دراسة تجريبية لفعالية مواد تغيير الطور عند خلطها بالمواد الطينية النقية أو المختلطة بالإسمنت لخفض الحرارة داخل المباني

معتز علي خليفة
M.khalifa@zu.edu.ly
محاضر بقسم الهندسة المعمارية
كلية الهندسة، جامعة الزاوية – ليبيا

نوري أبو حميرة الفرنوك
n.elfarnouk@zu.edu.ly
محاضر بقسم الهندسة المعمارية
كلية الهندسة، جامعة الزاوية – ليبيا

المستخلص:

تتناول هذه الورقة البحثية نتائج تجربة الأداء الحراري وفعالية مواد تغيير الطور (PCMs) عند دمجها مع مواد إنشائية بنسب تركيز متفاوتة، وقد اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي العملي. وعلى الرغم من أن مواد تغيير الطور تتميز بقدرة عالية على تخزين الحرارة الكامنة، وأن استخدامها أصبح شائعًا في عدة مجالات، إلا أن انخفاض موصليتها الحرارية يُعد من أبرز التحديات؛ لذلك قدمت العديد من الأبحاث حلولًا لرفع الموصلية الحرارية لهذه المواد. ولمعالجة هذه التحديات، تم تحضير عينات مركبة بإضافة (الرمل أو الأسمنت أو الطين) على شكل ألواح بحجمين مختلفين: الأول (300×300×20 مم) والثاني (300×300×10 مم)، وذلك لتحديد فعاليتها في خفض درجات الحرارة المرتفعة داخل فراغات المباني. وأظهرت النتائج أن إضافة بعض المواد بنسب معينة حسّنت الموصلية الحرارية بشكل ملحوظ. وختاماً، نستنتج أنه بعد دراسة الموصلية الحرارية لمواد تغيير الطور المغلفة كليًا (Macro-encapsulated PCMs) بإضافة الطين والأسمنت والرمل، لتحديد تأثير كل منها، أظهرت النتائج إمكانية دمج مواد تغيير الطور بكفاءة مع الطين، باعتباره مادة صديقة للبيئة، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في مواد البناء. علاوة على ذلك، وبالنظر إلى العيب المعروف لمواد تغيير الطور، وهو انخفاض قدرتها على نقل الحرارة، فقد أثبتت الإضافات قدرتها على تحسين الموصلية الحرارية وتعزيز أداء المادة، من خلال زيادة قدرتها على امتصاص الحرارة وإطلاقها، وتقليل التأخر الحراري بنسبة تتراوح بين 20% و40%.

الكلمات المفتاحية: الأسمنت، التخزين الحراري، الطين، الرمل، الموصلية الحرارية، مواد تغيير الطور.

Abstract:

This paper examines the thermal performance and effectiveness of phase change material (PCMS) when integrated with supporting materials at varying concentration ratios and the study adopted an experimental approach. Whereas PCMS offer high latent heat storage capacity, their application is often limited by low thermal conductivity and leakage issues. To address these challenges, composite samples were prepared by incorporating (sand, cement or mud) in the form of panels of various sizes, such as (300×300×20mm) and (300×300×10mm), in order to figure out their effectiveness and to reduce the high temperature inside the building. The experimental results demonstrated that increasing the percentage of the additive significantly improved the thermal conductivity. Finally, we can conclude that the thermal conductivity of

macro-encapsulated phase change materials (PCMs) was studied with the addition of clay, cement, and sand to determine the effect of each. The results showed that (PCMs) can be efficiently combined with clay as an environmentally friendly material, making them suitable for use as part of building materials. Furthermore, considering the known disadvantage of PCMs their low heat transfer capacity, the additives demonstrated their ability to improve thermal conductivity, enhancing the material's performance by increasing its heat absorption and release capacity, and reducing the thermal lag by 20%–40%.

Keywords: Cement, Clay, PCMs, Sand, Thermal Conductivity, Thermal Storage.

1. المقدمة:

تُعد مواد تغيير الطور (Phase Change Materials - PCMs) ركيزة أساسية في تطبيقات تخزين الطاقة الحرارية، كما تُعد من أكثر الحلول ابتكارًا وكفاءة في مجال إدارة والتحكم بالطاقة؛ إذ تكمن أهميتها في قدرتها على امتصاص وتخزين كميات كبيرة من الطاقة الحرارية الكامنة (Latent Heat) ضمن نطاق ضيق من درجات الحرارة.

