاز عند رفع درجات حرارة المعالجة الحرارية للمواد النانوية.

إضافة إلى ذلك تم تصميم نموذج أولي لمرشح عملي مكون من هيكل بلاستيكي يحتوي على غربال أولي بقطر مسام يتراوح بين 50-100 ميكرون قبل وبعد الطبقة الفعالة من المادة المركبة (انظر الشكل 5) حيث يعمل النظام على تمرير المياه الملوثة عبر مراحل الترشيح المتتالية ليخرج في النهاية ماءً معالجاً ونقياً بعد مروره عبر الطبقة النانوية المسامية حيث أثبت النظام المصمم كفاءة تشغيلية متميزة في إزالة الملوثات النفطية، مع الحفاظ على تدفق مناسب للماء.



الشكل 5. نموذج أولي لمرشح عملي مكون من هيكل بلاستيكي يحتوي على غربال أولي
بقطر مسام يتراوح بين 50-100 ميكرون

هذه النتائج تعزز إمكانية التطبيق الفعلي لهذه المادة في أنظمة التنمية المستدامة لمعالجة المياه، وهي متوافقة مع الأبحاث الحديثة التي تُظهر اهتماماً كبيراً بتطوير مواد نانوية مبتكرة لحل مشاكل تلوث المياه.

IV. الخاتمة:

- إن أهم النتائج العلمية والتقنية المستخلصة من البحث والتي أكدت تحقيق تقدم ملحوظ في مجال المواد النانوية والمركبات السيراميكية تتلخص في النقاط التالية:
- تم تطوير مراحل تقنية فعالة لتصنيع مادة مركبة نانوية تحتوي على $MgO:SiO_2:CaO:BaO$ باستخدام طريقة السول-جل حيث تضمنت هذه الطريقة تكوين مادة غروانية من مساحيق المغنيسيوم وأكسيد السيليكون مع إضافة أملاح الكالسيوم والباريوم القابلة للذوبان [17 - 22].
 - أظهرت الدراسات الهيكلية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح أن الهلام الجاف يتكون من جسيمات أولية متجمعة التي تتأثر في حجمها بعناصر السبائك وتركيزها في مصفوفة أكسيد المغنيسيوم إلى جانب درجة الحرارة أثناء المعالجة وقد لاحظت التجارب أن حجم الجسيمات يتراوح بين 37 و 56 نانومتر عند 400 درجة مئوية، وبين 33 و 74 نانومتر عند 500 درجة مئوية، وبين 39.7 و 63.5 نانومتر عند 600 درجة مئوية.
 - أكدت أنماط حيود الأشعة السينية التوزيع المتساوي لإضافات السبائك ضمن مصفوفة الهلام الجاف كما أشارت القمم المحددة في الأنماط إلى وجود شظايا معينة تدعم فرضية التجانس في التوزيع ضمن المادة الناتجة.
 - من خلال تحليل EDX الدقيق للتركيب العنصري تبين أن المادة المنتجة تضم بشكل رئيسي عناصر المغنيسيوم والأكسجين، مع وجود نسب أقل من الكالسيوم، الباريوم والسيليكون. أطياف التحليل جاءت متوافقة مع العناصر الأساسية في التركيبة.
 - أثبتت التجارب العملية قدرة الأقراص المصنوعة من المادة النانوية على تنقية المياه من الملوثات وكذلك امتصاص النفط بكفاءة عالية تصل إلى 180% من وزن المادة نفسها ما يشير إلى إمكانية استخدامها في تطبيقات بيئية متعددة مثل جهود إصلاح تلوث المياه والنفط.
 - ساهمت طريقة السول-جل في وضع أسس لتصنيع مواد سيراميكية مركبة ذات كفاءة امتصاص عالية، حيث عززت المعالجة الحرارية عند 650 درجة مئوية تشكيل مصفوفة قوية ومتجانسة حيث أظهرت الاختبارات قدرة هذه المواد على الترشيح الفعال مما يجعلها مناسبة للاستخدام في أنظمة تنقية المياه.

وخلاصةً لهذه النتائج يمكن الاستفادة منها في تطوير تقنيات مبتكرة لتنقية المياه الصديقة للبيئة مما يدعم تحسين جودة المياه والحفاظ على البيئة بشكل عام.

V. شكر وتقدير [Acknowledgements]

The work was carried out within the framework of task 2.2.6 of the state research program "Convergence-2025" (subprogram "Microcosm, plasma and the Universe"), funded from the republican budget for state research programs for 2021–2025 in the Republic of Belarus.

