مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد (4) – 2025: 48-67

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (4) -2025: 48-67

دور المواد النسيجية وتقانة النانو في تطوير العزل الحراري للأبنية الحديثة

أوس علي ابراهيم*[1] طاهر رجب قدار[2]

*[1]. طالب دكتوراه، مهندس في هندسة تكنولوجيا النسيج ومعالجاتها، قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سوريا.
aousaliibrahimsy86@Damascusuniversity.edu.sy

[2]. أستاذ، دكتور، مهندس، رئيس قسم الهندسة الميكانيكية للصناعات النسيجية وتقنياتها كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سوريا dr.t-kadd@Damascusuniversity.edu. sy

الملخص:

دور المواد وتقانة النانو في تطوير العزل الحراري للأبنية الحديثة التي تتعلق بالبحث عن مواد تتطلب تطبيقاتها تجارب عالية الأداء، وكلمة نانو تعني للوهلة الأولى أبعاد أصغر من (100 nm)، إذاً تختلف خواص المواد النانوية عن خواص المواد التقليدية سواء كانت مركبة أم من مصدر أو مكون واحد، فعندما توزع الإجهادات الميكانيكية والحرارية والكيميائية على مستوى (1 nm) ستزداد جودة ومتانة ومقاومة المنتج عما هو عليه سابقاً، أي أن السطوح البينية بين الأطوار في البنية ستزداد، وستصبح المنتجات النهائية عالية الأداء.

يمثل هذا البحث خطوة مميزة ضمن إطار الأبحاث المتعلقة بدراسة المواد المركبة والذكية والمعززة بحبيبات نانوية ذات فراغات مسامية والتي تكون أيضاً نانوية الأبعاد/مع البوليمير ومع المنسوجات التقنية كالألياف الزجاجية والبازلتية على وجه الخصوص، بهدف تحسين الخواص الميكانيكية والحفاظ على الخواص الحرارية في آنٍ واحدً، أيضاً وبفضل مرونة مراحل التحضير الأولية وباستخدام تقنيات كالغزل الكهربائي لتحضير ألياف نانوية أو مع جملة من المضافات والمواد الخاصة التي تلعب دوراً فعالاً بما يخدم التطبيق المطلوب في إمكانية العزل الحراري للأبنية، وفي تطبيقات الهندسة المدنية (إعادة الإعمار) وهندسة علم المواد باستخدام تقنيات عديدة منها التغطية بالرذاذ.

أمكن في هذا البحث تحضير خمس عينات من المواد النسيجية المركبة والمعززة بالحبيبات النانوية ومادة فوم البولي يوريثان الصلب مغلق الخلايا، ثم تم حماية المواد بطبقة من الإيبوكسي المستخدم في الطلاءات، تم اختيار الأقمشة والألياف التي تحوي في بنيتها على نسب مرتفعة من أوكسيد السيليكون (SiO_2)، وهي في الزجاجية نوع (E) (54%)، وفي البازلتية تصل حتى (65%)، استخدمت أقمشة ثلاثية وثنائية الأبعاد، ومن الدراسات المرجعية اعتمدت النسبة (7% وزناً) لكمية الحبيبات النانوية والمسامية البنية من السيليكا، كنسبة كافية وفعالة وظيفياً واقتصادياً لتخفيض معامل انتقال الحرارة ضمن المجال (0.028- 0.088 w/m.k)، كما لعبت السماكة دور كبير في العزل الحراري، بما يتوافق مع متطلبات الدليل الشامل لمنتجات عزل الأبنية.

الكلمات المفتاحية: المواد السيراميكية نانوية البنى والمواد المركبة منها، الأقمشة والألياف التقنية (كربون، زجاج، سيليكا، بازلت،...)، المعالجات الحرارية، العزل الحراري للأبنية الحديثة.

تاريخ الايداع:2023/1/26

تاريخ القبول: 2023/5/2

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

The Role of Textile Materials and Nano Technology for Improving Thermal Insulation in Modern Buildings

Aous Ali Ibrahim*[1] Taher Kaddar[2]

*[1]. PhD student, Eng, Textile Technology Engineering, Department of Textile Industries Mechanical Engineering and Their Techniques Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Syria. aousaliibrahimsy86@Damascusuniversity.edu.sy

[2]. Prof. Univ. Dr. Eng. Head of Department of Textile Industries Mechanical Engineering and Their Techniques Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,Damascus University, Syria. dr.t-kadd@Damascusuniversity.edu. sy

Received: 26/1/2023
Accepted: 2/5/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract:

Nanoscience has invaded contemporary and modern research related to the search for materials whose applications require high-performance experiments, and the word nano means at first glance dimensions smaller than (100 nm), so the properties of nanomaterials differ from the properties of traditional materials, whether they are composite or from a single source or component. The distribution of mechanical, thermal and chemical stresses at a level of (1 nm) will increase the quality, durability and resistance of the product than it was previously, that is, the interfaces between the phases in the structure will increase, and the final products will become high-performance.

This research represents a distinguished step within the framework of research related to the study of composite and smart materials that are reinforced with nano-particles with porous voids, which are also nano-dimensional / with polymer and with technical textiles such as glass and basalt fibers in particular, with the aim of improving mechanical properties and maintaining thermal properties at the same time, as well. And thanks to the flexibility of the initial preparation stages and the use of techniques such as electrospinning to prepare nanofibers or with a number of special additives and materials that play an effective role in serving the required application in the possibility of thermal insulation of buildings, and in civil engineering applications (reconstruction) and materials science engineering using many techniques, including spray coating.

Five samples had been prepared of composite textile materials reinforced with nanoparticles and closed-cell rigid polyurethane foam, the materials were protected with a layer of epoxy. We used 2D and 3D spacer fabrics and basalt fibers, which have (SiO2) studies, the percentage (7% by weight) was adopted for the amount of nanoparticles and porous structure of silica, as a sufficient and functional percentage and economically, to reduce the heat transfer coefficient within the range (0.028-0.088 w/m.k), and the thickness also played a major role in thermal insulation, in line with the requirements of the thermal and acoustic insulation products guide of buildingsthermal treatments, thermal insulation in modern buildings

Keywords: Ceramic and nano-crystalline ceramic and composite materials, technical textiles/fibers (glass, basalt,..), content, and it is in fiber glass (E) (54%), and in basalt fiber (65%). By referenc

المقدمة:

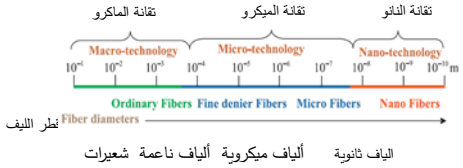
تلعب صناعة البناء في العصر الحديث ومجالات تطويرها دوراً فاعلاً على مسرح الدراسات والأبحاث المعاصرة بما يؤمن الراحة والأداء الأفضل للمستهلك والبيئة والكلفة بذات الوقت، لذا تسابقت الدول الحديثة في أوروبا من جهة ودول الاتحاد السوفييتي من جهة أخرى على أن تكون السباقة في هذا المجال، وعليه أدخلت انكلترا علم وتكنولوجيا النانو في مجال البناء والهندسة المدنية منذ تسعينات القرن الماضي، أي يعتبر الدور الذي تلعبه تقانة علم النانو في هذا الإطار حديثاً ومازال قيد البحث والتطوير، بدءاً من تحسين الخلطات الاسمنتية وإحداث تغيير جذري في قضبان التدعيم والتسليح الاسمنتي (استبدال المعدن بالمواد النسيجية المركبة من الألياف الزجاجية) وصولاً لتحسين أداء مواد وتقنيات العزل الحراري للأبنية والمنشآت ومرافقها.

1-1: تعريف بتكنولوجيا النانو:

يعتبر أول تعريف لعلم النانو في العالم من قبل العالم الأمريكي البروفيسور ريتشارد فينمان منذ خمسينيات القرن الماضي حيث عرف ذلك بعبارة مقتضبة ("There's Plenty of Room at the Bottom")، A.P.S. Sawhney et al., 2009,1، ويقصد بها أن هناك فسحة من الفراغ في مكان ما صغير غير مرئي بالعين المجردة، أي هناك عالم آخر ضمن تلك الأبعاد الصغيرة من رتبة النانو متر (V Kartik Ganesh et al., 2021,1). يعتبر مصطلحي علم وتكنولوجيا النانو حديثي العهد في مجال علم المواد المركبة والنسيجية حيث يعبر عن دراسة المنمنمات أي دراسة الخواص الهندسية والفيزيائية والكيميائية والمورفولوجية للمواد ضمن أبعاد برتبة (1 - 100 nm) حيث كل (1 billion nm = 1 m)، (A.P.S. Sawhney et al., 2009,1)، ويقصد بتقانة النانو الطرق والآليات والتقانات التي يمكن من خلالها تطبيق علم النانو في مجالات العلوم الأخرى أي هو علم تطبيقي بامتياز ويمكن القول أنه العلم الشامل للعلوم الحديثة، ومن هذه العلوم علم النسيج والمواد المركبة المصنعة منه والتي أمكن تحسين خواصها كمنتجات وخواص مساعدات انتاجها وطرق وتقانات تصنيعها بشكل أفضل باستخدام تكنولوجيا النانو (V Kartik Ganesh et al., 2021,1).

تبين في السنوات الأخيرة أن لتقانة النانو وطرق تطبيقها في صناعة النسيج ومواده المركبة دور فعال في تحسين خواصها المتعلقة بالملمس والمظهر والأداء والكلفة الاقتصادية وعمر الاستخدام ومقاومة الظروف المحيطة، بالإضافة إلى دخول صناعة النسيج ومواده المركبة في تطبيقات عالية الأداء كمقاومة الحرائق والشروط البيئية القاسية، وفي مجال عزل الأبنية. (Sherif Attallah et al., 2015,1).