تتمحور هذه التجربة حول دراسة الفاعلية الحرارية والأداء الوظيفي لمواد (PCMs) عند خلطها بمواد أخرى مثل الطين والرمل والأسمنت، وذلك بهدف تقليل ارتفاع درجات الحرارة داخل فراغات المباني [1]. ونتيجة لذلك، يُتوقع أن يسهم استخدام هذه المواد في تقليص الحاجة إلى أنظمة التبريد والتدفئة المعتمدة على الكهرباء، وأن تعمل كبديل لأنظمة التبريد والتسخين، مما يساعد على خفض درجات الحرارة داخل الفراغات الداخلية، خاصة أن قطاع المباني يستهلك حوالي 30% من إجمالي إنتاج الطاقة عالميًا [2] [3]. كما أن استخدام مواد تغيير الطور كوسيلة لتخزين الطاقة الحرارية يسهم في خفض الطلب على الوقود الأحفوري، مما ينعكس إيجابًا على تكلفة الطاقة والبيئة [1].

ومن هذا المنطلق، سيتم دمج مواد تغيير الطور بعد خلطها مع مواد إنشائية مثل الأسمنت والطين والرمل، لاستخدامها على شكل ألواح تعمل كغلاف للمبنى عند التشطيب (Building Envelope)، مما يجعل موضعها ذا أهمية كبيرة نظرًا لتأثيره المباشر على السلوك الحراري للجدران [4] [5].

تمتلك مواد تغيير الطور القدرة على التحول من الحالة الصلبة إلى السائلة، ومن السائلة إلى الصلبة، عند درجة حرارة محددة تختلف من مادة إلى أخرى، وذلك من خلال امتصاص أو فقدان الحرارة. ويُعد الماء مثالًا واضحًا على هذه المواد؛ إذ يتحول إلى ثلج عند درجة الصفر المئوي نتيجة فقدان الحرارة الكامنة (التحول من الحالة السائلة إلى الصلبة)، وعند ارتفاع درجة الحرارة يمتص الثلج الحرارة ويخزنها كحرارة كامنة، ثم يتحول من الحالة الصلبة إلى السائلة. وبذلك، تعمل المواد متغيرة الطور على تقليل ارتفاع درجات الحرارة من خلال امتصاصها للحرارة أثناء الانصهار، مما يؤدي إلى خفض درجة الحرارة داخل فراغ المبنى.

ومع ذلك، هناك بعض العوامل التي يجب أخذها في الاعتبار؛ فعلى سبيل المثال، إذا لم تنخفض درجات الحرارة ليلًا في فصل الصيف إلى ما دون درجة تجمد مادة تغيير الطور المختارة، فلن تتمكن المادة من العودة إلى حالتها الصلبة بالكامل، مما قد يحد من فعاليتها في اليوم التالي. كما أن اختيار نوع مادة تغيير الطور يعتمد على درجة الحرارة المريحة المطلوبة، والتي تختلف من منطقة جغرافية إلى أخرى [6].

لا يزال استخدام مواد مثل الأسمنت والجبس والطين مع مواد تغيير الطور موضوعًا قيد البحث، رغم شيوع هذه المواد في البناء [7]. فعلى سبيل المثال، يمكن تصنيع الطوب من مواد مختلفة مثل الطين أو سيليكات الكالسيوم، ويمكن دمجه مع مواد تغيير الطور واستخدامه داخليًا، أو حتى تصنيع ألواح تُستخدم كأسطح نهائية داخلية. وقد استُخدم الطين، سواء بشكل نقي أو مخلوط مع مواد أخرى كالرمل والقش، منذ آلاف السنين في مناخات وثقافات متنوعة، مثل ليبيا ومصر وألمانيا والصين [8].

2. مشكلة البحث:

تتمثل مشكلة البحث في زيادة استهلاك الطاقة في المباني لأغراض التبريد والتسخين بهدف تحقيق الراحة الحرارية للمستخدمين، مما يؤدي إلى زيادة انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون وتلوث البيئة، بالإضافة إلى العبء الاقتصادي. وعلى الرغم من قدرة مواد تغيير الطور على امتصاص الحرارة وخفض درجات الحرارة داخل الفراغات، إلا أنها تعاني من انخفاض في الموصلية الحرارية [9].