"All experiments were prepared in the Laboratory of Technical Ceramics and Nanomaterial's, Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus."

تم تنفيذ العمل في إطار المهمة 2.2.6 من البرنامج البحثي الحكومي "التقارب 2025" (البرنامج الفرعي "العالم المصغر والبلازما والكون") ، الممول من الميزانية الجمهورية لبرامج البحوث الحكومية للفترة 2021-2025 في جمهورية بيلاروسيا.
" تم تحضير جميع التجارب في معامل السيراميك والتقنية والمواد النانوية التابعة لجامعة سوخوي التقنية الحكومية في مدينة غوميل في جمهورية بيلاروسيا"

VI. المراجع والمصادر

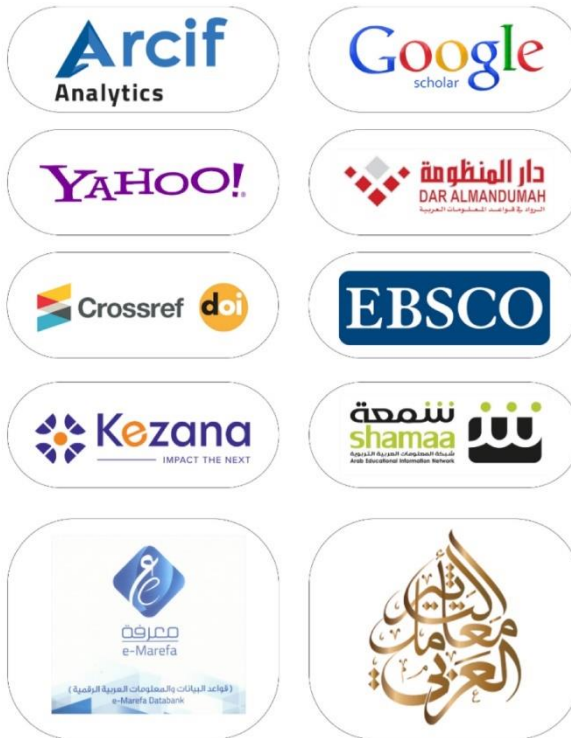
1. AL'-Kamali M. F. S. H., Boika A. A., Elsherbini S. M. E. Composite materials based on magnesium oxide for sorption of petroleum products obtained by sol-gel method= Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel, 2023, no. 3, pp. 28–35 (in Russian).
2. Boika A. A. Composite materials produced by the sol-gel method. Gomel, GSTU, 2023. 185 p. (in Russian).
3. Pavlov A. V., Vasilyeva J. V. Investigation of sorbents of oil and oil products for the elimination of emergency oil spills in the seas of the arctic region. Problemy regional'noj jekonomiki, 2019, no. 5, pp. 89–94 (in Russian).
4. Volkova E. F., Duyunova V. A., Mostyaev I. V., Akinina M. V. Regularities of the formation and features of the influence of a fine structure on the properties of a new-generation magnesium alloy. Moscow, Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defense Corporation. 2020; no. 1(32), pp. 55–63 (in Russian).
5. Al-Kamali M. F. S. H., Alekseenko A. A. Sorption capacity of pure SiO₂-powders and formation of reduced copper nanoparticles in their structure: materials of the VIII Rep. scientific conf. students, undergraduates and graduate students, Gomel, April 25, 2019]. Gomel, 2019, part 2, pp. 4–6 (in Russian).
6. AL'-Kamali M. F. S. H., Boika A. A., Targets (MgO:CoO and ZnO:CoO) obtained by sol-gel method for vacuum deposition= X All-Russian Conference (with international participation) "High-temperature chemistry of oxide systems and materials": Collection of abstracts of reports, St. Petersburg, September 25–28, 2023 - SPb.: OOO "Izdatelstvo" LEMA ", 2023, pp. 142–144 (in Russian).
7. Al-Kamali M. F. S. H., Boika A. A., AL-Shamiri Hamdan A. S. SiO₂: CuO (Cu^o) targets for depositing thin films of ion-beam spraying obtained by sol-gel method. Doklad Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 348–355 (in Russian).
8. PDF RRUFF Database. – [Electronic resource]. – <https://rruff.info/notchem=MgO/display=default/> – Date of access: 19.09.2024 .
9. Xu CY, Wang C, Xu RZ, et al. Effect of Al₂O₃ on the viscosity of CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–Cr₂O₃ slags. international journal of minerals. Metall Mater. 2021;28:797–803
10. Yu Y, Liu W, Zuo H. Viscosity and desulphurisation behaviour of CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃–BaO–MnO slag. Ironmaking & Steelmaking. 2023;50(10):1420–1426. doi:10.1080/03019233.2023.2188525 .
11. Hou, Y., Zhang, S., Dang, J. et al. Electrical Conductivity and Structure of CaO–MgO–SiO₂–Al₂O₃–BaO Slag with Different BaO/Al₂O₃ Molar Ratios. Metall Mater Trans B 55, 3201–3207 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11663-024-03172-5>.
12. Eloy, M.R., Sano, N. Nitrogen solubility in CaO–SiO₂, CaO–MgO–SiO₂, and BaO–MgO–SiO₂ melts. Metall Trans B 21, 97–104 (1990). <https://doi.org/10.1007/BF02658120>.