بالنسبة لمجال تصنيع الألياف والخيوط فيمكن تقسيمها وفقاً لقطر مقطعها لنعبر بشكل أوضح عما يُقصد بالنانو في صناعة النسيج، الشكل (1)، حيث تقليل قطر الليف يعني زيادة مساحة السطوح البينية في النسيج عند صناعته أو بين المادة النسيجية الداعمة ومصفوفة الريزين في المادة المركبة من جهة أخرى (A.P.S. Sawhney et al., 2009,2).



الشكل (1) تغير قطر الليف وفقاً للتكنولوجيا المستخدمة (A.P.S. Sawhney et al., 2009,2).

1-2: تطور صناعة الألياف والنُّسُج ومعالجاتها باستخدام تكنولوجيا النانو:

تعود جودة الخواص النهائية للمنتجات النسيجية والخيوط والألياف المصنعة منها هذه المنتجات إلى جودة آليات وطرق تصنيعها وتقاناتها المتعلقة خلال مراحل الإنتاج بدءاً من المادة الخام، ونوعية المواد الأولية ومساعدات الانتاج الداخلة في التركيب.

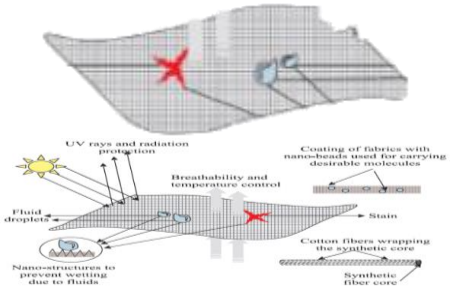
لذا وكما تمتاز المواد النسيجية المصنعة من الخيوط والألياف القطنية بمتانة جيدة مقارنة بخواصها الحيوية والمورفولوجية

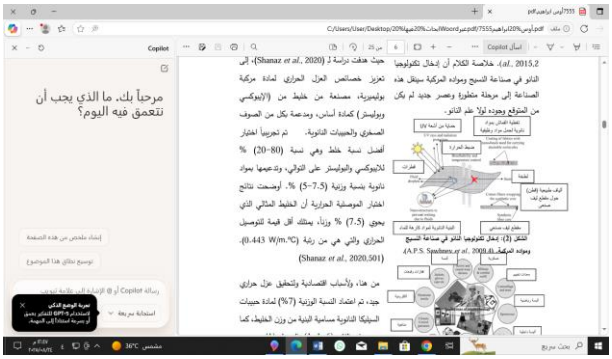
(البنيوية) والبيئية (رطوبة، حرارة، تنفس)، فيمكن عندها رفع سوية أداء هذه المنتجات التقليدية بإدخال تكنولوجيا النانو وعلم النانو في خواص موادها الأولية وطرق ومراحل تصنيعها (غزل، نسيج، صباغة، طباعة، معالجات) فستتحسن عندها خواصها الميكانيكية والمورفولوجية، (Filippov, 2019,4)، لتصبح تلك المنتجات الصحية (طبيعية المنشأ) قادرة بخواصها المحدثة على الدخول في مجال التطبيقات عالية الأداء وضمن ظروف بيئة التطبيق لا يمكن للمنتجات والتقانات النسيجية التقليدية خوض غمارها.

من جهة أخرى يمكن للمنتجات النسيجية الصنعية والمحضرة من ألياف وغزول صناعية وكيميائية المنشأ أن تلعب نفس الدور عند استخدام علم وتقانة النانو كالغزل الكهربائي وطرق محلول الجيل لتحضير الألياف النانوية ومن ثم تصنيع منتجات نسيجية نانوية البنى الليفية منها، وبالتالي ستتحسن خواص مصفوفة المادة النسيجية الداعمة في المادة المركبة، ثم وبإدخال علم النانو في خواص مادة مصفوفة الريزين يمكن عندها التوصل لمادة نسيجية مركبة عالية الأداء وفق متطلبات التطبيق الهدف. (A.P.S. Sawhney et al., 2009,2).

على سبيل المثال لا الحصر، تمتاز ألياف الكربون النانوية بناقلية عالية للحرارة والكهرباء مقارنة بألياف الكربون التقليدية، كما أن معاملات المتانة والشد (حتى 200 GPa) والانحناء والانضغاط والمرونة (حتى 5%) الخاصة بالمنتجات النسيجية المصنعة باستحضار تقانات النانو ومن ألياف نانوية ستكون أعلى من معاملات الألياف الأخرى سواء كانت (زجاجية، بازلتية). (A.P.S. Sawhney et al., 2009,3 , V Kartik Ganesh et al., 2021,2).

يمكن إدخال طرق معالجة مختلفة تماماً عن المعالجات التقليدية للنسج والألياف ومنها المعالجة بمواد ومحاليل كيميائية معززة بحبيبات فعالة (ذات أداء حراري، كيميائي، كهربائي) محضرة باستخدام تكنولوجيا النانو، لتدخل تلك المنتجات تطبيقات مختلفة تماماً عما اعتدنا عليه ومنها تطوير العزل الحراري والناقلية الحرارية والكهربائية، علماً أن إدخال هذه المواد الفعالة لن يؤثر بشكل كبير على الكلفة مقارنة بجودة الأداء الوظيفي، حيث بالعودة لأغلب الدراسات الحديثة ذات الصلة بالموضوع فإن نسبة تلك المواد الفعالة لن يتعدى (5-7%) من كتلة المادة المركبة، (Shanaz et al., 2020,494)، من جهة أخرى تعتبر مقاومة الضغط منخفضة للمنتجات النسيجية المركبة التي تكون فيها مصفوفة النسيج الداعمة تقليدية المنشأ (أي بدون استخدام تكنولوجيا النانو)، ولكن سيختلف الوضع تماماً عندما يتم إدخال علم النانو وتقاناته الخاصة بصناعة النسيج ومواده المركبة (Textile Composites). (Shanaz et al., 2020,494Sherif Attallah et al., 2015,2). خلاصة الكلام أن إدخال تكنولوجيا النانو في صناعة النسيج ومواده المركبة سينقل هذه الصناعة إلى مرحلة متطورة وعصر جديد لم يكن من المتوقع وجوده لولا علم النانو.





الشكل (2) إدخال تكنولوجيا النانو في صناعة النسيج ومواده المركبة. (A.P.S. Sawhney et al., 2009,4).

الشكل (3) تطبيقات تكنولوجيا النانو في صناعة النسيج ومواده المركبة. (A.P.S. Sawhney et al., 2009,5).

2: الدراسات المرجعية:

تم اعتماد مجموعة من الدراسات المرجعية الحديثة ذات الصلة بموضوع هذا البحث، واستُنِد على نتائجها إما كنقطة للانطلاق منها في التجارب والاختبارات وتحضير العينات، أو لمقارنة النتائج، حيث هدفت دراسة لِـ (Shanaz et al., 2020)، إلى تعزيز خصائص العزل الحراري لمادة مركبة بوليميرية، مصنعة من خليط من (الإيبوكسي وبوليستر) كمادة أساس، ومدعمة بكل من الصوف الصخري والحبيبات النانوية.

تم تجريبياً اختيار أفضل نسبة خلط وهي نسبة (80–20) % للايبوكسي والبوليستر على التوالي، وتدعيمها بمواد نانوية بنسبة وزنية (7.5–5) %. أوضحت نتائج اختبار الموصلية الحرارية أن الخليط المثالي الذي يحوي (7.5) % وزناً، يمتلك أقل قيمة للتوصيل الحراري والتي هي من رتبة (0.443 W/m.ºC). (Shanaz et al., 2020,501).

من هنا، ولأسباب اقتصادية ولتحقيق عزل حراري جيد، تم اعتماد النسبة الوزنية (7%) لمادة حبيبات السيليكا النانوية مسامية البنية من وزن الخليط، كما سنرى في الفقرة (6–1–1) والجدول (1).

وهدف بحث آخر لِـ (Olga et al., 2022)، إلى دراسة تأثر الموصلية الحرارية لعينات من فوم البولي يوريثان (PU)، ومختلفة الأبعاد والبنى (مغلقة الخلايا، أو مفتوحة الخلايا)، تم اختبار العزل الحراري بالمجال (30-100ºC)، Olga et al., 2022,1. أظهرت نتائج البحث أن البارامتر المتعلق بحجم الخلية (مسامات مادة الفوم) له تأثير كبير على الموصلية الحرارية، تراوحت قيم الموصلية الحرارية للعينات بين (0.028 w/m.k) وحتى (0.055 w/m.k)، (Olga et al., 2022,1).

كما بينت النتائج تفاوت معدل التدفق الحراري عبر السماكات المختلفة للعينات بين (3.136 W/m²) و(41.727 W/m²)، وتراوحت فروقات درجات الحرارة بين وجهي عينة الاختبار (البارد والساخن) بين (5.4) و (8.3) بالنسبة لعينات للفوم مغلق الخلايا والفوم المختلط الخلايا (مغلق ومفتوح)، (Olga et al., 2022,8).

هنا اعتمدت نتائج هذا البحث للمقارنة، كما سنرى في الفقرة (6–4) والجدول (2)، ولاختيار بنية العازل لتكون (مغلقة الخلايا من الفوم ومفتوحة الخلايا من البنية المسامية لحبيبات السيليكا النانوية) عند تحضير العينات، كما سنرى في الفقرة (6–1–1) والجدول (1).

وقدَّم بحث مميز آخر لِـ (David, 2016)، تعريفاً واضحاً لعلم النانو، ودرس تأثير ودور تكنولوجيا النانو في الهندسة المدنية والمعمارية، نظراً لقدرتها على منح العازل الحراري إمكانات غير تقليدية لحجب طرق انتقال الحرارة عبر ذاك العازل، كما قدم طرحاً لأنواع وتقانات العزل الحراري التي تداخلت معها تكنولوجيا النانو وحسنت من أدائها في العزل. (David, 2016,22).