3. أهداف البحث:

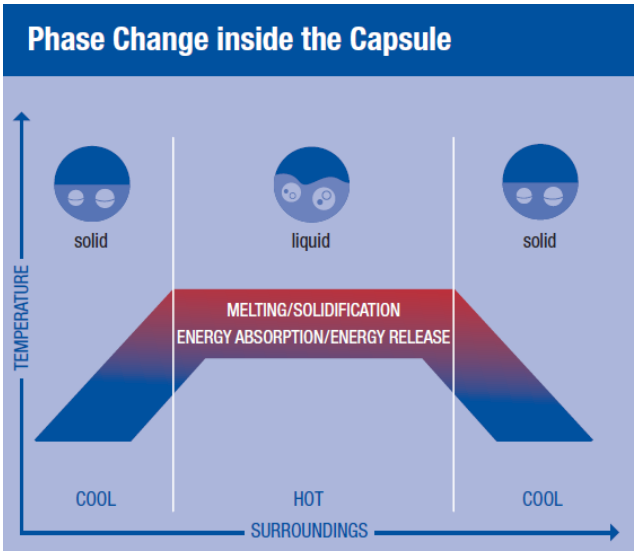
يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير خلط مواد تغيير الطور (PCMs) مع بعض المواد الإنشائية مثل الطين والرمل والأسمنت، وذلك في محاولة لتحسين ضعف التوصيل الحراري لهذه المواد من خلال دمجها مع مواد أخرى [10]. كما يهدف إلى تعزيز قدرة مواد تغيير الطور على تخزين الحرارة وامتصاصها، وكذلك إطلاقها (تفريغها)، عبر تصميم خلطات خاصة مع الطين أو الأسمنت أو الرمل، بهدف الحصول على تركيبات ذات خصائص محسّنة تسهم في تحقيق الراحة الحرارية داخل الفراغات المعمارية للمباني [3].

4. دراسات سابقة:

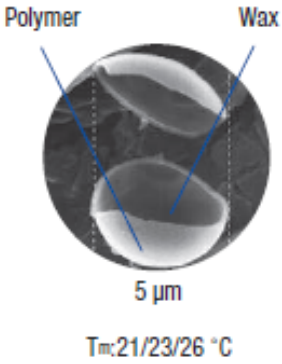
تُعد مواد تغيير الطور (PCMs) مواد قادرة على التحول من الحالة الصلبة إلى السائلة عند امتصاص الحرارة وتخزينها، ومن الحالة السائلة إلى الصلبة عند فقدانها. ومن أهم مميزاتها قدرتها على امتصاص كمية كبيرة من الحرارة قبل بدء عملية التحول، وهي ما تُعرف بالحرارة الكامنة.

تُستخدم هذه المواد في العديد من التطبيقات، مثل المباني، وتبريد الألواح الشمسية، وثلاجات نقل الأدوية، وغيرها. وتختلف درجة حرارة التحول من مادة إلى أخرى حسب التطبيق المطلوب. وتوضح الصورة (1) فكرة تحول المادة من الحالة الصلبة إلى السائلة والعكس، كما تُظهر الصورة (2) هذه العملية داخل كبسولات دقيقة

(Microcapsules). ومن مميزات هذه التقنية إمكانية خلط المادة مع مواد أخرى أو تعبئتها في أشـــكال مختلفة حسب الاستخدام، كما هو موضح في الصورة (3) [11].



