دراسة تجريبية لإنتاج زجاج سيراميكي رغوي بخامات محلية وتطبيقه على الواجهات المعمارية

An experimental study to produce foam glass ceramic using local materials and its application on architectural facades

أ.د/ محمد عبد الفتاح مرزوق

استاذ بجامعة فاروس - شارع قنال المحمودية - سموحة - الاسكندرية - مصر.

استاذ بقسم بحوث الزجاج - المركز القومي للبحوث – مصر.

Prof. Dr. Mohamed Abdel Fattah Marzouk

Professor at Pharos University - Mahmoudia Canal Street – Smouha- Alexandria - Egypt.

Glass Research Department - National Research Center - Egypt

marzouk_nrc@yahoo.com

أ.د/ رشا محمد علي حسن

أستاذ التصميم المعماري بقسم الزجاج - كلية الفنون التطبيقية –جامعة حلوان-القاهرة- مصر.

Prof. Dr. Rasha Mohammed Ali Hassan

Professor of Architectural Design - Glass Department - Faculty of Applied Arts- Helwan University – Cairo - Egypt.

rashazenhom@gmail.com

أ.د/ علا حمدي عطية

أستاذ ورئيس قسم الخزف والزجاج كلية الفنون التطبيقية-جامعة بدر-القاهرة- مصر.

Prof. Dr. Ola Hamdy Attia

Professor and Head of the Department of Ceramics and Glass - Faculty of Applied Arts - Badr University, Cairo, Egypt

drolahamdy90@gmail.com

الباحثة/ مارينا مرقص كمال عبد الله

معيدة بقسم الخزف والزجاج-كلية الفنون التطبيقية-جامعة بدر-القاهرة- مصر.

Researcher/ Marina Marcos Kamal Abdullah

Teaching Assistant - Department of Ceramics and Glass - Faculty of Applied Arts - Badr University – Cairo - Egypt

marina.morkous@buc.edu.eg

الملخص:

تركز الدراسة الحالية على الاستكشاف التجريبي لإنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي باستخدام المواد الخام المحلية. الهدف الرئيسي هو تقليل تكاليف الإنتاج مع تحسين الاستفادة من الموارد الطبيعية المتاحة في البيئة المحلية. من خلال التركيز على استخدام هذه المواد، تسعى الدراسة إلى تأسيس عملية تصنيع مستدامة وفعالة من حيث التكلفة، وفي الوقت نفسه تقليل التأثير البيئي لعملية الإنتاج. بالإضافة إلى ذلك، تستعرض الدراسة التطبيقات المختلفة للزجاج السيراميكي الرغوي في الواجهات المعمارية، وهو مجال يتطور باستمرار في العمارة الحديثة. تتمثل الخصائص الفريدة لهذه المادة، مثل خفتها وخصائص العزل الحراري والمتانة، في جعلها مرشحًا مثاليًا لاستخدامها في الواجهات، حيث من المتوقع أن توفر حلولًا مبتكرة وعملية تتماشى مع الاتجاهات المعمارية المعاصرة. كما هدفت الدراسة إلى تعميق الفهم للزجاج السيراميكي الرغوي

وتسليط الضوء على إمكانياته كمواد بناء مرنة، بهدف توسيع استخدامها في المشاريع المعمارية المستقبلية. كما تقدم الدراسة رؤى هامة حول كيفية دمج هذه المادة في البناء الحديث، خاصة في تصميم الواجهات التي تجمع بين الجاذبية الجمالية والفوائد الوظيفية مثل كفاءة الطاقة والاستدامة.

Abstract:

The current study focuses on the experimental exploration of producing foamed glass-ceramics using locally sourced raw materials. The main goal is to reduce production costs while optimizing the use of readily available natural resources in the local environment. By emphasizing the use of these materials, the research aims to establish a sustainable and cost-efficient manufacturing process, while also minimizing the environmental impact of production. Furthermore, the study investigates the various potential applications of foamed glass-ceramics in architectural facades, an area that is continuously evolving in modern architecture. The unique properties of the material, such as its lightweight nature, thermal insulation properties, and durability, make it an ideal candidate for facades, where it is expected [i]to offer creative and practical solutions that align with contemporary architectural trends. This research intends to deepen the understanding of foamed glass-ceramics and highlight their potential as a flexible building material, to expand their use in future architectural developments. The study provides valuable insights into how this material can be integrated into modern construction, particularly in the design of facades that combine both aesthetic appeal and functional advantages, such as energy efficiency and sustainability.

Keywords:

Glass – Ceramics; Foam; Thermal; Insulation; architectural; Environment.

المقدمة:

يُعَدّ الزجاج السيراميكي الرغوي من المواد الحديثة التي حظيت باهتمام متزايد في مجالات الهندسة المعمارية وعلوم المواد، نظرًا لخصائصه الفريدة التي تجمع بين خفة الوزن، العزل الحراري والصوتي، والمقاومة الكيميائية والميكانيكية الجيدة. تعتمد عملية إنتاج هذا النوع من الزجاج على تحويل المواد الأولية إلى بنية رغوية عبر تقنيات تصنيع متطورة مثل تقنية إنتاج الرغوة عن طريق التلبيد إذا كانت باستخدام طريقة التلبيد ثنائية المراحل أو أحادية المرحلة أو طريقة التلبيد بدون عوامل رغوية خارجية وهي التقنية الأكثر استخداماً في إنتاجه وخاصة على مستوى الصناعة[ii،iii،iv،v]، مما يجعله خيارًا واعدًا في تطبيقات البناء المستدامة. ومن خلال هذه الدراسة، يتم استكشاف إمكانيات تحسين خواص المنتج النهائي عبر توظيف المخلفات الصناعية الزجاجية بكل أنواعها، مما يسهم في تحقيق الاستدامة البيئية وتقليل التكلفة الاقتصادية للإنتاج. يتناول هذا البحث أربعة محاور رئيسية المحور الأول يختص بتوضيح ماهية الزجاج السيراميكي وأهم خصائصه وآلية إنتاجه وكذلك الاعتبارات التكنولوجية الهامة لإنتاجه. المحور الثاني يشمل الدراسة التجريبية وأهم الخامات المستخدمة في التجربة وخطوات الإنتاج المتبعة وعرض نتائج التجربة. المحور الثالث دراسة تحليلية لمقارنة العينات الناتجة من التجربة. المحور الرابع ويشمل دراسة تطبيقية لتوظيف العينات الناجحة على الواجهات المعمارية ثم ينتهي البحث بعرض النتائج والتوصيات.

هدف البحث:

- التوصل إلى إنتاج نوعيات من الزجاج السيراميكي الرغوي الملون لاستخدامه في العمارة.

أهمية البحث:

- إثراء منظومة الصناعة المحلية بدراسة وافية لإنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي.
- الحصول على منتجات تصلح كعوازل حرارية وتقلل من استهلاك الطاقة.
- توفير الخامة محليا مما يؤدي لتوفير في العملة الأجنبية والخاصة باستيراد الزجاج السيراميكي الرغوي.