كما قدَّم بحث لِـ (Filippov, 2018)، دليلاً تجريبياً واضحاً لتأثير إضافة حبيبات السيليكا النانوية (أيروسيل 200) بنسبة وزنية (1.1%)، مبيناً ذلك بصور المسح الالكتروني (SEM) لأبعاد الحبيبات، (Filippov, 2018,2)، والتي حسنت إضافتها لمادة الايبوكسي من الخواص الميكانيكية لمصفوفة المادة المركبة حيث تحسنت قيم معاملات الشد بنسبة (10-20%) حتى عند تلك الإضافة الضئيلة، (Filippov, 2018,3-4).

تم الأخذ بهذه الدراسة المرجعية، كدليل لحقيقة تحسن الخواص الميكانيكية للمادة النسيجية المركبة المعززة بحبيبات السيليكا النانوية بغرض العزل الحراري للأبنية.

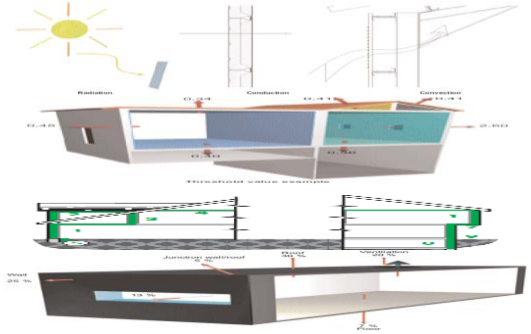
3: تكنولوجيا النانو والهندسة المدنية:

3-1: مجالات تطبيق تكنولوجيا النانو في الهندسة المدنية:

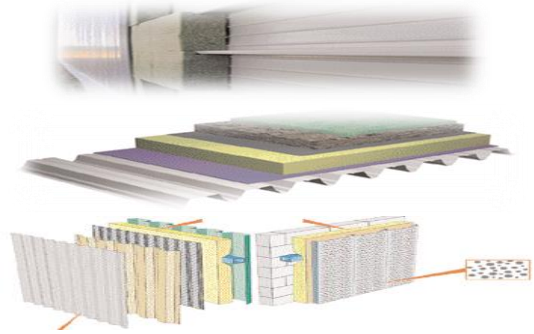
يمكن إدخال تكنولوجيا وعلم النانو في عمليات تصميم وبناء المنشآت الهندسية، أو حتى في عمليات تصنيع المواد الأولية الداخلة في مراحل البناء نفسها. ومنها يقوم الباحثون المتخصصون في هذا المجال بدراسة خواص هذه الأبنية وموادها الداخلة في إنشائها، وبالتالي استقراء المشكلات وحلولها لتفاديها مستقبلاً. سنذكر هنا بعضاً من أهم تطبيقات تكنولوجيا وعلم النانو في الهندسة المدنية بغرض العزل، وهي:(V Kartik Ganesh et al., 2021,3).

1. مواد التغطية Coatings: تدخل هذه المواد في مختلف مراحل إنشاء الأبنية ومرافقها، فتلعب دور العزل الأولي أو النهائي للسطوح (قضبان وشبكات التسليح، جدران، أسقف،...)، وبالرغم من فاعلية المواد التقليدية فقد خضعت أيضاً هذه المواد للبحث والتطوير منذ العقد الأخير من القرن الماضي فأصبحت وبعد إدخال تكنولوجيا النانو (استخدام حبيبات وألياف نانوية) أكثر قدرة على مقاومة التآكل والأوساط المحيطة سواء كانت كيميائية أو حرارية، كما أمكن إضفاء بعض الخواص المحدثة كالقدرة على التحكم الحراري في تقنيات العزل المستخدمة في الأبنية والمرفقات (أنابيب مبادلات، تسخين، تبريد). (V Kartik Ganesh et al., 2021,5).
2. الزجاج العازل Glass: يعتبر مسمى الزجاج العازل شاملاً لعدة أنواع من الزجاج فمنه العازل للصوت والعازل للحرارة والعازل للحريق والعازل للضوء أو بعض الأشعة الضوئية، حيث يمكن استخدام حبيبات السيليكا النانوية (silica nanoparticles (SiO2)) لتدخل ضمن خلطة تحضير الزجاج أو كطبقة متوسطة بين طبقتين زجاجيتين فيصبح ذلك الزجاج عازلاً للحرارة. (Kartik Ganesh et al., 2021,6).
3. مواد العزل Bulk Insulating Materials: كون الهواء العازل الحراري الأفضل يتم خلق فجوات وفراغات بين الجدران والسطوح الخاصة بالأبنية والمنشآت التي تتطلب مراعاة ظروف البيئة ووسط التطبيق وتحسيناً لخواص العزل الحراري دخلت تقانة علم النانو باستحضار حبيبات نانوية مسامية البنى من السيليكا تُضاف سواءً للخلطات الاسمنتية أو مواد الطلاء أو ألواح العزل الخاصة بعزل الأسقف والجدران كما يمكن التحكم بخواصها المائية (كارهة أو محبة للماء)، فتصبح ألواح العزل تلك ذات فعالية أكبر في العزل الحراري وبكثافة وسماكة أقل وبمتانة أفضل يمكن تحسينها بإضافة خلطات تحوي ألياف نانوية أو ميكروية حتى، كما يمكن استبدال ألواح العزل التقليدية تلك بمنتج عازل أكثر مرونة مصنع من مواد نسيجية مركبة (Flexible Insulating Textile Blanket). (V Kartik Ganesh et al., 2021,6).

بالحمل بالتوصيل بالإشعاع



الشكل (4) صور توضح بعض تقنيات العزل للأبنية الحديثة وأماكن توضعها(Arval, 2009,107-109) (NAIMA, 2009,3



تتمة الشكل (4) صور توضح بعض تقنيات العزل للأبنية الحديثة وأماكن توضعها (NAIMA, 2009,3, Arval, 2009,107-10)

4- تطوير العزل الحراري للأبنية والمنشآت باستخدام تكنولوجيا النانو:

لمعرفة الدور الذي يلعبه علم النانو في تطوير تقانات عزل الأبنية، لابد لنا من الإضاءة على أسس تطبيق مواد العزل الحراري لتلك لأبنية. نظرياً هناك ثلاث طرق لانتقال الحرارة عبر وسط ما أو مادة ما، الشكل (4) وهي:

1- الانتقال بالتوصيل Thermal conduction: وينجم عن اهتزاز مستمر لجزيئات المادة الصلبة فتنقل موجات الاشعاعات الحرارية عبرها.

2- الانتقال بالحمل Heat flux: ويتم ذلك بين جزيئات الهواء أو الغاز داخل بنية المادة.

3- الانتقال بالاشعاع Thermal radiation: ويتم بين جدران السطوح البينية للأجسام.

وبالتالي تُحسب الموصلية الحرارية لمادة ما استناداً للمعادلة الآتية (Bjørn et al., 2012,2):

$$\lambda_T = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r \ldots\ldots (1)$$

λ_T = Total overall thermal conductivity
الموصلية الحرارية للمادة العازلة.

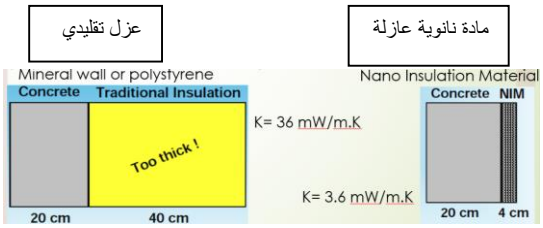
λ_s = Solid state thermal conductivity
الموصلية الحرارية بالتوصيل عبر الصلب.

λ_g = Gas thermal conductivity
الموصلية الحرارية بالحمل عبر الغازات.

λ_r = Radiation thermal conductivity
الموصلية الحرارية بالاشعاع.

هذا بالنسبة لطرق العزل التقليدية حيث تكون جميع طرق انتقال الحرارة موجودة لكن مراقبة من قبل المادة العازلة نفسها (حسب مساحة سطحها النوعية وحسب موصليتها الحرارية)، بينما باستخدام تكنولوجيا النانو يمكن حجب طريقة واحدة أو أكثر من طرق انتقال الحرارة، فتصبح عندها جودة العزل الحراري أكبر، وبالتالي عند تطبيق هذه التقنية في عزل سطوح الأبنية والأنابيب سيكون معامل انتقال الحرارة أقل ما يمكن وأفضل بكثير من استخدام الطرق التقليدية.

اذاً، تمتلك مواد العزل الحراري المحضرة باستخدام تكنولوجيا النانو خواصاً حرارية (ثبات حراري، موصلية حرارية) أفضل مما لدى وسائل العزل التقليدية، حيث كلما كانت الموصلية الحرارية أقل كان العزل أفضل. (Arval, 2009,99).



الشكل (5) مقارنة بين تقنية عزل تقليدية وأخرى مطورة باستخدام تقانة النانو. (Bjørn et al., 2012,53)

يمكن التعبير عن انتقال الحرارة عبر السطوح العازلة بالعلاقة التالية، (David, 2016,18):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_e}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(2)}$$

حيث أن:

U: معامل انتقال الحرارة ويقدر بواحدة (W/m^2K).

d_i: سماكة طبقة العازل وتقدر بواحدة (m).

λ_i: الموصلية الحرارية الجزئية لكل طبقة من طبقات العازل على حدا وتقدر بواحدة (W/mK).

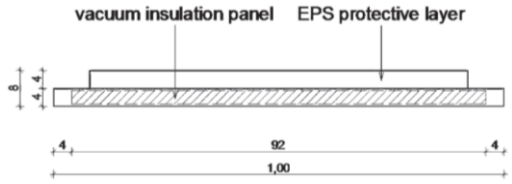
h_i: معامل انتقال الحرارة الداخلي بين سطوح مادة العازل نفسها وتقدر بواحدة (W/m^2K).

h_e: معامل انتقال الحرارة للسطوح الخارجية للمادة العازلة وتقدر بواحدة (W/m^2K).

ويمكن التعبير عن المعامل (U) بطريقتين مختلفتين بوجود المواد العازلة المصنعة وفق تكنولوجيا النانو، حيث بعض هذه المنتجات العازلة تمتلك معامل انتقال حرارة أقل مما لدى منتجات العزل التقليدية، بينما البعض الآخر من تلك المواد العازلة المصنعة وفق تكنولوجيا النانو يكون قادراً إلى درجة تقارب درجة حجب الناقلية الحرارية بشكل شبه تام.