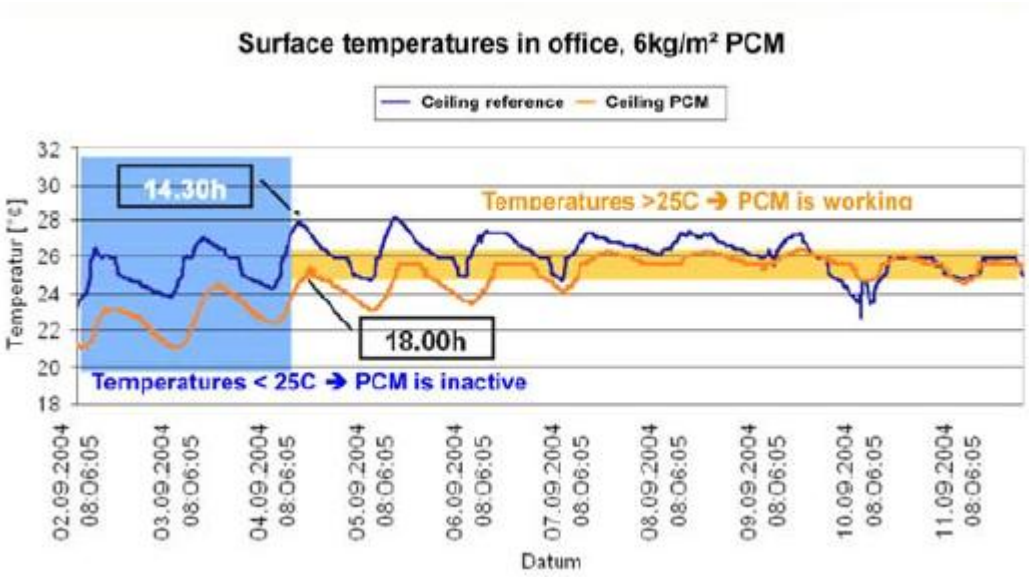
صورة (1): تحول مادة تغيير الطور عند تغيير الحرارة [11].



صورة (2): ميكروكبسول لمادة متغيرة الطور [11]

صورة (3): نوع من العبوات التي تستعمل في تشغيل PCMs [9]

لقد تناولت الدراسات أهمية استخدام مواد تغيير الطور نظرًا لدورها في خفض الاعتماد على الطاقة، خاصة في قطاع المباني، حيث قد يصـل اسـتهلاك الطاقة إلى 50% بحلول عام 2030 في حال عدم تقديم حلول فعّالة للحد من الاستهلاك المرتفع للطاقة في عمليات التبريد والتسخين داخل المباني. ونظرًا لقدرة مواد تغيير الطور على تخزين الطاقة الحرارية، فقد قُدمت العديد من الدراسات للاستفادة منها وتطويرها. وقد قامت شركة BASF باختبار إضـافة مادة تغيير الطور في أحد مكاتبها في ألمانيا، ومقارنته بمكتب آخر في الطابق نفسـه دون اسـتخدام هذه المادة ودون الاعتماد على أي نظام تبريد ميكانيكي. وحسـب ما هو موضـح في الصـورة (4)، فقد وصـلت درجة الحرارة في أحد المكاتب إلى 28 درجة مئوية، بينما بلغت في المكتب الآخر، الذي اسـتُخدمت فيه ألواح جبسـية تحتوي على 6 كجم من ميكروكبسولات مواد تغيير الطور، نحو 26 درجة مئوية [12].



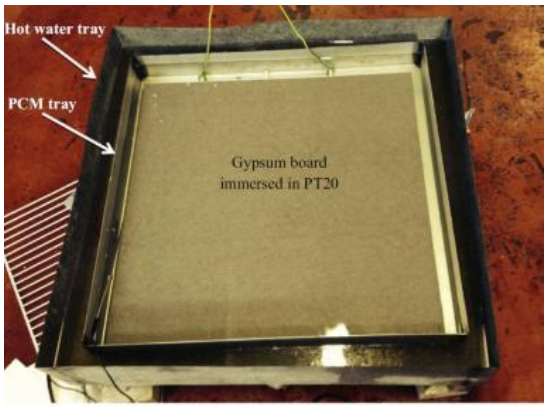
صورة (4): انخفاض الحرارة داخل فراغ مكتبي عند استخدام مادة متغيرة الطور[12]

قام مجموعة من الباحثين بإجراء تجربة لقياس تأثير مواد تغيير الطور على خفض درجات الحرارة، حيث قاموا بإنشـــاء مجســـمين متماثلين في الأبعاد والمواد، كما هو موضـــح في الصـــورة (5). وقد أُضـــيفت في أحد النموذجين ألواح إسـمنتية مختلطة بمادة تغيير الطور المغلفة دقيقًا (Microencapsulated PCM) بسـمك 20 ملم. وأظهرت النتائج انخفاض درجة الحرارة في النموذج الذي يحتوي على لوح الإســـمنت المختلط مع مادة تغيير الطور بمقدار يتراوح بين 0.22 و1.01 درجة مئوية، وهي قيمة محدودة نسـبيًا، مما يشـير إلى أن هذا المجال لا يزال مفتوحًا لمزيد من البحث والنقاش للوصول إلى نتائج أكثر فاعلية [13].