محددات البحث:

- إنتاج زجاج سيراميكي رغوي وتوظيفه في المنشآت المعمارية.

منهج البحث:

- استخدام المنهج التحليلي التجريبي.

1- ماهية الزجاج السيراميكي الرغوي:

الزجاج السيراميكي الرغوي هو أحد المواد العازلة للحرارة ذات الكفاءة العالية التي تتكون بصفة أساسية من هيكل مفرغ به مجموعة من التجاويف المسامية التي تلبي متطلبات السلامة البيئية وتجعله خفيف الوزن وصلب ومتين، يتكون بالأساس من شبكة زجاجية متبلورة قد تكون احادية الطور المعدني أو متعددة الاطوار المترابطة مع بعضها بصورة منتظمة ومحكمة.[vi]

1-1 خصائص الزجاج السيراميكي الرغوي:

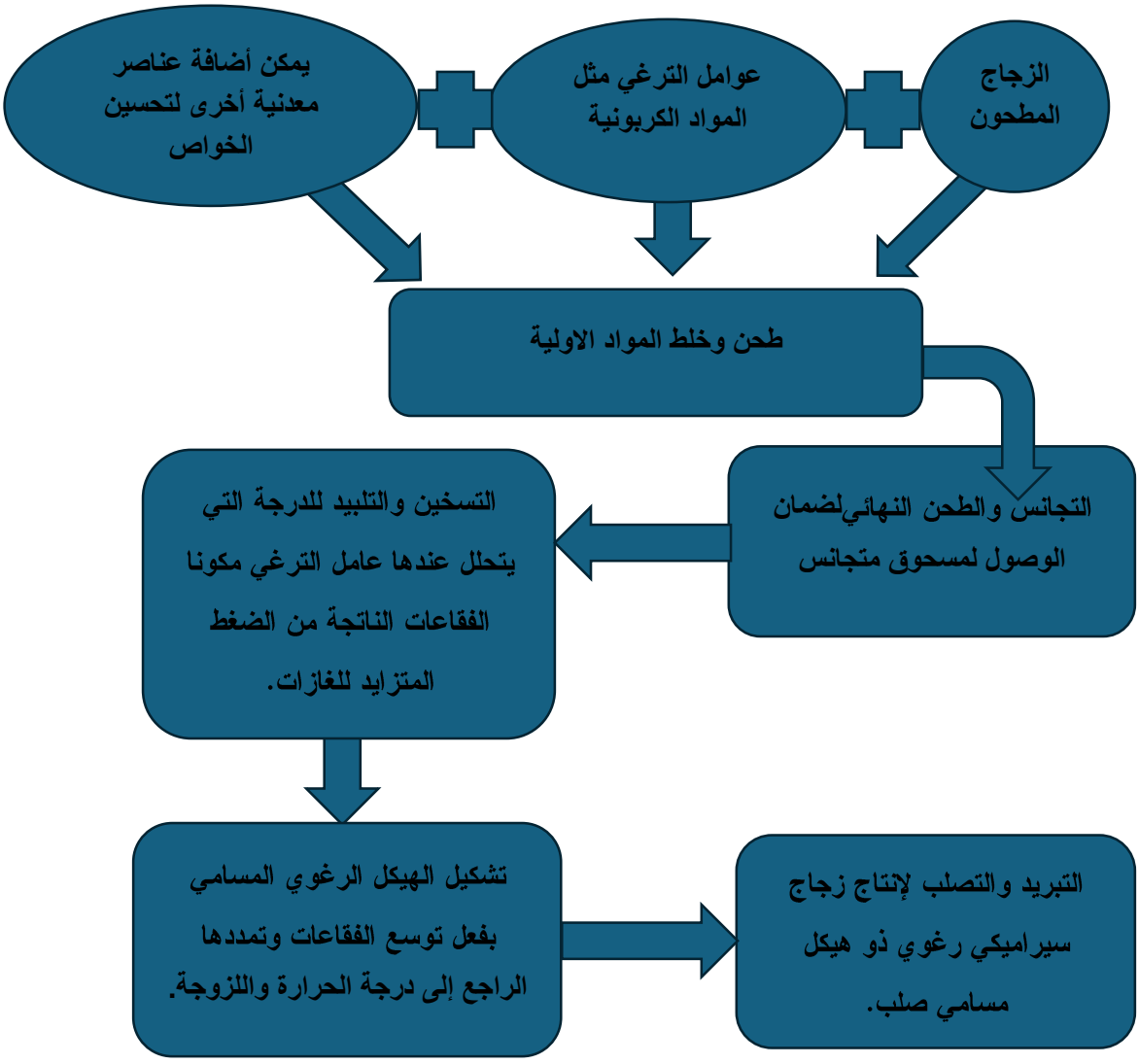
التركيب المجوف المسامي الصلب للزجاج السيراميكي الرغوي جعل له مزيجًا استثنائيًا من الخصائص[vii] مثل كونه: خفيف الوزن، صلب، متين، عدم القابلية الاحتراق، قوة الضغط عالية، أداء عزل حراري طويل الأمد،[viii] حيث يحتفظ بموصليه حرارية قيمة لامدا (٨). فيكون له موصلية حرارية تبلغ 0.036 وات/متر كلفن، وهو ما يعادل عادةً الأداء الذي يوفره عزل الصوف المعدني.

مما يتيح له قابلية التطبيق لمجموعة متنوعة من التطبيقات، بما في ذلك المدارس والمستشفيات ومواقف السيارات على الأسطح وفي البيئات الصعبة مثل حمامات السباحة والمغاسل والمطابخ المهنية. في جميع التطبيقات، تظل الكفاءة الحرارية؛ وبالتالي كفاءة الطاقة، ثابتة طوال عمر المبنى. حيث يعمل عزل الزجاج السيراميكي الرغوي ضمن نطاق درجة حرارة واسع جدًا من -269 درجة مئوية إلى +482 درجة مئوية.[ix]

1-2 آلية إنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي[x]:

يتم إنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي عبر عملية تعتمد على إضافة عامل الترغي(Foaming Agent) ، وهو مادة في اغلب الحالات تكون كربونية تُطحن مع الزجاج في بداية التصنيع. بعد مزج المكونات وطحنها حتى التجانس، يُسخن المسحوق الناتج إلى درجة حرارة معينة، حيث يتحلل عامل الترغي منتجًا غازات تتسبب في تكوين فقاعات داخل المادة اللدنة حراريًا. مع استمرار التسخين، تخضع جزيئات الزجاج لتليين التدفق اللزج[xi]، مما يسمح بتمدد الفقاعات الصغيرة إلى بنية رغوية متعددة المسام.