من هنا ظهرت بعض منتجات العزل الحراري في الأسواق والتي أمكن تداخل تكنولوجيا النانو معها، ومنها البولي ستايرين

المعزز ببودرة الغرافيت (Expanded polystyrene products, including graphite powder Additive)، (David, 2016,18، لتطبيقات الهندسة المدنية، حيث يتم توزيع حبيبات هذه البودرة بتجانس من خلال استخدام غاز البنتان كعامل تفويم، كما يمكن تعزيز الخواص الميكانيكية بإضافة ألياف نانوية أو ميكروية مع حبيبات الغرافيت الميكروية. ساعدت هذه الطريقة على تحسين الخواص الميكانيكية بنسبة (40%) وخفضت الموصلية الحرارية بنسبة (20%). من مساوئها اللون الأسود للعازل (بسبب حبيبات الغرافيت السوداء) مما يعني امتصاص أكبر لأشعة الشمس، لذا تم اللجوء لطلاء خارجي للعازل باللون الزهري لتجنب امتصاص الحرارة عند التعرض لأشعة الشمس. تمتاز ألواح العزل المصنعة من البولي ستايرين المعزز بحبيبات الغرافيت الميكروية بمقاومة ضغط حتى (compressive strength (100-150 kPa))، (David, 2016,18)، ويمكن تحسينها بالألياف الزجاجية. وهناك أيضاً ألواح العزل المفرغة المحسنة بالحبيبات النانوية (Nanoparticle-based vacuum insulation panels (nano-VIPs))، وأول ما تم فيه استخدام هذه المواد للعزل الحراري كان من أجل البرادات والعربات لكن اليوم تطورت الصناعات وأصبح بالإمكان استخدامها في مجال تطبيقات الهندسة المدنية. هنا يتم حجب طريقتين من طرق انتقال الحرارة عبر السطوح العازلة، حيث تعمل حبيبات السيليكا النانوية والسطوح البينية لألياف الزجاج النانوي بدور حاجز مانع لانتقال الحرارة بالتوصيل نظراً لكبر مساحة السطح النوعي وانخفاض كتل هذه الحبيبات وكثافتها، كما أنها ونظراً للفراغات المسامية التي تمنحها داخل البنية فإنها تخلق ضغطاً يعادل تقريباً (0.05 bar) مما يعمل على حجب انتقال الحرارة بالحمل عبر الوسط الغازي، يمكن عادة وبوجود حبيبات السيليكا النانوية الاستعاضة عن ألياف الزجاج الميكروية الصنعية بألياف طبيعية أو بوليميرية أخرى لتخفيف الكلفة وتحسين الأثر البيئي، أو لإعادة تدوير بعض المواد كالبوليستر والبولي ايتيلن وتحفظ هذه المواد الليفية المعاد تدويرها مع الحبيبات النانوية بين طبقتين صفائحيتين من الألمنيوم، فيصبح هذا العازل مناسباً للأسطح والجدران والأرضيات. (David, 2016,19) علماً أن بعض الشروط البيئية لوسط التطبيق تتطلب توافر تقنيتي العزل السابقتين، كما في الشكل (6).



الشكل (6) يوضح تطبيق VIPs المعزز بالحبيبات النانوية في العزل الحراري للأبنية. (David, 2016,20).

إن طريقة اختبار الأداء الوظيفي في العزل الحراري لهذه المنتجات النانوية البنى تختلف عن طرق الاختبار المخبرية حيث تتطلب إجراء اختبار حقلي ميداني وفق المعيار العالمي: (David, 2016,21).

MSZ EN 12667:2001
(Title: Thermal performance of building materials and products).

بالنتيجة تمتاز هذه المواد بمرونتها وسهولة تطبيقها مع الألياف والمنسوجات الداعمة، والبوليميرات الرابطة، وهي غير سامة، غير مؤذية للبيئة، يمكن تدويرها من جديد، مقاومة لأشعة (UV)، مقاومة للحرائق والمواد الكيميائية (إن استخدمت معها ألياف زجاجية نوع AR Glass fabrics)، كما يمكن تطبيقها على جميع أنواع السطوح الخشبية والمعدنية واللامعدنية، وبالتالي يمكن استخدامها للعزل الداخلي والخارجي للأبنية بوسائل بسيطة وبأمان تام، حيث أولاً يجب تنظيف السطوح جيداً (لا حاجة لطلاء السطوح بأساس بوليميري) ومن ثم خلط تلك الحبيبات السيراميكية النانوية مع الألياف الداعمة جيداً مع ارتداء وسائل الأمان الصناعي المناسبة، ثم تُضاف المواد البوليميرية الرابطة والمذيبات ومن ثم تُمد طبقة واحدة على السطح المراد عزله بالرذاذ أو الفرشاة أو الرول، وتترك الطبقة الواحدة لتجف لمدة لا تقل عن (at 20 °C, 4-5 hours)، ثم تُمد الطبقات التالية وهكذا حتى تحقيق السماكة المطلوبة للعزل. (David, 2015,70).

5- العزل الحراري للأبنية باستخدام المواد النسيجية المركبة نانوية البنى:

5-1: مفهوم العزل الحراري:

يُعرّف العزل الحراري بأنه مقدرة مادة أو منتج مكون من عدة مواد على مقاومة ومنع التدفق الحراري عبره وتعرّف الناقلية الحرارية/الموصلية الحرارية بكمية الحرارة المارة عبر واحدة السطوح خلال واحدة الزمن عندما تتغير درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة لانتقال الحرارة على منحى الناظم لمسافة واحدة الطول باتجاه مستوى الحرارة الأخفض. يمكن باستخدام تكنولوجيا النانو، وبالكامل حجب طريقة واحدة أو أكثر من طرق انتقال الحرارة عبر المادة العازلة، فيضاف عندها بُعد الذكاء للعزل الحراري، كما بينا ذلك نظرياً في الفقرة (3). يختلف حساب كمية الحرارة المنتقلة عبر السطوح المستوية كالجدران والأسقف عن حساب تلك المنتقلة عبر جدران الأنابيب ومرافق الأبنية، وتستخدم المعادلات التالية لذلك، (Gebhart, 1971 ،Christiansen, 2021,32):

1-for walls & roofs لعزل الجدران والأسقف

$$q_w = \mathrm{K.A.}\frac{\Delta T}{X} \quad [W] \ldots \textbf{(3)}$$

حيث أن:

q_w: التدفق الحراري عبر الجدار (W).

K: معامل انتقال الحرارة (w/m.k).

A: مساحة سطح العازل (m^2).

ΔT: فرق درجات الحرارة على سطحي العازل الداخلية والخارجية (C°).

X: سماكة جدار العازل (m).

2- for tubes & pipes لعزل الأنابيب

$$q_t = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{\ln\left(d_2/d_1\right)}{2.\pi.K_1} + \frac{\ln\left(d_3/d_2\right)}{2.\pi.K_2}} \quad [W] \ldots \textbf{(4)}$$

q_t: التدفق الحراري عبر جدار الأنبوب (W).

K_1 , K_2 : معاملات انتقال الحرارة للعازل والأنبوب (w/m.k).

$(T_i - T_o)$: فرق درجات الحرارة بين السطوح الداخلية والخارجية (C°).

d_1: قطر مقطع الأنبوب الداخلي (m).

d_2: قطر مقطع الأنبوب الخارجي (m).

d_3: قطر مقطع الأنبوب والعازل معاً (m).

فما هي فوائد العزل الحراري؟

1- توفير الطاقة.

2- تخفيض معدل فقد الحرارة عبر السطوح.

3- لضبط شروط الوسط حرارياً (مخبر، معمل، تفاعل كيميائي...).

4- لخلق بيئة عمل مريحة، إذاً:

ما العامل الرئيسي الذي يلعب دور التأثير الأكبر على معامل التوصيل الحراري لسطح ما؟

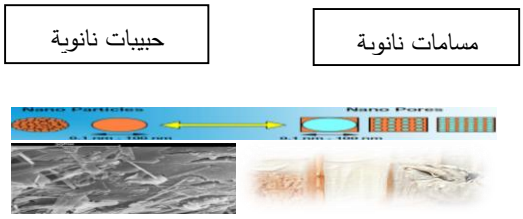
1- سماكة العازل. 2- كثافة العازل.

3- مساحة السطح النوعي للبنية.

5-2: دور علم النانو في المواد النسيجية المركبة بغرض العزل الحراري:

تعتبر المواد النسيجية المركبة نانوية البنى بدعة خلاقة في مجال صناعة العزل الحراري والذكي للأبنية الحديثة والمعاصرة، وذلك بالمقارنة مع تقانات العزل التقليدية، حيث تعمل المواد والحبيبات النانوية دور المادة الفعالة التي سترفع من سوية الأداء الوظيفي في العزل، بينما مصفوفة المواد الداعمة فتكون عبارة عن ألياف ميكروية أو نانوية موزعة عشوائياً في بنية المادة المركبة أو نسيج (woven/non-woven) تُحمل عليه هذه الحبيبات النانوية، ومن ثم تأتي المادة البوليميرية الرابطة كالإيبوكسي والبولي إستر والفينيل إستر لتجمع بين المكونات السابقة بتقنية التشريب والتنضيد (Lay-up/Spray-up/Pre-preg) أو التغطية والتصفيح (Laminating). (Marco, 2016,1).