صورة (5): أبعاد المجسم الذي استخدم في تجربة حفض الحرارة باستخدام الواح الاسمنت مع PCM [13]

توجد طريقة أخرى لدمج مواد تغيير الطور مع مواد البناء، وهي طريقة الغمر. فقد قام باحثون بغمر ألواح من الجبس، كما هو موضـــح في الصـــورة (6)، في ســـائل يحتوي على مادة تغيير الطور (PCM). وتُعد هذه الطريقة أكثر تكلفة مقارنة بالطريقة التقليدية لخلطها مع مواد أخرى. بعد عملية الغمر، ازداد وزن ألواح الجبس

بنسبة تتراوح بين 22% و30% نتيجة امتصاص مادة تغيير الطور السائلة، مما يؤدي إلى زيادة السعة الحرارية الكامنة للجدار عند استخدام هذه الألواح في تغطيته. وقد أظهرت نتائج التجربة، التي أُجريت على نموذجين متطابقين وتحت ظروف مناخية موحدة، أن إضافة مادة البارافين السائلة كمادة تغيير طور (PCM) تُسهم في خفض درجات الحرارة القصوى بمقدار يتراوح بين 5 و6 درجات مئوية، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 20%. كما لوحظت أهمية التهوية الليلية لضمان تجمد مادة تغيير الطور بشكل كامل، مما يعزز من كفاءتها في اليوم التالي [14].



صورة (6): لوح الجبس بعد غمره بسائل من مادة متغيرة الطور [14]

ومن الدراسات المهمة في عام 2026، دراسة تناولت خلط الخرسانة الخفيفة مع مواد تغيير الطور بهدف خفض درجات الحرارة داخل فراغات المباني. وقد تم استخدام مادة بولي إيثيلين جلايكول 600 (PEG 600)، وهي سائل شفاف بدرجة تحول طور تبلغ 25 درجة مئوية، بالإضافة إلى بولي إيثيلين جلايكول 1000 (PEG 1000)، وهي مادة صلبة بدرجة تحول طور تبلغ 39 درجة مئوية، وذلك مع إسمنت بورتلاندي وركام طيني. وقد أُجريت عدة اختبارات على هذا الخليط، وأظهرت النتائج أنه عند استبدال الركام الطيني بركام طبيعي، ينخفض معامل التوصيل الحراري بنسبة تتراوح بين 25% و75%، وذلك اعتمادًا على مسامية الركام وكمية الجيوب الهوائية الموجودة فيه [15].

5. المنهجية:

اعتمدت الدراسة على المنهج التجريبي العملي (Experimental Method) لدراسة تأثير خاصية التوصيل الحراري لمواد تغيير الطور (PCMs) عند خلطها مع مواد إنشائية مثل الأسمنت والطين والرمل.

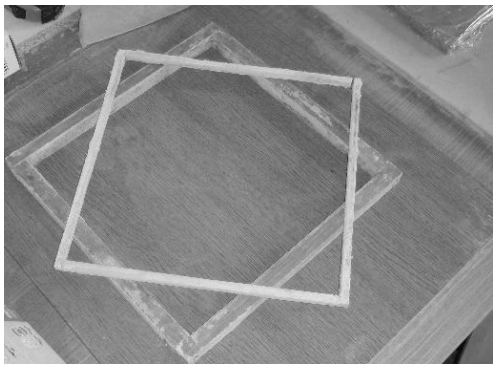
المواد المستخدمة: مادة تغيير الطور – (Macro-encapsulated PCM) أسمنت، طين، رمل، ماء.

تم تصنيع خلطات من مواد تغيير الطور مع الطين والإسمنت بنسب مئوية مختلفة، ثم صُبّت داخل قوالب خشبية لتشكيل ألواح، كما هو موضح في الصور (7) و(8).