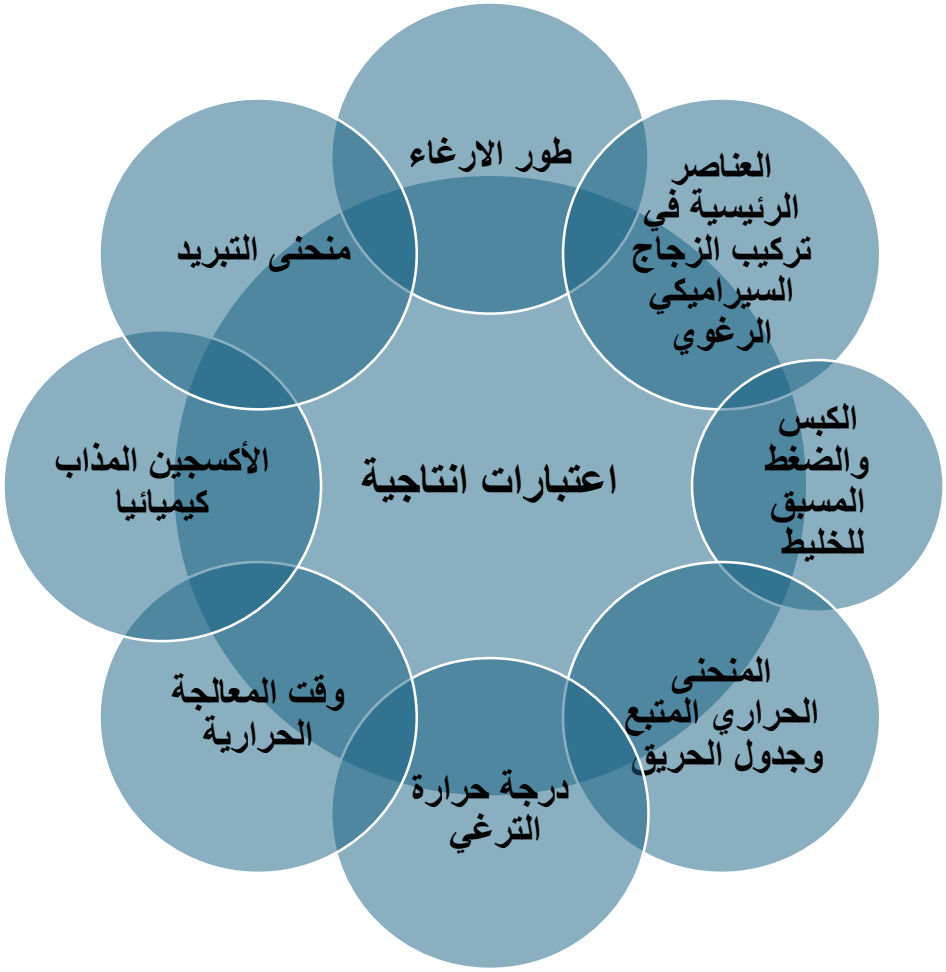
في المرحلة الأخيرة، يُبرَّد الزجاج، مما يؤدي إلى تثبيت المسام داخل البنية الرغوية، ليُنتج في النهاية مادة ذات كثافة منخفضة وقوة ضغط عالية، مناسبة للاستخدامات الهندسية والمعمارية.



الشكل التوضيحي 1 مخطط يوضح آلية إنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي

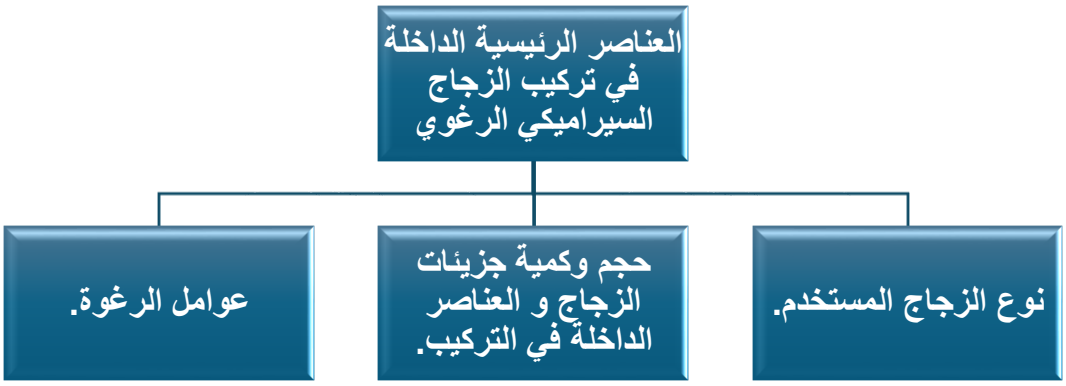
3-1 الاعتبارات التكنولوجية لإنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي:

الزجاج السيراميكي الرغوي يتكون بصفة رئيسية من رغاو مسامية متصلبة، تكون المرحلة الصلبة فيها عبارة عن زجاج، مملوء بمرحلة غازية. تُستخدم عادةً طريقة المسحوق لتحويل الزجاج إلى رغوة، والتي تتضمن تسخين خليط من مسحوق الزجاج وإضافات مواد خاصة أثناء التسخين تسهل تكوين مرحلة غازية تسمى بعوامل الترغي (الرغوة)،[xii]لذا أهم اعتبارات انتاجه تتمثل في[xiii]:



الشكل التوضيحي 2 مخطط يوضح الاعتبارات التكنولوجية لإنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي.

- العناصر الرئيسية الداخلة في تركيب الزجاج السيراميكي الرغوي وحجمها وكمياتها:



الشكل التوضيحي 3 مخطط يوضح العناصر الرئيسية الداخلة في تركيب الزجاج السيراميكي الرغوي

ان حجم الجزيئات الأولية وطبيعة وسلوك العناصر الداخلة في تركيب الزجاج السيراميكي الرغوي من زجاج وعوامل رغوة وغيرها وكذلك طريقة التحضير المتبعة في الإنتاج مثل الضغط المسبق للخليط يؤثر على تجانس بنية الرغوة وطبيعة الزجاج السيراميكي الرغوي الناتج مما يضفي عليه خصائص مهمة مثل التوصيل الحراري حيث انه يتأثر بالمسامية والتركيب، القوة الميكانيكية التي تتحسن بإضافة مواد مثل البوراكس والكوارتز، امتصاص الماء يعتمد على التوازن بين المكونات.

- نوع الزجاج المستخدم:

يمكن أستخدام كل أنواع الزجاج في إنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي حيث يعتمد إنتاجه على طبيعة التفاعل أثناء التصنيع والبنية الزجاجية المستقرة التي يمكن تحويلها إلى طور بلوري أثناء التلبيد، مع إمكانية تكوين مسام رغوية الداخل فيها عناصر كيميائية تختلف من نوع لأخر[xiv]. ولكن تختلف خصائص الزجاج السيراميكي الرغوي الناتج بأختلاف نوع الزجاج المستخدم لأختلاف أنواع العناصر الداخلة في تركيب كل نوع فالعناصر الداخلة في تركيب الزجاج المستخدم لها دور فعال في مراحل وخطوات الإنتاج والرغوة الناتجة وبالتالي الخصائص المميزة له ومن أهم العناصر المؤثرة الداخلة في التركيب الكيميائي الزجاج:

السيليكا:(SiO_2) مادة السيليكا هو الأكثر شيوعا واستخداما حيث تشكل 70-75% من الوزن، تساهم في القوة الميكانيكية والعزل الحراري.