إن الانتقال بأبعاد البنية من عتبة الميكرو إلى عتبة النانو يعني ألف درجة كأبعاد مجهرية، لكن نقل جودة الأداء والخواص حينها سيكون بأشواط أكبر بكثير، وخاصة بما يتعلق بالعزل الحراري الذي يتطلب بنية مسامية بشكل شبه كامل، بل إن زيادة الجدران والسطوح البينية بين الحبيبات والمسامات داخل البنية المجهرية للمادة العازلة بجميع مكوناتها (حبيبات/نسيج/بوليمير)، الشكل (7)،(Bharat, 2004,1، YURY, 2006,13)، يعني زيادة قدرتها على تشتيت وامتصاص أمواج الطاقة داخلها، من جهة أخرى تعتبر البوليميرات مواد عازلة حرارياً، وكذلك بالنسبة للألياف والمنسوجات التي تحوي نسبة عالية من أوكسيد السيليكون، وأيضاً فإن الحبيبات والألياف النانوية لا يمكن تطبيقها منفردة دون وجودها ضمن حافظة تحميها من عوامل الوسط الخارجي وتحمي البيئة من التلوث الذي قد تسببه هذه المواد المجهرية حال كانت منفردة وغير مضبوطة ضمن قالب وأبعاد محددة.



الشكل (7) تبين الصورة الأولى رسم توضيحي لأبعاد الحبيبات والمسامات النانوية، وتبين الصورة الثانية من اليسار مسح الكتروني ضوئي (SEM) لبنية المادة العازلة المكونة من الألياف والايبوكسي والحبيبات النانوية،
بينما الصورة الثالثة من اليمين فتبين كيفية تطبيق ذلك العازل المعزز بالحبيبات النانوية في العزل الحراري للأبنية.
Bjørn et al., 2012, 16)
(Satoshi et al., 2021,6

انحصرت تطبيقات علم النانو في بداياتها على المجال الفضائي والطبي والالكتروني، لكن ومنذ بداية القرن الحالي بدأت الأبحاث العلمية والتجريبية تطفو على السطح، وتبرز أهمية النانو وتأثيره في المجال الانشائي والهندسة المدنية وبالأخص المتعلقة بالعزل الحراري ومقاومة الحرائق، حيث برزت فعالية إضافة ألياف وحبيبات السيليكا النانوية للإسمنت لتحسين خواصه الميكانيكية من متانة شد وانضغاط وانحناء أو للطلاء لتحسين مقاومته للاحتكاك والحرارة والأشعة (UV)، أو استخدام شبكات من المنسوجات التقنية الزجاجية والبازلتية والكربونية كطبقات داعمة للجدران الاستنادية وعازلة بنفس الوقت، كما أمكن تدعيم الخشب الصناعي بحبيبات وألياف نانوية تؤخر لهب الاحتراق وتحسن من خواصه الميكانيكية. (Sherif et al., 2015,72, Bharat, 2004,3).

تركزت الأبحاث المعاصرة حول تطبيق حبيبات السيليكا الميكروية والنانوية المحضرة بتقنية (sol-gel) وهي إحدى تقانات علم النانو كما أشرنا سابقاً، لتمزج هذه الحبيبات (المعالجة حرارياً بالشروط الجوية العادية) بنسبة وزنية (0.5 , 1.0 , 1.5, 3, 5, 7 wt%) مع بوليميرات رابطة من الايبوكسي أو البولي إستر أو الفينيل إستر أو مادة أكريلو نتريل بوتاديين ستايرين (ABS)، وبالتالي يمكن قولبتها ضمن أبعاد محددة وحفظها من التناثر في بيئة التطبيق، لكنها تبقى قصفة وغير مرنة وخواصها الميكانيكية غير مجدية بالمقارنة مع خلطها في مراحل التصنيع الأولية أو النهائية بالألياف المعززة (زجاجية، بازلتية،...) أو مع ألياف كربون نانوية (carbon nano tube (CNT)) أو تحميلها على طبقات النسيج سواء كان قماش منسوج أو غير منسوج، (Shanaz et al., 2020,495، Sherif et al., 2015,73). كما ظهرت دراسات أخرى في مجال المواد المتغيرة الطور (Phase Change Materials PCMs)، (Lamrani et al., 2021,1)، باستخدام مادة البولي ايتيلن غليكول ذات الوزن الجزيئي العالي (حتى 600) والتي تغلف ضمن غلاف كروي حافظ من السيليكا وتحمل المادة المركبة الناتجة على طبقة أو شبكة غير منسوجة من الألياف النانوية المحضرة بالغزل الكهربائي أو الطرد المركزي من البولي استر أو البولي لاكتيك أسيد أو البولي أميد، ثم تقوى الشبكة بطبقة من الألياف المنسوجة، هنا وبما أن درجة انصهار البولي ايتيلن غليكول ذي الوزن الجزيئي (600) تصل حتى الدرجة (20 °C) عندها سوف تنصهر هذه المادة عند ارتفاع الحرارة في الوسط المحيط فوق الدرجة (20 °C) وسوف تحتاج إلى الطاقة

لاتمام الانصهار أي سوف تتحول للطور السائل و تمتص الحرارة ويصبح السطح المجاور لها بارداً، والعكس عندما تصبح درجة الحرارة في الوسط المحيط تحت الدرجة (20 °C) وسوف تحتاج إلى البرودة لاتمام تجمدها أو تحولها للطور الصلب إن صح التعبير، أي سوف تنشر حرارة ويصبح السطح المجاور لها دافئاً، من هنا توفر بُعد الذكاء في قدرة هذه المواد على العزل، نظراً لقدرتها على التكيف مع شروط بيئة التطبيق.(Xin Min et al., 2015,1، Marco, 2016,20، Chunpeng et al., 2022,3).

بالنظر للأفاق المستقبلية لتطبيق تكنولوجيا النانو في العزل الحراري للأبنية، فقد توجهت معظم شركات الدول الصناعية الكبرى في العالم والتي تنفق مليارات الدولارات على الأبحاث العلمية نحو تحسين متطلبات الهندسة المدنية والانشائية بإدخال علم النانو وتقاناته في هذا المجال، ونذكر منها (IBM, Intel, Motorola, Lucent, Boeing, Hitachi). حيث بحلول عام 2015 أصبح تأثير تكنولوجيا النانو على الصناعات في السوق ما يعادل (1 trillion$)، بالتالي لابد أن تشكل صناعة البناء حلقتها الخاصة بها ضمن سلسلة النانو(.Bharat, 2004,1).

يبقى نجاح أي تقنية مستخدمة في عزل الأبنية رهناً بالعامل الاقتصادي والتجاري، والعملي أي إمكانية التطبيق على المستوى الصناعي.

6: الجزء العملي:

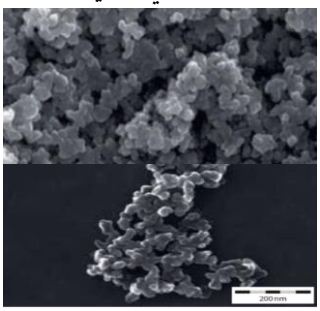
تم في القسم العملي تحضير واختبار عينات مواد نسيجية مركبة محسنة باستخدام تقانة النانو لتطبيقها في العزل الحراري للأبنية الحديثة، لتكون التجربة خير برهان، حيث أمكن للمادة العازلة ببنيتها النانوية والميكروية، حجب طرق انتقال الحرارة الثلاث معاً (توصيل، اشعاع، حمل).

6-1- المواد الأولية والأدوات المستخدمة وتحضير العينات:

تم تحضير خمس عينات من المواد النسيجية المركبة والمعززة بالحبيبات النانوية ذات المسامية العالية (80% من حجمها هواء) والألياف الميكروية (زجاجية وبازلتية) لاختبار كفاءة عزلها الحراري للأبنية، (أبعادها 14x14 cm، سماكتها 4 cm).

6-1-1- توصيف المواد الأولية المستخدمة في تصنيع العينات:

- ألياف زجاجية مقطعة (chopped strands): قطرها (9 ميكرون) طولها (8-12 مم)، صينية المنشأ، متوفرة من السوق المحلية.
- نسيج زجاجي (Mat) غير منسوج: مصنع من الألياف الزجاجية نوع (E-glass)، وزن المتر المربع (300 gr/m²)، تم تأمينها من السوق المحلية، والمنشأ صيني.
- نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع (3D spacer fabric type E-glass) سماكته (10 مم)، وزن المتر المربع (1480 gr/m²)، التركيب النسيجي سادا (plain 1/1)، المنشأ صيني.
- نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع (3D spacer fabric type E-glass) سماكته (20 مم)، وزن المتر المربع (2000 gr/m²)، التركيب النسيجي سادا (plain 1/1)، المنشأ صيني.
- ألياف بازلتية مقطعة (Basalt chopped fibers): قطرها (9 ميكرون) طولها (8-5 مم)، صناعة محلية.
- مادة حبيبات السيليكا النانوية (nano-silica particles): الاسم التجاري للمادة أيروسيل 200، كثافتها (50 g/l)، مساحة السطح النوعي للبنية (220 m²/g)، أبعاد الحبيبات (20-12 نانومتر)، محبة للماء، تستخدم في صناعة الدهانات والمواد المركبة كمحسن لزوجة ومثخن للطلاءات، تمتلك خواص حرارية عالية، تتأثر بالرطوبة، تتناثر بسهولة في الوسط إذا ما حفظت ضمن حيز أو كيان أو بنية مغلقة، تم تأمينها من السوق المحلية، منشأ الصين، يبين الشكل (8) صورة ماسح الكتروني (SEM) خاص بهذه المادة.(Evonik, 2015,36).
-



الشكل (8) صورة ماسح الكتروني (SEM) و(TEM) لحبيبات (أيروسيل200)، (Evonik, 2015,36).

- مادة الايبوكسي الطلائية (coating epoxy): تتكون من خليطين (الريزين والمقسي)، نسبة الخلط الوزنية (1:1)، تم تأمينها من السوق المحلية.
- مادة فوم البولي يوريثان الصلب: يتكون من خليطين هما (البوليول poly-yol والإيزوسيانات iso-cyanat)، نسبة الخلط الوزنية (1:1) حيث تصب المادة بعد الخلط المتجانس في قالب لتتصلب في درجة حرارة الجو، كثافته (250 كغ/م³)، تم استجرار المادة من السوق المحلية.