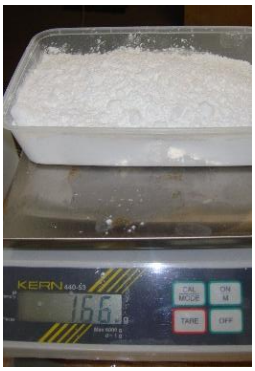
تم تجهيز القوالب الخشبية لتكون مناسبة لجهاز قياس تدفق الحرارة، وكانت أبعادها كالتالي:

القالب (1): 30 سم × 30 سم × 1 سم

القالب (2): 30 سم × 30 سم × 2 سم



صورة (7): الاطارات الخشبية المستخدمة



صورة (8): مادة تغيير الطورPCM

تمت إضـافة كميات من الماء تتراوح بين 0.8 لتر (للقالب رقم 1) و1.2 لتر كحد أقصـى (للقالب رقم 2) إلى كل خلطة.

وتم الحرص على خلط مكونات المواد الجافة (مادة تغيير الطور، والطين، والإسمنت) جيدًا للحصـول على خليط متجانس، كما هو موضـح في الصـورة (9)، مع اتخاذ الاحتياطات اللازمة للحفاظ على سـلامة الغلاف المجهري لمادة تغيير الطور. بعد ذلك، تتم إضـافة الماء تدريجيًا مع الخلط المسـتمر حتى الحصـول على قوام متجانس، كما هو موضح في الصورة (10).

صورة (9): خلط المكونات على الجاف

صورة (10): خلط المكونات بعد إضافة الماء

تم ضـغط الخليط داخل القوالب، كما هو موضـح في الصـور (11) و(12)، لضـمان توزيعه بشـكل كامل وعدم وجود فراغات قد تؤدي إلى ضـعف في هيكلية اللوح، وذلك باسـتخدام الهزاز [4]. كما تم تغليف الألواح بالنايلون لتقليل معدل التبخر، كما في الصورة (13).

وبعد مرور مدة تتراوح بين 7 إلى 10 أيام، وهي المدة الكافية للحصـول على لوح صـلب، تُخضـع الألواح لاختبار التوصـيل الحراري باسـتخدام جهاز قياس تدفق الحرارة (Heat Flow Meter)، كما هو موضـح في الصورة (14).

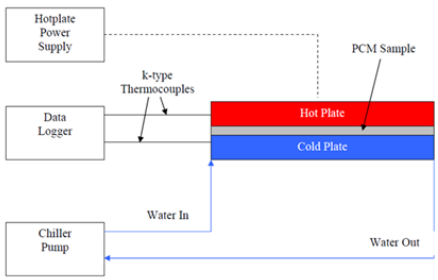
ويجب معرفة درجة حرارة الصفيحة الساخنة والصفيحة الباردة في جهاز قياس تدفق الحرارة (Heat Flow Meter).

ملاحظة: تم إضـافة مادة من شـركة سـيكا، وهي (Sika-Cim No Crack Concrete)، وذلك لمنع حدوث أي تشققات ناتجة عن استخدام الإسمنت، نظرًا لضعف مقاومته لقوى الشد.

صورة (11): توزيع الخليط

صورة (12): شكل اللوح بعد إعداده

صورة (13): تغليف اللوح



صورة (14): فكرة عمل جهاز قياس تدفق الحرارة (Heat Flow Meter)

ويجب معرفة درجة حرارة الصفيحة الساخنة والصفيحة الباردة في جهاز قياس تدفق الحرارة (Heat Flow Meter).

6. المعطيات المطلوبة لإجراء الاختبار:

- درجة حرارة الصفيحة الساخنة
- درجة حرارة الصفيحة الباردة.

عند اختبار خلطات مواد تغيير الطور (PCM) مع الطين والإسـمنت، يُجرى اختباران: أحدهما عند درجة حرارة أقل من نقطة الانصـهار، والآخر عند درجة حرارة أعلى منها، مع فرق في درجات الحرارة بين الصـفيحتين يتراوح عادةً بين 15–20 درجة مئوية.

- كثافة اللوح.
- سمك اللوح.