أكاسيد القلويات والقلوية الأرضية :(Na_2O, K_2O, MgO, CaO) تقلل درجة الانصهار، تعزز القوة الميكانيكية والاستقرار الحراري.

أكاسيد إضافية :(Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO) تعزز المتانة، تقلل التمدد الحراري، وتحسن مقاومة التآكل.

- حجم وكمية جزيئات الزجاج:

حجم حبيبات المواد الخام لتصنيع الزجاج السيراميكي الرغوي يعتمد بشكل كبير على نوع المادة الخام وطريقة الإنتاج المستخدمة. بشكل عام، يكون من الضروري أن تكون حبيبات المواد الخام ذات حجم مناسب لضمان عملية تشكيل وتكوين المسامية بطريقة فعالة للزجاج السيراميكي الرغوي. عادةً ما تتراوح أحجام الحبيبات المستخدمة في صناعة الزجاج السيراميكي الرغوي بين 50 ميكرومتر و 500 ميكرومتر، ولكن قد يختلف هذا بناءً على الخصائص المطلوبة للمادة النهائية.

- **حبيبات صغيرة (أقل من 100 ميكرومتر :** يمكن أن توفر سطحًا أكبر وتساعد في تحسين تفاعل المواد خلال عملية التشكيل، مما يؤدي إلى تحسين خواص العزل الحراري.
- **حبيبات أكبر (أكثر من 200 ميكرومتر) :**قد تؤدي إلى تحسين المتانة والصلابة، لكن يمكن أن تقلل من خصائص العزل الحراري بسبب تقليل المساحات الفارغة داخل الهيكل الرغوي.

كما يمكن قياس حجم حبيبات الخامات الداخلة في تصنيع الزجاج السيراميكي الرغوي عن طريق

1- الطريقة التقليدية التحليل بالمنخل (Sieve analysis)[xv]

يتم فيها قياس حجم الحبيبات عن طريق استخدام مجموعة من المناخل ذات فتحات بأحجام مختلفة (مقاييس شبكية محددة).

2- مقياس الليزر لتوزيع الحجم[xvi] (laser particle size analyzer -LPSA)

يتم فيها قياس حجم الحبيبات عن طريق تشتت ضوء الليزر عند أصتدامه بها و يتم ذلك عن طريق تجهيز معلق للعينة في وسط سائل مثل الماء أو الكحول (إذا كانت الجسيمات دقيقة جدًا)، ثم تمرير الحبيبات داخل جهاز التحليل الذي يستخدم الليزر لتحديد قطر كل حبيبة بدقة تصل إلى 0.1 ميكرون ومنها يتم عرض الرسم البياني لتوزيع حجم الحبيبات.

3- التحليل بالمجهر الإلكتروني الماسح[xvii] (SEM - Scanning Electron Microscope)

يوفر المجهر الإلكتروني الماسح صورًا مكبرة لحبيبات المادة، مما يسمح بقياس الأحجام والأشكال الفردية.

4- قياس الحجم باستخدام مقياس الكثافة (Sedimentation Method - Stokes' Law)

يعتمد على **سرعة ترسيب الجسيمات في سائل** طبقًا لقانون **ستوك**.

- عوامل الرغوة (Foam Agent):

كربونات الكالسيوم :($CaCO_3$) تتحلل منتجةً CO_2 ، مما يسهم في تكوين الرغوة.

الجرافيت (الكربون C): يوفر هيكلًا مساميًا أكثر تجانسًا.

أكاسيد أخرى :(MnO_2, Fe_2O_3) تعزز تحرير الغاز وتحسين المسامية.

- **المنحنى الحراري المتبع وجدول الحريق (Heating rate)[xviii]:**

يجب أن يكون المنحنى الحراري دقيقًا لضمان تكوين الرغوة الزجاجية بشكل مناسب. يؤثر معدل التسخين على توصيل الحرارة في الخليط، حيث يؤدي التسخين السريع (40°م/دقيقة) إلى تشقق الزجاج، بينما يُفضل معدل بين 5-10°م/دقيقة لتجنب المشاكل. كما أن التسخين البطيء غير مرغوب فيه لأنه قد يؤدي إلى توليد الغازات مبكرًا قبل تلبيد الزجاج. للحفاظ على تجانس الرغوة، يجب أن يكون التدرج الحراري في الفرن صغيرًا (±5°م)، وإلا فستكون المسامية غير متجانسة.

- **درجة حرارة الترغي (Foaming temperature)[xix]:**

تعتمد درجة حرارة الترغي على لزوجة ، حيث تؤثر بشكل مباشر على بنية الرغوة ومساميتها. يجب تحقيق توازن بين اللزوجة ودرجة الحرارة لضمان استقرار الرغوة، تجانس الجزيئات، ورقة الجدران الفاصلة.

عند درجة حرارة مرتفعة أعلى من درجة نقطة التليين(Softening Point) وأقل من ننقطة الأنصهار(Melting Point) ، تصبح اللزوجة منخفضة، مما يؤدي إلى صعوبة التحكم في الهيكل وانتشار الفقاعات بشكل عشوائي. عند درجة حرارة منخفضة جدًا، تكون اللزوجة مرتفعة، مما يعوق تمدد الغاز، ويؤدي إلى مسامية مفتوحة وزيادة امتصاص الماء. عند الدرجة المثالية (600-750°م)، يحدث تضخم متوازن في الحجم، مع تلبيد (sintering)وتبلور(crystallization) طفيف لمسحوق الزجاج. بينما عند 750-800°م، ينشط عامل الرغوة، مما يؤدي إلى زيادة كبيرة في الحجم تصل إلى 700%، مع ارتفاع المسامية وانخفاض قوة الضغط.

- **وقت المعالجة الحرارية[xx] (Heat treatment time):**

تعتمد كفاءة الرغوة على معدل التسخين العالي لتقليل وقت المعالجة الحرارية، حيث تؤثر مدة المعالجة على كثافة الرغوة الزجاجية. تنخفض الكثافة خلال مرحلة تحول الغاز، لكنها تبدأ في الزيادة مجددًا عند التحام المسام وانخفاض المساحة السطحية. لذلك، يجب تحديد وقت المعالجة بدقة وإزالة الرغوة من المنطقة الساخنة قبل بدء الالتحام للحفاظ على خصائصها.

- **الأكسجين المذاب كيميائيًا(Chemical Dissolved Oxygen):**

يلعب الأكسجين المذاب كيميائيًا دورًا مهمًا في تكوين الرغوة في الزجاج، حيث يؤثر على تفاعلات الأكسدة والاختزال، خاصة في زجاج السيليكات. يساهم في تشكيل الغاز الضروري للرغوة، كما يستخدم في أكسدة الكربون، وهو عنصر أساسي في تكوين الزجاج الرغوي. يعتمد توازن الأكسجين على درجة الحرارة وتركيب الزجاج، ويتحقق عادة عند درجات حرارة أعلى من 1100°م.