6-1-2: تحضير وتوصيف العينات:

1- العينة الأولى: نسيج زجاجي غير منسوج نوع (nonwoven E-glass)، مادة فوم بولي يوريثان كثافته (250 كغ/م³)، مدعمة بحبيبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder)، والمحفوظة بطبقة من مادة الإيبوكسي المستخدمة في طلاء أرضيات المعامل والمخابر. يتم تحضير هذه العينة بالبدء بتحضير القالب وفق الأبعاد (14x14 cm، سماكة 4 cm)، ثم يوضع في أسفله طبقة من النسيج المشبع بالإيبوكسي، يليه وضع طبقة ثانية من النسيج المشبع بالإيبوكسي.

2- العينة الثانية: نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع (3D spacer fabric E-glass) سماكته (10 مم)، فوم بولي يوريثان كثافته (250 كغ/م³)، مدعمة بحبيبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder)، والمحفوظة بطبقة من مادة الإيبوكسي المستخدمة في الطلاءات.

يتم تحضير هذه العينة بالبدء بتحضير القالب وفق الأبعاد (14x14 cm، سماكة 4 cm)، ثم يوضع في أسفله طبقة من النسيج المشبع بالإيبوكسي، يليه خلط مكوني مادة الفوم وتُضاف لها حبيبات السيليكا النانوية، ويراعى الخلط جيداً حتى تمام التجانس، ثم يُصب المزيج ضمن القالب ويترك حتى يتصلب، يليه وضع طبقة ثانية من النسيج المشبع بالإيبوكسي.

3- العينة الثالثة: نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ البنية نوع (3D spacer fabric type E-glass) سماكته (10 مم)، مادة فوم بولي يوريثان كثافته (250 كغ/م³)، مدعمة بحبيبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder)، ألياف زجاجية مقطعة (E-glass) قطرها (9 ميكرون) طولها (8-12 مم) والمحفوظة بطبقة من مادة الايبوكسي المستخدمة في طلاء أرضيات المخابر. يتم تحضير هذه العينة بالبدء بتحضير القالب وفق الأبعاد (14x14 cm، سماكة 4 cm)، ثم يوضع في أسفله طبقة من النسيج المشبع بالإيبوكسي، يليه خلط مكوني مادة الفوم، وتُضاف لها حبيبات السيليكا النانوية والألياف الزجاجية المقطعة، ويراعى الخلط حتى التجانس، ثم يُصب المزيج ضمن القالب ويترك ليتصلب، يليه طبقة من النسيج المشبع بالإيبوكسي.

4- العينة الرابعة: مادة فوم بولي يوريثان كثافته (250 كغ/م³)، ومدعمة بحبيبات من السيليكا النانوية (SiO_2) مسامية البنية والمحبة للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder)، ألياف بازلتية مقطعة (Basalt chopped fibers) قطرها (9 ميكرون) طولها (5-8 مم) والمحفوظة بطبقة من مادة الإيبوكسي المستخدمة في طلاء أرضيات المعامل والمخابر. يتم تحضير هذه العينة بالبدء بتحضير القالب وفق الأبعاد (14x14 cm، سماكة 4 cm)، يليه خلط مكوني مادة الفوم وتُضاف لها حبيبات السيليكا النانوية والألياف البازلتية

المقطعة، ويراعى الخلط جيداً حتى تمام التجانس، ثم يُصب المزيج ضمن القالب ويترك حتى يتصلب، ثم يتم طلاء وجهي العينة بمادة الإيبوكسي.

5- العينة الخامسة: نسيج زجاجي ثلاثي الأبعاد مفرغ نوع (3D spacer fabric type E-glass) سماكته (20 مم)، مدعمة بحبيبات من السيليكا النانوية مسامية البنية والمحبة.

6- للماء (hydrophilic mesoporous-silica powder)، والمحفوظة بطبقة من مادة الإيبوكسي.

يتم تحضير هذه العينة بالبدء بتحضير القالب وفق الأبعاد (14x14 cm، سماكة 4 cm)، ثم يوضع في أسفله طبقة من النسيج المشبع بمادة الإيبوكسي المعزز والمخلوط حتى التجانس مع حبيبات السيليكا النانوية.

وفي الشكل (9)، صور العينات الخمس المأخوذة لاختبارات العزل الحراري للأبنية.

يتم وزن المواد باستخدام ميزان دقيق مجال الخطأ فيه من رتبة (0.1 gr)، يتم إشباع النسيج بالخلائط المحضرة باستخدام الفرشاة يدوياً.

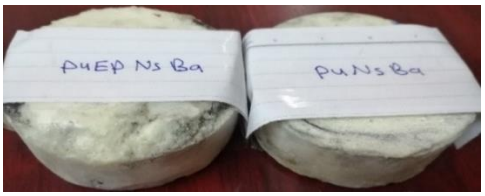
كما يبين الجدول (1) النسبة الوزنية لكل مكون في كل عينة (تركيب العينات).

الجدول (1) يبين النسبة المئوية الوزنية لكل مكون في كل عينة.

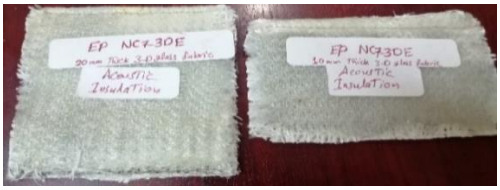
رقم العينة	التركيب (w%) نسبة وزنية							
	E-glass fibers Mat	spacer fabric	PU 250)	Nano silica powd	Epoxy resin	Basalt fibers	E-glass
1	20	0	36	7	36	0	1
2	0	40	33	7	20	0	0
3	0	40	32	7	20	0	1
4	0	0	36	7	37	20	0
5	0	60	0	7	33	0	0

العينة الأولى العينة الثانية

العينة الثالثة



العينة الرابعة



العينة الخامسة

الشكل (9) صور العينات المحضرة لاختبار كفاءة العزل الحراري للأبنية الحديثة

6-2: اختبار كفاءة العزل الحراري:

بالعودة لما ذكر من تعريف لمفهوم العزل الحراري في الفقرة (4-1) نجد أن تقييم كفاءة العزل الحراري لمادة ما تدخل في عزل الأبنية، يأتي من خلال معرفة معامل انتقال الحرارة (K [w/m.k]) الخاص بتلك المادة، وبالتالي كلما كان معامل انتقال الحرارة أقل كلما دل هذا على أن المادة أقل ناقلية للحرارة أي أفضل عازلية، وكلما كان معامل انتقال الحرارة للمادة أكبر كلما كانت كفاءتها للعزل الحراري أقل، والعكس عند حساب (R value) وهو المقاومة الحرارية (Thermal Resistance) للمادة العازلة.

6-3: قياس معامل انتقال الحرارة:

تم استخدام جهاز اختبار ملمس القماش (Fabric Touch Tester FTT)، (هديل وآخرون، 2018)، الموجود في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق، الشكل (10)، في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها،

حيث وبالعودة للوصف الفني للجهاز، وفق ما بينه مصممه، (هديل وآخرون، 2018)، وأقتبس:

" تم ابتكار طريقة قياس جديدة وتم تصميم جهاز (Fabric Touch Tester FTT) وتطويره لسد الثغرات البحثية والوصول إلى تقييم متكامل لملمس القماش، حيث يتم إجراء مجموعة اختبارات ضمن إجراء تجريبي واحد خلال زمن مقداره ثلاث دقائق".

مكونات الجهاز: (هديل وآخرون، 2018).

نذكر من مكونات الجهاز فقط التي تخص قياس التدفق الحراري (Heat Flux H [W/m^2]) وهي:

1- صفيحة علوية تحوي وشيعتي تسخين.

2- صفيحة سفلية.

3- حساس حرارة نوع (pt100) في مركز الصفيحة العلوية (بين وشيعتي التسخين) لضبط الحرارة.

4- حساس حرارة نوع (pt100) في مركز الصفيحة السفلية لقراءة تدفق درجات الحرارة.

5- التجهيزات الالكترونية، (هديل وآخرون، 2018)، ومنها شاشة التحكم التي يتم بواسطتها التحكم بعمليات التشغيل وفق البرنامج المكتوب وإظهار نتائج الاختبار، وما يهمنا في هذا البحث هو فقط قراءة نتيجة الاختبار الحراري من تدفق حراري، ودرجة حرارة الصفيحتين العلوية والسفلية (وجهي العينة).

6- الجهاز مصمم كمشروع تخرج لنيل درجة بكالوريوس، (هديل وآخرون، 2018)، وهو قيد الإيداع وفق الادعاءات (مطالب الحماية)، المذكورة آخر الوصف الفني للجهاز، (هديل وآخرون، 2018).

طريقة العمل على الجهاز:

انطلاقاً مما ورد في الدراسة المرجعية ذات الصلة، Olga et al., 2022,4-8، وتحضيراً للاختبار وقياس التدفق الحراري (Heat Flux H [W/m^2]) تم قص العينات بالأبعاد (10x10 cm، سماكة 4 cm)، مدة الاختبار كما ورد في الوصف الفني للجهاز، (هديل وآخرون، 2018)، هي ثلاث دقائق، لكنها في الواقع أقل من ذلك، حيث تراوحت بين (40-70 ثانية)، تم ضبط درجة حرارة التسخين عند الدرجة (37ºC)، كونها قريبة لدرجة حرارة جسم الانسان، وهو ما يناسب هذا البحث، كون وظيفة المادة العازلة في الأبنية الحديثة هو تأمين الراحة في بيئة الاستثمار من خلال ضبط درجات الحرارة حول تلك الدرجة. فيما يلي نبين خطوات العمل:

1. تشغيل جهاز الاختبار من أجل البدء بعملية التسخين للدرجة المطلوبة (37ºC).
2. توضع العينة على منصة الاختبار.
3. ضغط زر (start) وبدء الاختبار.
4. بعد نهاية اختبار كل عينة نضغط على بوابة الخصائص الحرارية (thermal properties).