- 13.Neha Rani, Surjee Chachal, Anuj Chauhan, Parmod Kumar X-ray Analysis of MgO nanoparticles by modified Scherer's Williamson-Hall and size-strain method. Proceedings, 2019, vol. 12, part 3, pp. 543-548. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.096>.
- 14.Development of composite materials based on MgO using sol-gel technology / S. M. E. Elsherbini, M. F. S. H. Al-Kamali, A. A. Boika [et al.] // Al-Andalus Journal of Applied Sciences. – 2024. – Vol. 11, № 20. – P. 39–60 .
- 15.Alekseenko, A. A. Synthesis and properties of SiO₂:Cu⁰ xerogels intended for use in biomedical research / A. A. Alekseenko, M. F. S. H. Al-Kamali, O. A. Titenkov // Bulletin of Sukhoi State Technical University: scientific and practical journal. - 2020. - No. 3/4. - P. 40-47. (in Russian)
- 16.Al-Kamali, M. F. S. H. Development of complex composite materials based on MgO obtained by the colloidal method / M. F. S. H. Al-Kamali, A. A. Boika, S. M. E. Elsherbini // Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel - 2025. - No. 1. - P. 40-47. (in Russian)
- 17.Al-Kamali, M. F. S. H. Synthesis of tableted targets based on pyrogenic silica micropowders containing copper compounds / M. F. S. H. Al-Kamali, A. A. Alekseenko // Innovative materials and technologies - 2020: proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists, Minsk, January 9-10, 2020. - Minsk: BSTU, 2020. - P. 95-97.
- 18.Formation of composite coatings by ion-beam sputtering of targets based on pyrogenic silica micropowders containing copper compounds / M. F. S. H. Al-Kamali [et al.] // Bulletin of the Yanka Kupala State University of Grodno. - 2022. - Vol. 12, No. 2. - P. 14–23.
- 19.AL-Kamali, M.F.S.H., Boika, A.A., Tapalski, D.V., Kovalenko, D., AL-Shamiri, H.A.S. (2024). Bactericidal Activity of Mesoporous SiO₂ Matrices Inlaid with Cu⁰ and CuO Nanoparticles Against P. Aeruginosa. In: Ono, Y., Kondoh, J. (eds) Recent Advances in Technology Research and Education. Inter-Academia 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 939. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54450-7_16
- 20.Alekseenko AA, Al-Kamali MFSH. "Titenkov OA Synthesis and properties of xerogels of composition SiO₂: Cu, intended for application in biomedical research." Vestnik GGTU (2020): 3-4.
- 21.Alekseenko A. A., Al-Kamali M. F. S. H., Titenkov O. A. Synthesis and properties of xerogels of the composition SiO₂: cu⁰, intended for use in biomedical research // Bulletin of the Sukhoi State Technical University. 2020. No. 3-4 (82-83). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-i-svoystva-kserogeley-sostava-sio2-cu-prednaznachennyh-dlya-primeneniya-v-biomeditsinskih-issledovaniyah> (date of access: 04.12.2025).
- 22.M. F. S. H. Al-Kamali, A. A. Alekseenko, O. A. Titenkov. Structure formation of SiO₂-xerogels containing copper compounds of different phase compositions.Problems of Physics, Mathematics, and Technology, 2020, issue 3(44), 7–12.



مجلة الأندلس للعلوم الإنسانية والاجتماعية
مجلة دولية شهرية علمية محكمة
الترقيم الدولي الإلكتروني : ISSN : 2410- 521X
الترقيم الدولي الورقي : ISSN : 2410- 1818
البريد الإلكتروني : journal@andalusuniv.net

المجلة مفهرسة في المواقع الآتية :



2025	2024	2023	2022	2021	العام
0.5978	0.3068	0.3759	0.1954	0.2692	معامل أرسيف
1.81	1.55	1.25	1.73	1.60	معامل التأثير العربي