- **منحنى التبريد[xxi] (Cooling rate):**

يعد معدل التبريد المنخفض ضروريًا لإنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي وتقليل الإجهادات. أثناء التبريد، ينخفض الضغط بين الجزيئات، مما قد يسبب انكماشًا وإجهادات شد. يعتمد معدل التبريد على التركيب الكيميائي للزجاج وبنية الرغوة، بما في ذلك عدد وحجم المسام وسمك الجدران. توفر المسام المفتوحة موصلية حرارية أعلى، مما يزيد من معدل التبريد. يمكن استخدام التبريد السريع حتى درجة حرارة أعلى قليلًا من نطاق التلدين (annealing range) للحفاظ على البنية والغاز المتصاعد عن طريق زيادة اللزوجة.

- **عامل الترغي[xxii] (Foaming agent):**

يعد عامل الترغي العامل الأهم في إنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي، حيث يتم تحويل المواد الخام إلى رغوة باستخدام عوامل رغوة تولد غازات عبر التحلل أو التفاعل. يجب أن يحدث توليد الغاز ضمن نطاق لزوجة مثالي بين 10^3 :10^5 باسكال، عند درجة حرارة 800-1000°م، لضمان تكوين المسام المغلقة ومنع خروج الغازات من المصهور.

يؤثر نوع وحجم وتركيز عامل الرغوة على اللزوجة وخصائص الرغوة النهائية، حيث قد يترك بعض العوامل بقايا تؤثر على التبلور. يتم إنتاج الرغوة بطريقتين :التحلل الحراري والتفاعل الكيميائي.

2- الدراسة التجريبية:

تمت الدراسة التجريبية على خلطتين لهما نفس الخامات المستخدمة باختلاف نوع او نوعين في العناصر المكونة لهم مع اختلاف في النسب المكونة لهم.

2-1 الخامات الداخلة في التجربة:

العينة الأولى: أستُخدم فيها خامات معملية تتميز بنسبة نقاء عالية. والجدول رقم (1) يوضح الخامات الأولية الداخلة في تركيبها ونسبة كلا منهم في الخلطة مع ملاحظة انه يتم أضافة الماء و الجيلاتين فوق الوزن أي أعلى من نسبة 100% للعناصر الداخلة في الخلطة حيث انهما يلعبان دور محلي بديل لمرحلة الكبس والضغط اللازم لتماسك العينة:

الجدول رقم 1 يوضح تركيب العينة الأولى.

الخامة	النسبة المئوية %	الوزن بالجرام
نفايات من الزجاج Glass Waste	%60	60 جم
الومينا Al_2O_3	%20	20 جم
حمض البوريك H_3BO_3	%15	15جم
كربونات الصوديوم Na_2Co_3	%5	5جم
كلوريد صوديوم NaCl	%3	3جم
ماء H_2O	5% من الوزن	5.15 جم
جيلاتين	1.5% من الوزن	3جم

العينة الثانية: استُخدم فيها خامات بنسبة نقاء أقل من العينة الأولى لأنها من محاجر تجارية وليست معملية. والجدول رقم (2) يوضح الخامات الأولية الداخلة في تركيبها ونسبة كلا منهم في الخلطة مع ملاحظة انه يتم أضافة الماء و الجيلاتين فوق الوزن أي أعلى من نسبة 100% للعناصر الداخلة في الخلطة حيث انهما يلعبان دور محلي بديل لمرحلة الكبس والضغط اللازم لتماسك العينة:

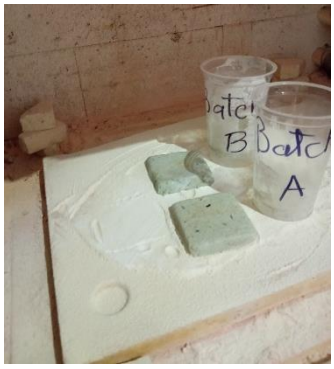
الجدول رقم 2 يوضح تركيب العينة الثانية.

الخامة	النسبة المئوية %	الوزن بالجرام
نفايات من الزجاج Glass Waste	70	70
الومينا Al_2O_3	10	10
حمض البوريك H_3BO_3	10	10
كربونات الكالسيوم Ca_2Co_3	10	10
ماء H_2O	5% من الوزن	5 جم
جيلاتين	3% من الوزن	3 جم

2-2خطوات إنتاج التجربة: تم إجراء خطوات واحدة على كلا العينتين كما هو موضح في المراحل التالية الموضحة في الجدول التالي رقم (3):

الجدول رقم 3 يوضح المراحل العملية للتجربة.

المرحلة	التوصيف	الشكل
المرحلة الأولى	وزن الخامات الأولية بالأوزان الموضحة في الجدول رقم (1)، (2) باستخدام ميزان رقمي حساس كما هو موضح في الشكل رقم (4).	**الشكل التوضيحي 4 مرحلة وزن الخامات.**
المرحلة الثانية	طحن وخلط الخامات معاً باستخدام أداة طحن خامات منزلية كما هو موضح بالشكل رقم (5) كبديل لأداة (Ball Mill) المعملية.	**الشكل التوضيحي 5 مرحلة طحن و خلط الخامات**
المرحلة الثالثة	مزج الخامات معاً بالماء والجيلاتين كما هو موضح في الشكل رقم (6) كخطوة بديلة لخطوة الكبس الجاف لضمان ثبات أبعاد العينة ولأهمية عامل الضغط أثناء مراحل الإنتاج.	الشكل التوضيحي 6 مرحلة مزج الخامات بالماء و الجيلاتين.

المرحلة الرابعة	صب الخلطة في قالب (كبس الخلطة في قالب بعد مرحلة التصلب -التشمع-بعض الشيء) باستخدام قوالب من الجبس مجهزة مسبقاً كما هو موضح في الشكل رقم (7).	 **الشكل التوضيحي 7 مرحلة كبس الخلطة في القالب.**
المرحلة الخامسة	عزل الرف الحراري بمادة الألومينا مع الفلدسبار بوتاسيومي.	 **الشكل التوضيحي 8 مرحل العزل و التجهيز للحريق.**
المرحلة السادسة	ضبط برنامج الحريق في فرن الزجاج المتخصص بحيث ترتفع درجة الحرارة 120°م كل 30دقيقة لتصل إلى **450**°م خلال 120دقيقة من الزمن. ومن ثم يبدأ منحنى الحريق في التبريد ليصل إلى درجة حرارة الغرفة.	 **الشكل التوضيحي 9مرحلة ضبط المنحنى الحراري وبداية الحريق.**

المرحلة الثامنة	إتمام عملية الحريق والتبريد للحصول على العينة الأولى الموضحة في الشكل رقم (10)	**الشكل التوضيحي 10 الشكل النهائي للعينة الأولى**
	إتمام عملية الحريق والتبريد للحصول على العينة الثانية الموضحة في الشكل رقم (11)	**الشكل التوضيحي 11الشكل النهائي للعينة الثانية.**

عند ملاحظة وجود بعض الشظايا والبقايا الزجاجية على سطح البلاطة الناتجة غير تامة الانصهار تم إعادة التجربة بتعرض الخلطة ذاتها للعينتين إلى درجة حرارة أعلى باستخدام المنحنى الحراري ذاته بحيث ترتفع درجة الحرارة 120°م كل 30دقيقة لتصل إلى 750 °م وكانت النتيجة كما هو موضح في الشكل رقم (12) سطح خشن الملمس خالي من الشظايا وبقايا الزجاجية لون أفتح للجسم الناتج.