صورة الشاشة الرئيسية لعمل الجهاز

شاشة قراءة درجات الحرارة بين وجهي العينة

صورة شاشة قراءة النتائج

صورة تبين مكان وضع العينات

صورة تبين بلاطات تثبيت العينة مع الحساسات

صورة تبين الجهاز كاملاً

الشكل (10) صور تبين مكونات الجهاز المستخدم لاختبار كفاءة العزل الحراري (جهاز اختبار ملمس القماش FTT)

6-4: النتائج:

بعد الانتهاء من اختبار كل عينة، وبالعودة لدراسات مرجعية مماثلة، (Olga et al., 2022,4، Shanaz et al., 2020,498، Malin et al., 2019,5)، تم تسجيل كل من القراءات التالية:

- درجة حرارة الصفيحة العلوية (upper plate temp.) وهي الصفيحة الساخنة.
- درجة حرارة الصفيحة السفلية (lower plate temp.) وهي الصفيحة الباردة.
- ومنهما يتم حساب فرق الدرجات.
- التدفق الحراري (Heat Flux H $[W/m^2]$).

عبر مساحة سطح الاختبار

0.0144)

$.(m^2$

ومن خلال العلاقة (3) يمكن حساب معامل انتقال الحرارة لكل عينة من العينات الخمس كما يلي:

$$H = q/A$$
$$= K.\frac{\Delta T}{X} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$
$$K = H.\frac{X}{\Delta T} \quad [W.m^{-1}.k^{-1}]$$

6-5: مناقشة النتائج:

نلاحظ من الجدول (2) الذي يحوي نتائج اختبارات معامل انتقال الحرارة (K [w/m.k]) ما يلي:

1- بالعودة إلى الدليل الشامل لمنتجات العزل الحراري في الأبنية، (Arval, 2009,26-54)، يجب ألا تقل السماكة عن (35-65 mm).

2- نظراً للكثافة المنخفضة لتلك الحبيبات النانوية (5 g/L)، ومساحة السطح النوعي لبنيتها الداخلية (225 m²/gr)، وبالعودة للمراجع والدراسات المرجعية الحديثة نلاحظ أن أفضل نسبة وزنية لإضافة الحبيبات والمواد ذات البنى النانوية هي (7%)، (Shanaz et al., 2020,495)، وهي النسبة التي تم اعتمادها والانطلاق منها في هذا البحث، وهي متوفرة في السوق المحلية، وقد كانت نسبة كافية لتخفيض معامل انتقال الحرارة للعينات إلى رتبة مقاربة لنتائج تلك الدراسات، لكن وجود مادة الفوم ضروري لزيادة سماكة العازل وبالتالي زيادة مقاومته الحرارية، كما بينت العينة الخامسة ذلك.

3- بالمقارنة بين العينات السابقة من حيث معامل انتقال الحرارة لكل منها، ونسبة المواد ذات التأثير المباشر على العزل الحراري (ذات بنى مسامية ميكروية ونانوية) فقد أبدت العينة الثالثة أداءً أفضل من باقي العينات في تخفيض الموصلية الحرارية حتى (0.028 w/m.k)، ويعود الفضل إلى الفراغات الهوائية برتبة الميليمتر في بنية النسيج ثلاثي الأبعاد، والتي امتلأت بحبيبات السيليكا نانوية البنية، وإلى البنية الميكروية لمسامات مادة الفوم، هنا انخفضت الموصلية الحرارية بالإشعاع والحمل، ثم لعبت الألياف الزجاجية التي يشكل أوكسيد السليسيوم نسبة عالية حتى (55%) دوراً كبيراً في تخفيض انتقال الحرارة بالتوصيل، لكن من حيث الكلفة فيمكن اعتماد العينة الأولى، كون كلفة المتر المربع الواحد من النسيج ثلاثي الأبعاد أكبر من القماش غير المنسوج.

4- إن استخدام الألياف البازلتية زاد من الموصلية الحرارية لكنها أقل كلفة وأعلى جودة من حيث الخواص الميكانيكية والفيزيائية بالمقارنة مع الألياف الزجاجية، كون معاملات الشد والمتانة الخاصة بالألياف البازلتية أعلى من تلك لدى الألياف الزجاجية نوع (E)، ويمكن المفاضلة بين العينتين الأولى والرابعة (الزجاجية والبازلتية) من حيث الكلفة عندما تُهمل الكثافة العالية للألياف البازلتية، كما في استخدامها لعزل الأرضيات في الطوابق الأرضية، مثلاً.

5- أثبتت العينة الخامسة ضرورة رفع سماكة المنتج العازل باستخدام مواد الفوم الخفيف الوزن، والذي يستخدم في عزل الأسقف والجدران المستعارة، ويمكن ذلك بما يتوافق مع الدليل الشامل لمنتجات العزل الحراري والصوتي في الأبنية، حيث تتراوح سماكة تلك المنتجات بين (35-100 mm)، وتحديد السماكة المطلوبة يتوقف على المقاومة الحرارية المطلوبة للعازل (thermal resistance R-value) والتي تزيد بزيادة السماكة، أي وفقاً لمكان تطبيق العازل (أرضيات، جدران، أرضيات).

7- الخلاصة:

من دراسات مرجعية، (Satoshi et al., 2021,1، Dr.Phalguni et al., 2009,1، Atiyeh et al., 2016,228، Vanja et al., 2014,117، David, 2018,980)، نلاحظ تركز الاهتمام في السنوات الأخيرة بالهندسة المدنية والبنى الإنشائية والعازلة للأبنية الحديثة وتطوير تقانات العزل الحراري، لتصبح ذكية ويمكنها ضبط انتقال الحرارة عبر أوساط هذه المنشآت، بهدف توفير وحفظ الطاقة وتوفير الكلفة في أنظمة التكييف والتبريد الخاصة بها، وتحسين أداء العناصر والتجهيزات التي تحويها هذه المنشآت بهدف خلق بيئة متوازنة حرارياً وبنفس الوقت بيئياً. ونظراً لاختلاف أشكال السطوح المراد عزلها (أسطح، جدران، أرضيات، أنابيب، توصيلات معقدة)، لابد أن تتوافر في هذه العوازل مرونة وانسيابية كافية لاحتواء تلك السطوح بجميع زواياها، وأن تمتلك ثباتاً فيزيائياً وميكانيكياً اتجاه عوامل التشغيل والوسط المحيط ، فأول ما ظهرت للعيان في الأسواق الألواح المفرغة بغرض العزل الحراري فقط ((Vacuum insulation panels (VIP) والتي يدخل في تركيبها مادة الفوم، ثم تم تطويرها لتدخل السيليكا على شكل حبيبات مكسرة بأبعاد الميليمتر مكونة من بنية مسامية يشكل الهواء النسبة العظمى منها، وبالتالي تمتاز بكثافة منخفضة وناقلية حرارية تكاد أن تكون 0.001–0.04 (W/m·K) ، (Akos et al., 2021,1)، لكنها هشة تحت تأثير القوى الخارجية، لذا يتم تدعيمها بالألياف والنُسُج المختلفة المنشأ (glass, silica, carbon)، لكن عندما يكون المحتوى النسيجي منخفض ستكون الموصلية الحرارية أكثر انخفاضاً (~0.02 W/(m·K)) كما ستنخفض الخواص الميكانيكية بالتوازي وتصبح حبيبات السيليكا أكثر عرضة للتناثر في محيط التطبيق (كالغبار الغير مرئي بالعين)، لكن عندما يكون توزع النسب الوزنية لمكونات المادة المركبة متوازنا عندها يصبح المنتج النهائي عازل حراري متين ذي مرونة عالية وأداء وظيفي عالي (flexible insulating materials) وتصبح الموصلية الحرارية ((~0.04 W/(m·K)). (Atiyeh et al., Vanja et al., 2014, 119, 2016, 229,.)، ودراسات أخرى، (Satoshi et al., 2021,2)، قامت بمحاولات إدخال مواد بوليميرية مالئة (كالبولي يوريثان والبولي بروبيلين والبولي أميد) بهدف تخفيض كلفة المنتج العازل النهائي، كون حبيبات السيليكا يتطلب انتاجها تقانات نانوية عالية الكلفة والأداء. كما أضيفت حبيبات السيليكا لمادة (Polyol) الأولية المستخدمة في تصنيع فوم البولي يوريثان الصلب وذلك بنسب وزنية لا تتعدى (7.5%)، ثم تُضاف المواد الداعمة من ألياف زجاجية وبازلتية وبعدها يُخلط الناتج مع مادة (poly-isosyanate) وعندها يحدث تفاعل التفويم وتتداخل مسامية حبيبات السيليكا النانوية مع مسامية الفوم الميكروية المغلقة لتتضاعف عندها فاعلية العزل الحراري (موصلية حرارية من رتبة (0.025 W/m·K) وتبقى جودة الخواص الميكانيكية رهن نسبة الألياف والمنسوجات الداعمة، والكثافة من رتبة (0.014 g/cm³). .(Olga et al., 2022,2)

بيّن هذا البحث أنه يمكن وباستخدام الحبيبات النانوية من السيليكا ذات البنية من رتبة النانومتر، وبنسبة وزنية منخفضة (أي بكلفة منخفضة)، تعزيز خصائص العزل الحراري لمادة نسيجية مركبة بوليميرية، مصنعة من خليط من الإيبوكسي كمادة رابطة بأساس بوليميري، ومدعمة بكل من الألياف الزجاجية والبازلتية التي يشكل أوكسيد السليسيوم (SiO2) النسبة الأعظم في تركيبها. كما يمكن استعمال طريقه القولبة اليدوية لتصنيع المصبوبات، حيث يتم خلط الإيبوكسي بنسب مختلفة تبدأ من (20-37%)، و(21–60%) للنسيج والألياف، و(32–36%) لمادة الفوم، بعد ذلك يتم تدعيم المادة الرابطة بالحبيبات النانوية بنسبة (7 %)، لتبدي نتائج اختبار العزل الحراري أن الخليط المدعم بالحبيبات النانوية بنسبة وزنية (7%)، مع النسيج الزجاجي ثلاثي الأبعاد، والألياف الزجاجية، ومادة الفوم، يمتلك أعلى قيمة للعزل الحراري، فالعازل الأفضل على الاطلاق هو الهواء، (بالعودة للدليل الشامل، (Arval, 2009,26-54)، فإن أغلب المنتجات العازلة ذات كثافة منخفضة ويشكل الهواء النسبة الأعظم من بنيتها)، وفي

العينات المدروسة في هذا البحث كان الهواء محبوساً ضمن بنية الفوم برتبة الميكرومتر، وبنية النسيج ثلاثي الأبعاد والمفرغ برتبة الميليمتر، وفي بنية الحبيبات النانوية من السليكا برتبة النانو متر.