بعد إدخال جميع البيانات المطلوبة، يستغرق الاختبار من 10 إلى 24 ساعة، ويقدّم الجهاز أكثر من نتيجة بفروق طفيفة، تمثّل قيمة التوصـيل الحراري للوح. ومن خلال الحصـول على قيمة التوصـيل الحراري (k)، يمكن حساب معامل المقاومة الحرارية (R) ومعامل انتقال الحرارة الكلي (U) باستخدام المعادلات التالية:

$$R = \frac{d}{k}$$

حيث السُمك من $x = 0$ إلى $x = d$، ومن T_1 إلى T_2:

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = -q \int_0^d \frac{dx}{k(x)}$$

فنحصل على:

$$T_2 - T_1 = -q \int_0^d \frac{dx}{k(x)}$$

وبتعريف المقاومة الحرارية:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{q}$$

إذن الصيغة التكاملية العامة للمقاومة الحرارية تصبح:

$$\boxed{R = \int_0^d \frac{dx}{k(x)}}$$

حيث:

R= المقاومة الحرارة m^2K/W/ (م^2·ك/واط).

d= سُمك المادة m/م (متر)

k= الموصلية الحرارية للمادة W/m K/ (واط/م·ك)

$U=\frac{1}{R}$

حيث:

U= معامل انتقال الحرارة الكلي (W/m^2K)) (واط/م^2·ك).

7. مزايا استخدام الطين:

1. قابل لإعادة التدوير.
2. مادة مستدامة.

3. طاقة مُدمجة (Embodied Energy) منخفضة، كونه مادة طبيعية بنسبة 100%.
4. سعة حرارية تبلغ 1381 جول/كغ·ك [16].
5. مادة صحية [8].

8. أهمية إضافة الإسمنت:

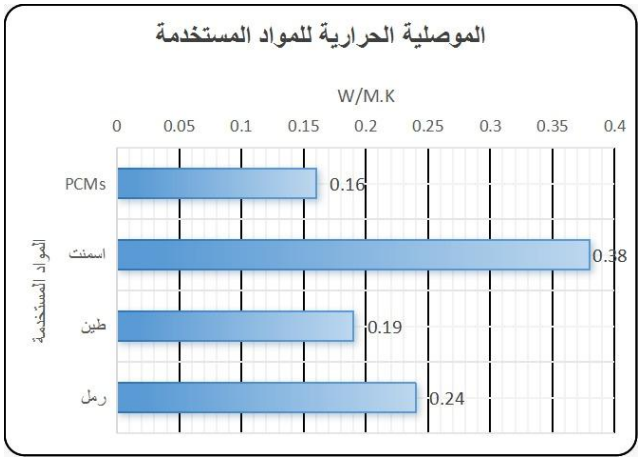
يتيح استخدام الإسمنت تجنب عملية حرق (Firing) الطين، ويتميز ذلك بعدة مزايا، منها:

1. عدم الحاجة إلى حرق الطين، مما يقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.
2. توفير في الطاقة يصل إلى 70% نتيجة إلغاء عملية الحرق.
3. جودة تشطيب سطحية جيدة.

ومع ذلك، فإن العيب الرئيسي لاستخدام الإسمنت يرتبط بعملية تصنيعه الصناعي، التي تُعد ذات تأثير بيئي سلبي. يهدف هذا الاختبار إلى دراسة تأثير الموصلية الحرارية عند خلط مادة تغيير الطور المغلفة (Macro-encapsulated PCM)، والتي تُعرض موصليتها في الجدول (1)، مع مواد أخرى. كما يوضح الجدول قيم الموصلية الحرارية للمواد المستخدمة في الاختبارات، ويبيّن الرسم البياني في الصورة (15) المقارنة بين هذه القيم.

جدول (1): الموصلية الحرارية للمواد المستخدمة.

المادة	الموصلية (واط/ م·ك)
مادة متغيرة الطور Macro-encapsulated PCM	0.16
إسمنت	0.38
طين	0.19 – 0.15
رمل	0.24 – 0.15



صورة (15): رسم بياني يوضح الموصلية الحرارية للمواد المستخدمة في الاختبارات

9. النتائج:

- اللوح (1): طين نقي بنسبة 100%.
- التوصيل الحراري = 0.183 واط/م·ك.
- اللوح (2): يتكوّن من 90% طين و10% مادة تغيير الطور.
- أظهر هذا اللوح شـقوقًا شـديدة تجاوزت الحد المقبول لإجراء اختبار التوصـيل الحراري، كما هو موضـح في الصـورة (16)، ويمكن تفسـير هذه الشـقوق الكبيرة بعاملين رئيسـيين، وهما: ارتفاع نسـبة الطين في الخلطة، وعدم وجود مادة لاصقة أو رابطة مثل الإسمنت أو مادة مثل Sika-Cim No Crack Concrete.