الشكل التوضيحي 12 يوضح شكل العينة الأولى بعد تعرضها لدرجات حرارة أعلى تصل إلى °م 750

3-2 نتائج التجربة:

بأتباع خطوات ومراحل الإنتاج السابقة بالتركيبة السابق ذكرها في الجدول رقم (1) و(2) لكلتا العينتين ثبت نجاح العينة الأولى في انتاج الزجاج السيراميكي الرغوي كما هو موضح في الشكل رقم (10) بينما لم ينجح في العينة الثانية الموضحة في الشكل رقم (11) فمن الملاحظ عدم وجود كلوريد الصوديوم (NaCl) بتركيب العينة الثانية الموضحة بالجدول رقم (2) كما انه تم استبدال كربونات الصوديوم (Na_2Co_3) المستخدم في تركيب العينة الأولى الموضحة بالجدول رقم(1) بكربونات الكالسيوم التجاري (Na_2Co_3) و المقصود بالتجاري أحتوائه على نسب شوائب أعلى من المعملى لاختلاطة بخامات أثناء النقل و التعبئة فكان لابد من استخدام مصدر لكربونات الكالسيوم عالية النقاوة لان النوع التجاري به كمية كبيرة من الشوائب وهذا قد يكون سببا رئيسياً في تشقق العينة الثانية فكان من الممكن أيضا استخدام كربونات الكالسيوم بعنصر طبيعي مثل الجير الحي بعد دراسة نسبة الكربون و حساب الوزن والكمية المناسبة منه لتحقيق النسبة المرجوة في الخلطة حيث ان محتوى أكسيد الكالسيوم(CaO) يساهم في تعزيز متانة الزجاج السيراميكي ومقاومته الكيميائية، بينما يساعد أيضًا في تشكيل هيكل شبكة قوي يمكنه تحمل التغيرات الحرارية. فأثناء عملية التلبيد في العينة الناجحة أخذ البوراكس ($Na_2B_4O_7$) المستخدم وكلوريد الصوديوم (NaCl) الموجود في المزيج بالتفكك، مفرجًا غازات أدت إلى تشكيل فقاعات داخل المادة، مما أدى في النهاية إلى الحصول على الهيكل الرغوي المطلوب.

3- دراسة مقارنة بين العينات الناتجة:

الجدول رقم (4) يوضح المقارنة بين العينتين الناتجتين من تجربة انتاج زجاج سيراميكي رغوي بالخطوات السابق ذكرها.

الجدول رقم 4

	العينة الاولى	العينة الثانية
الشكل النهائي للعينة		
السمات الشكلية	تتميز العينة الناتجة بان لها لون رمادي داكن، ذات جسم مسامي ذو سطح له ملمس متوسط الخشونة، صلب متماسك، محتفظ بأبعاده الخارجية التي تم التشكيل بناء عليها.	تتميز العينة الناتجة بلون رمادي داكن ولكنها هاشة غير متماسكة ذات سطح أنعم من العينة الأولى مما أدى إلى تشوه في الابعاد الخارجية لها.
عامل الرغوة (مصدر الكربون)	كربونات الصوديوم(Na_2CO_3) تم تحضيرها معملياً لذا فنقائها مدروس.	كربونات الكالسيوم التجارية(Ca_2CO_3) ذات شوائب غير مدروس نسبتها.
نسبة الخامات الداخلة في التركيب	نفايات الزجاج %60 الومينا Al_2O_3 %20 حمض البوريك H_3BO_3 %15 كربونات الصوديوم Na_2Co_3 %5	نفايات الزجاج %70 الومينا Al_2O_3 %10 حمض البوريك H_3BO_3 %10 كربونات الكالسيوم Ca_2Co_3 %10 ماء H_2O 5% من الوزن

	كلوريد صوديوم NaCl	3%	جيلاتين 3% من الوزن مع ملاحظة عدم استخدام كلوريد صوديوم NaCl
	ماء H_2O	5% من الوزن	
	جيلاتين	1.5% من الوزن	
سبب الفشل المحتمل	عينة ناجحة.		شوائب كربونات الكالسيوم، غيابNaCl مما يدعى إلى استخدام كربونات الكالسيوم عالية النقاء أو الجير الحي (كمثال لمصدر غنى بكربونات الكالسيوم من الطبيعة من الطبيعة).
النتيجة النهائية	نجاح في إنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي.		فشل نتيجة التشققات.

المقارنة توضح أن تغيير نوعية الخامات، حتى لو بنسبة بسيطة يمكن أن يكون له تأثير كبير على النتائج النهائية، مما يؤكد أهمية اختيار المواد بعناية والتحقق من نقائها عند إجراء التجارب الصناعية والتطبيقية

4- دراسة تطبيقية لتوظيف العينة الناجحة على واجهة معمارية:

المبنى المقترح مبنى مسجد جامعة بدر بالقاهرة

نوع المبني: دور عبادة (مسجد)

الشكل التوضيحي 13 يوضح الأحداثيات الجغرافية ؛(plane) لموقع جامعة بدر.

1-4 تحليل متطلبات المبنى من حيث:

1- الأداء الحراري:

- يقع المبنى(المسجد) في جامعة بدر-شمال شرق القاهرة-مدينة بدر- القاهرة- مصر 30.14°شمال 31.72°شرق 216 متر فوق سطح البحر.[xxiii]
- التي تقع في مناخ صحراوي جاف، مما يعني درجات حرارة مرتفعة نهارًا وانخفاضها ليلًا، إشعاع شمسي قوي خلال معظم أيام السنة، رطوبة منخفضة مع بعض التغيرات الموسمية رياح جافة ومغبرة في بعض الفترات. فهم طبيعة مناخ الموقع سهل على المصمم تحديد متطلبات العزل الحراري التي تتلخص في:
- استخدام مواد بناء ذات عزل حراري جيد مثل الطوب من الزجاج السيراميكي الرغوي (في مرحلة البناء).
- تعزيز الأسطح العازلة للأسقف والجدران باستخدام مواد عازلة مثل الواح او بلاطات الزجاج السيراميكي الرغوي العازل للحرارة (في مرحلة ما بعد البناء كما هو ف الدراسة المقترحة).
- اختيار ألوان خارجية فاتحة لخفض امتصاص الحرارة.

2- النفاذية الضوئية:

الشكل التوضيحي 14 يوضح شكل المبنى في الواقع.

يتم تحقيق نفاذية الضوء من خلال الفتحات المعمارية الزجاجية، والتي كان لها دور في تصريف الهواء الساخن، استغلال تيارات الهواء البارد ليلًا.