إن دراسة الجدوى والكلفة الاقتصادية لعينات العزل الحراري للأبنية في هذا البحث، تتم بالمقارنة مع منتجات العزل الحراري للأبنية، والمصنعة باستخدام تقانات عالية والتي تدخل تكنولوجيا النانو في صناعتها، وتبقى منتجات من الصعوبة بمكان إدخالها للسوق المحلية ومنها:

(VIPs ;Vacuum Insulation Panels 120$/sqm)

(Aerogel Blanket 90$/sqm)

(Airloy Tiles 70$/sqf)

(Aspen Aerogel Granules 20$/gram).

الجدول (3) يبين كلف العينات

رقم العينة	الكلفة $ بالمتر المربع
1	8.15
2	22
3	25
4	5.75
5	20

ومن خلال حساب كلفة كل عينة من العينات الخمس وفقاً لأسعار السوق المحلية، (الجدول 3)، نبين الوفر الاقتصادي على مستوى السوق المحلية بنسبة حتى (18%) لأفضل العينات (العينة 3)، بالمقارنة مع أسعار ألواح الفوم ((Foam Sandwich Panel 30$/sqm) المتوفرة في الأسواق)، أما إن قورنت بتلك التقانات المتطورة فالفارق واضح، فضلاً عن توافر المواد في الأولية في السوق المحلية. أي أن هناك جدوى اقتصادية واضحة من تطبيق هذا العازل، وتبقى قدرة الزبون الشرائية ومدى رغبته في جودة العزل الحراري، الكلمة الفصل في هذا السياق.

بطاقة شكر:

نتوجه بالشكر للسادة المصممين والمبتكرين للجهاز المستخدم في التجربة (جهاز اختبار ملمس القماش) الذي قدم آلية مكونة من (حساسات، وشائع وسطوح تسخين) ساعدت في معرفة كمية الحرارة المنتقلة عند اختبار كل عينة (المادة العازلة)، والذي استند فيه على المواصفة البريطانية (BS4745(2005، والمواصفات ISO8302، ASTM C518.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).

Science Direct, Procedia Engineering 123/2015, P-P: 68 – 75, Gyor, Hungary, Elsevier.

10. Benjamin Gebhart, (1971), Heat Transfer, Literary Licensing, LLC, March 17, 2012, University of California, California, USA, P: 454.

11. Christiansen Lasse, (2021), Electrospinning of Composite Materials, Aalborg University, Aalborg, Denmark, Aalborg University Press by Rosendahls, P: 86.

12. Marco Casini, (2016), Smart Buildings Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 69, Rome, Italy, Elsevier Woodhead, P: 384.

13. Bharat Bhushan, (2004), Springer Handbook of Nanotechnology, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, SPRINGER, P: 1258.

14. Yury Gogotsi, (2006), Nanomaterials Handbook, United States of America, Taylor & Francis Group, LLC, P: 779.

15. Satoshi Yoda, Satoru Takeshita, Takumi Ono, Ryosuke Tada and Hideo Ota, (2021), Development of a New Silica Aerogel-Polypropylene Foam Composite as a Highly Flexible Thermal Insulation Material, Polymeric and Composite Materials, a section of the journal, P-P: 1-9, Tsukuba, Hadano, Japan, Frontiers in Materials.

16. Lamrani, B., Johannes, K., Kuznik, F., (2021), Phase change materials integrated into building walls: An updated review, ScienceDirect, P-P: 1-41, Villeurbanne, France, Elsevier.

17. Xin Min, Minghao Fang, Zhaohui Huang, Yan'gai Liu, Yaoting Huang, Ruilong Wen, Tingting Qian & Xiaowen Wu, (2015), Enhanced thermal properties of novel shape-stabilized PEG composite phase change materials with radial mesoporous silica sphere for thermal energy storage, Sci.Rep. 5, 12964; doi: 10.1038/srep12964, P-P: 1-11, Scientific Reports.

8-References:

1. A.P.S. Sawhney and B. Condon, K.V. Singh, S.S. Pang and G. Li, David Hui, (2009), Modern Applications of Nanotechnology in Textiles, Textile Research Journal, Vol 78(8), P-P: 731–739, Los Angeles, USA, SAGE.

2. V Kartik Ganesh, (2021), Nanotechnology in Civil Engineering, ACADEMIA, Department of Civil Engineering, SRM University Kattankulathur, Chennai-603203, P-P: 1-11, INDIA, Academia.

3. Sherif Attallah, Bakhtiyor Khafizof, Jim Jones, and Tarek Mahfouz, (2015), Improving Envelope Thermal Insulation in Construction Projects Using Nanotechnology Applications, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 04 Issue: 12, eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308, P-P: 70-75, Indiana, USA, Academia.

4. Shanaz Hussein Ahmad, Rana Mahdi Salih, (2020), Acoustic and Thermal Insulation of Nanocomposites for Building Material, Baghdad Science Journal, 17(2), P-P: 494-501, Baghdad, Iraq, Baghdad Science Journal.

5. Arval, (2009), Acoustic and thermal guide (A guide for energy saving and noise comfort in buildings), ArcelorMittal, P: 130.

6. NAIMA, (2009), Building Insulation, Pub. No.NCA101 1/14, P-P: 1-9, Ottawa, Canada.

7. Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, and Ruben Baetens, (2012), Innovative High Performance Thermal Building Insulation Materials - Todays State-of-the-Art and Beyond Tomorrow, Building Enclosure Science & Technology, P-P: 66, Atlanta, U.S.A

8. David Bozsaky, (2016), Application Of Nanotechnology-Based Thermal Insulation Materials In Building Construction, Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. 24, No. 1, P-P: 17 – 23, Győr, Hungary, DE Gruyter.

9. David Bozsaky, (2015), Laboratory tests with liquid nano-ceramic thermal insulation coating,

18. Chunpeng Zhang, Chaoming Pang, Yunrui Mao, And Zhiyuan Tang, (2022), Effect And Mechanism Of Polyethylene Glycol (PEG) Used As A Phase Change Composites (PCMs), Basel, Switzerland, MDPI.

19. Ákos Lakatos, Zsolt Kovács, (2021), Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods, Energy & Buildings, 236-110771, P-P: 1-12, Debrecen, Budapest, Hungary, Elsevier.

20. Evonik Endustries, (2015), Aerosil®-Fumed Silica, Technical Overview, Hanau-Wolfgang Germany, P: 104.

21. م. هديل مثقال العلي، م. سارة محمد قطيش، بإشراف د. باسل يونس و د. سامر حسام الدين و م. ولاء السمارة، (2018)، تصميم وتنفيذ جهاز اختبار ملمس القماش، لنيل درجة إجازة في الهندسة من قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سوريا.

22. Olga V.soloveva, Sergei A. Solovev, Yuri V. Vankov and Rozalina Z. Shakurova, (2022), Experimental Studies of the Effective Thermal Conductivity of Polyurethane Foams with Different Morphologies, Processes MDPI 10, 2257, P-P: 1-18, Kazan, Russia, MDPI.

23. Malin Sletnes, Kristin Elvebakk, Jørn Emil Gaarder, Egil Rognvik, Steinar Grynning, (2019), Thermal conductivity of high-performance insulation - a laboratory study/Realistic design values for use in energy-efficient buildings, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 352, 012046, P-P: 1-8, Trondheim, Norway, IOP Publishing.

24. Dr. Phalguni Mukhopadhyaya, Dr. M. Kumar Kumaran, and co-authors, (2009), Fibre-Powder Composite As Core Material For Vacuum Insulation Panel, 9th International Vacuum Insulation Symposium, 17th and 18th September 2009 at the Royal Institution of Great Britain, P-P: 1-9 London, UK.

25. Atiyeh Hoseini, Ali Malekian, Majid Bahrami, (2016), Deformation and thermal resistance study of aerogel blanket insulation material under uniaxial compression, Energy and Buildings, 130/2016, P-P: 228-237, Avenue, Surrey, British Columbia, Canada, Elsevier.

26. Vanja Prevolnik, Polona Kraner Zrim, Tatjana Rijavec, (2014), Textile Technological Properties Of Laminated Silica Aerogel Blanket, Contemporary Materials, V−1 (2014), P-P: 117-123, Ljubljana, Slovenia.

27. Dávid Bozsaky, (2018), Moisture Behavior of Thermal Insulation Coating Consisted of Vacuum Hollow Nano Ceramic Microspheres, Periodica Polytechnica Civil Engineering, p-p: 980-985, Győr, Hungary.

28. Takashi Kodama, Nobuhiro Shinohara, Shih-Wei Hung, Masanao Obori, Donguk Suh, Junichiro Shiomi, Modulation of interfacial thermal transport between fumed silica nanoparticles by surface chemical functionalization for advanced thermal insulation, Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, Research center, P-P: 1-21, Tokyo, Japan.

29. A. A. Filippov, (2019), Effect of the Size of Silica Nanoparticles on the Mechanical Characteristics of Heterogeneous Epoxy Resin Materials, AIP Conference Proceedings 2053, 030014 (2018), P-P: 030014-(1-4). St., Novosibirsk, Russia, AIP Publishing.

30. Isover (2019), The Insulation Handbook; Acoustic and thermal insulation solution guide, P: 50.

31. Tiasa, (2001), Thermal Insulation Handbook, the Thermal Insulation Association of Southern Africa, Lyttelton, Southern Africa, the AAAMSA Studio, P: 60.