3- مقاومة العوامل البيئية:

- تقليل عدد الفتحات المواجهة للرياح السائدة، خصوصًا من الجهة الشمالية الغربية حيث تهب الرياح المحملة بالغبار.
- اختيار المواد المقاومة للتآكل بسبب الرمال مثل استخدام الزجاج السيراميكي الرغوي الذي يرف بمقاومته الكيميائية والميكانيكية العالية ضد تأثير الرياح المحملة بالرمال.

- طلاء الواجهات بمواد مقاومة للتآكل والغبار مثل تكسية الزجاج السيراميكي الرغوي بطقة زجاجية ملونة[xxiv] (Glazes) أقرب لأنواع الطلاء السيراميكية المستخدمة في طلاء الخزف.
- مقاومة الرطوبة والتغيرات الجوية عهن طريق استخدام خامة عالية المقاومة للرطوبة مثل الزجاج السيراميكي الرغوي وأيضاً استخدام الفواصل الحرارية في الجدران والأسقف أثناء تركيبه لتجنب التشققات الناتجة عن التمدد والانكماش المستمر بسبب اختلاف درجات الحرارة.
- مقاومة تأثير الزمن والتدهور الطبيعي باستخدام مواد بناء ذات عمر افتراضي طويل غير قابلة للتحلل والتآكل السريع، وهو ما يميز خامة الزجاج السيراميكي الرغوي حيث انه يوفر تطبيق أنظمة حماية دورية بسبب قدرته على العزل الحراري.

4- العوامل الجمالية:

- يفتقر المبنى بصورته الحالية إلى تحقيق القيمة الجمالية، ولكن تسعى الفكرة التصميمية المقترحة بإضفاء قيمة جمالية باستخدام التصميمات ذات صلة بالطراز الإسلامي مع الألوان المميزة لهذا الاتجاه الفني ومرتبطة بالاتجاه المعماري المستخدم في مباني الجامعة.

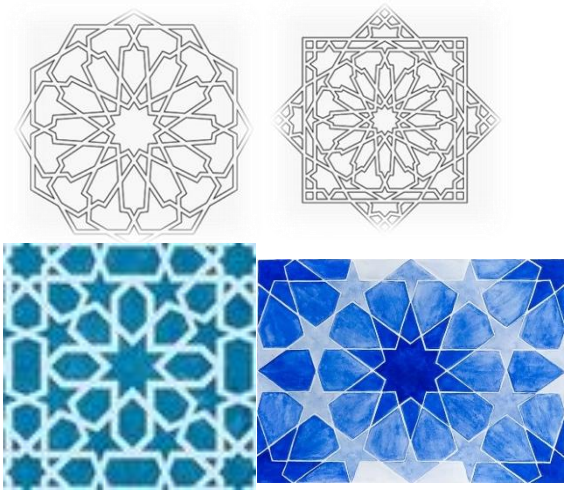
2-4 اقتراح واجهة معمارية نموذجية للتطبيق:

1- الجانب التعبيري للفكرة التصميمية:

اعتمدت فكرة تصميم واجهة المسجد على تطبيق بلاط الزجاج السيراميكي الرغوي العازل للحرارة لإكساب الواجهة قيمة جمالية بالإضافة لقيمته الوظيفية الفعالة من عزل حراري جيد يساعد على توفير الطاقة المستهلكة لتبريده وتوفير الراحة الحرارية للمصليين في فصل الصيف.

2- مصادر الاستلهام:

اعتمدت الفكرة التصميمية على الاستلهام من **الطراز الإسلامي** لتكسيه الواجهة باستخدام بلاط الزجاج السيراميكي الرغوي باستخدام **الألوان** المميزة للطراز كدرجات اللون الأزرق المميزة، **والوحدات الزخرفية** المميزة للفن الإسلامي كما هو الشكل رقم (15).



الشكل التوضيحي 15 يوضح بعض العناصر من الزخارف الإسلامية المستخدمة في التصميم.

3- الأفكار التصميمية المقترحة:

- **الفكرة التصميمية الأولى:**

الشكل التوضيحي 16 الفكرة التصميمة المقترحة الأولى.

- **الفكرة التصميمية الثانية:**

الشكل التوضيحي 17 الفكرة التصميمية المقترحة الثانية.

- **الفكرة التصميمية الثالثة:**

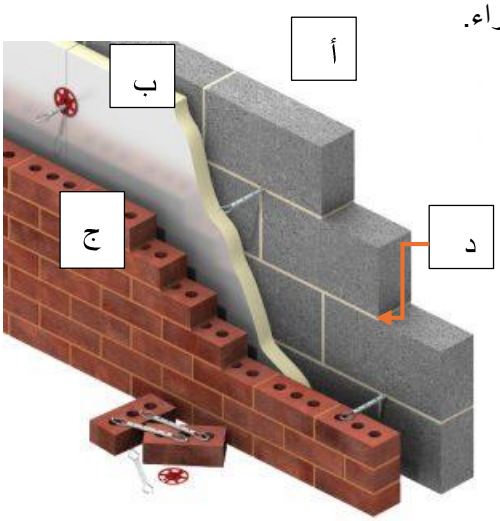
الشكل التوضيحي 18 الفكرة التصميمية المقترحة الثالثة.

4- النتائج المتوقعة:

- **تقليل الحمل الحراري داخل المسجد.**
- **تحسين راحة المصلين** خاصة خلال صلاة الجمعة والتراويح في الصيف.
- **تقليل استهلاك الطاقة** وبالتالي تخفيض تكاليف التشغيل.
- **تحقيق استدامة بيئية** تتماشى مع معايير المباني الخضراء.
-

4-3-آلية تثبيت بلاط الزجاج السيراميكي الرغوي على الواجهة:

تستخدم الشباك البلاستيكية طبقاً **معايير** – **ASTM C1325** الخاصة بالمواد الأسمنتية الليفية المستخدمة في تثبيت البلاط و**المواصفات الفنية لمنظمة** – **ISO 13007** التي تحدد أنواع المواد اللاصقة وطرق التركيب للبلاط والموزاييك يتم استخدام **الشبك الليفي (Fiberglass Mesh)** في تثبيت ظهر البلاطات فهذا الشبك مصنوع عادةً من الألياف الزجاجية أو البلاستيكية المعالجة بمادة لاصقة مقاومة للرطوبة والقلويات، مما يمنحه القوة والمتانة اللازمة لدعم البلاط أثناء التركيب. حيث يتم تثبيت بلاط الزجاج السيراميكي الرغوي عليها حسب التصميم بواسطة لاصق الغراء، من ثم يتم تثبيتها على الواجهة



الشكل التوضيحي 19 يوضح طريقة تثبيت و تركيب الزجاج السيراميكي الرغوي على حائط.

مباشرة باستخدام التثبيت الميكانيكي بشكل مبدأ باستخدام المسامير المعدنية ثم استخدام مادة لاصقة صالحة للتثبيت خارجياً (مقترح استخدام مادة CETOX-H) كما هو موضح في الشكل رقم (19) حيث أ) يعبر عن بلاطات الزجاج السيراميكي الرغوي المستخدمة، ب) يعبر عن اللاصق المستخدم، ج) يعبر عن الحائط، د) يعبر عن أدوات التثبيت الميكانيكي.

4-4 التوافق مع النظام الإنشائي:

نوع الجدار الانشائي للمبنى جدار خرساني مسلح مما يتوافق مع طريقة التثبيت السابق ذكرها. حيث ان خصائص الزجاج السيراميكي الرغوي (الكثافة والوزن الخفيف، مقاومته للضغط والانحناء، العزل الحراري والصوتي) تؤهله للتوافق مع النظام الإنشائي المستخدم كما ان مرونة الحركة الناتجة من طريقة التثبيت على شِباك تسمح له بالحرية في توزيع العناصر التصميمية والتطبيق على سطح المبنى الخارجي حتى في حالة المباني الدائرية أو ذات الأبعاد غير المنتظمة كما هو في المثال المُقترح.

5- نتائج البحث:

تم التوصل لتركيبة لإنتاج الزجاج السيراميكي الرغوي (foam glass ceramic) باستخدام خامات محلية مثل (كسر الزجاج) أو (شعيرات الزجاج) (fiber glass) كنوع من الاستدامة عن طريق استغلال الهدر من مخلفات المصانع وكذلك بعض الخامات والأكاسيد من الطبيعة والبيئة المحلية مما ساعد على تقليل تكاليف استيرادها من الخارج.

6- توصيات البحث:

- ضرورة استخدام خامات ذات نقاء مرتفع لضمان نجاح الإنتاج، خاصة عند التعامل مع عمليات حرارية دقيقة مثل تصنيع الزجاج السيراميكي الرغوي.
- أهمية وجود كلوريد الصوديوم كعامل محفز في تفاعل التكوين، وبالتالي يجب عدم إهماله في التركيبات المستقبلية.
- عند استبدال كربونات الصوديوم بكربونات الكالسيوم، يجب استخدام نوع عالي النقاء أو مصدر طبيعي مثل الجير الحي مع ضبط الكمية لتحقيق التفاعل الكيميائي المطلوب.
- يمكن إجراء اختبارات إضافية على كربونات الكالسيوم التجارية لتحديد تركيبها الكيميائي الدقيق وذلك لمعرفة نوع ونسبة الشوائب ومعرفة مدى تأثيرها على التركيب النهائي.

7- المراجع (References):

- Andrea Ventrella, Federico Smeacetto, Milena Salvo, and Monica Ferraris,(2011),” A New Glass Coating for Foam Glass”, JOURNAL OF APPLIED CERAMIC TECNOLOGY ,8 [1] PP.187–193.DOI:10.1111/j.1744-7402.2009.02426.x
- Dina Abdel Alim. (2009)." Production and characterization of foam glass from container Production and characterization of foam glass from container glass waste"A Thesis submitted to The Mechanical Engineering Department In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.
- Dishman, Karla. (2006). Sieving in Particle Size Analysis. DOI:10.1002/9780470027318.a1514.

- FOAMGLAS® application & solutions. Retrieved from Owens Corning: https://www.foamglas.com/en/
- Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).
- Prałat, Karol and Krymarys, Ewa. (2018). A particle size distribution measurements of selected building materials using laser diffraction method. DOI: 10.4467/2353737XCT.18.076.8558.
- R.K. Chinnam, S. M. (2014). Borosilicate Glass Foams from Glass Packaging Residues. In Ceramic Transactions Series (pp. 203-210). Wiley.
- Retrieved from meteoblue: https://www.meteoblue.com/ar/weather/forecast/week
- Sandhya P. K. · Sreekala M. S. · Sabu Thomas. (2022). PHENOLIC BASED FOAMS Preparation, Characterization, and Applications. Singapore: Vijay Kumar Thakur.
- V. I. Suslyaev,O. V. Kazmina,B. S. Semukhin,Yu. P. Zemlyanukhin,and M. A. Dushkina.(2013) "ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF A FOAM GLASS CRYSTAL MATERIAL" Russian Physics Journal, Vol. 56,p.p990-996.

[i]

[ii] V. I. Suslyaev,O. V. Kazmina,B. S. Semukhin,Yu. P. Zemlyanukhin,and M. A. Dushkina.(2013) "ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF A FOAM GLASS CRYSTAL MATERIAL" Russian Physics Journal, Vol. 56,p.p990-996.

[iii] Dina Abdel Alim. (2009)." Production and characterization of foam glass from container Production and characterization of foam glass from container glass waste"A Thesis submitted to The Mechanical Engineering Department In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.

[iv] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[v] R.K. Chinnam, S. M. (2014). Borosilicate Glass Foams from Glass Packaging Residues. In *Ceramic Transactions Series* (pp. 203-210). Wiley.

vi Giovanni Scarinci,Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[vii] Sandhya P. K. · Sreekala M. S. · Sabu Thomas. (2022). PHENOLIC BASED FOAMS Preparation, Characterization, and Applications. Singapore: Vijay Kumar Thakur.

[viii] *FOAMGLAS® application &solutions*. Retrieved from Owens Corning: https://www.foamglas.com/en/

[ix] FOAMGLAS® application &solutions. (n.d.). Retrieved from Owens Corning: https://www.foamglas.com/en/

[x] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[xi] **تلبيد التدفق اللزج (Viscous Flow Sintering)** هو عملية تحدث عند تسخين المواد الزجاجية أو السيراميكية إلى درجة حرارة تجعلها في حالة لزجة دون أن تنصهر كليًا. خلال هذه العملية، تبدأ الجسيمات بالتحرك والاندماج تدريجيًا نتيجة لزوجتها العالية، مما يؤدي إلى تقليل المسامية وزيادة التماسك بين الجزيئات.

xii Sandhya P. K. · Sreekala M. S. · Sabu Thomas. (2022). PHENOLIC BASED FOAMS Preparation, Characterization, and Applications. Singapore: Vijay Kumar Thakur.

[xiii] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[xiv] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[xv] Dishman, Karla. (2006). Sieving in Particle Size Analysis. DOI:10.1002/9780470027318.a1514.

[xvi] Prałat, Karol and Krymarys, Ewa. (2018). A particle size distribution measurements of selected building materials using laser diffraction method. DOI: 10.4467/2353737XCT.18.076.8558.

[xvii] Dina Abdel Alim. (2009)." Production and characterization of foam glass from container Production and characterization of foam glass from container glass waste "A Thesis submitted to The Mechanical Engineering Department In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.

[xviii] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[xix] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp. (pp.158 - 176)).

[xx] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[xxi] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[xxii] Giovanni Scarinci, Giovanna Brusatin. (March 2006). glass foams. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (pp.158 - 176).

[xxiii]Retrieved from meteoblue: https://www.meteoblue.com/ar/weather/forecast/week

[xxiv] Andrea Ventrella, Federico Smeacetto, Milena Salvo, and Monica Ferraris,(2011)," A New Glass Coating for Foam Glass", JOURNAL OF APPLIED CERAMIC TECNOLOGY ,8 [1] PP.187–193.DOI:10.1111/j.1744-7402.2009.02426.x