صورة (16): الشقوق في اللوح (2)

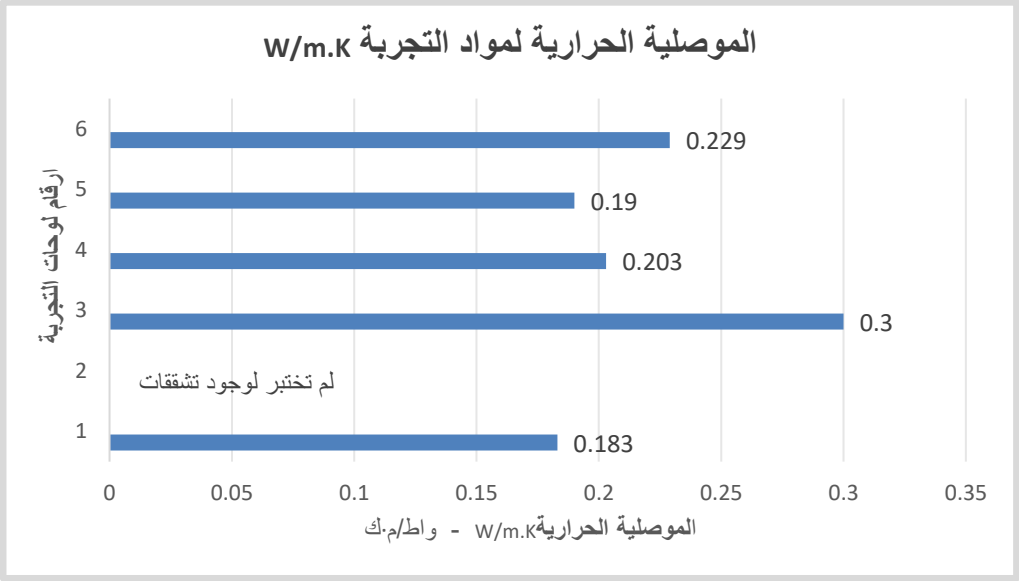
- اللوح (3): 85% طين و15% إسمنت كما هو موضح في الصورة (17).
- نتيجة اختبار التوصيل الحراري = 0.30 واط/م·ك.

صورة (17): اللوح (3)

- اللوح (4): 10% مادة تغيير الطور (PCM)، 50% طين، 40% إسمنت.

- نتيجة اختبار التوصيل الحراري = 0.203 واط/م·ك.
- اللوح (5): 10% مادة تغيير الطور (PCM)، 75% طين، 15% إسمنت.
- نتيجة اختبار التوصيل الحراري = 0.19 واط/م·ك.
- اللوح (6): 15% مادة تغيير الطور (PCM)، 70% طين، 15% إسمنت.
- نتيجة اختبار التوصيل الحراري = 0.229 واط/م·ك.

وتوضح الصورة (18) رسماً بيانيًّا يقارن بين نتائج اختبار الموصلية الحرارية للألواح الناتجة عن خلط مواد تغيير الطور مع الإسمنت والرمل والطين.



صورة (18): رسم بياني يوضح نتيجة اختبار الموصلية الحرارية للألواح

10. المناقشة:

- خضع اللوح الأول (100% طين) للاختبار، وكانت قيمة التوصيل الحراري 0.186 واط/م·ك، وستُستخدم هذه القيمة كمرجع لمقارنة فعالية دمج مادة تغيير الطور مع الطين والإسمنت. أما اللوح الثاني، فقد ظهرت عليه شقوق شديدة جعلته غير صالح للاختبار. ولتجنب هذه المشكلة مستقبلًا، تم استخدام مادة مقاومة للتشققات (No-Crack Concrete) من شركة سيكا [7].
- عند مقارنة اللوح (4) (0.203 واط/م·ك) مع اللوح (3) (0.30 واط/م·ك)، يتضح التأثير الكبير للإسمنت على التوصيل الحراري. وعند خفض نسبة الإسمنت من 40% إلى 15% وزيادة نسبة الطين (كما في اللوح 5)، يبرز الدور المهم الذي يلعبه الطين في تحسين التوصيل الحراري لمادة تغيير الطور عند دمجها معه. ومع ذلك، يظل استخدام كمية قليلة من الإسمنت ضروريًّا لربط مكونات الخلطة معًا، وتجنب الحاجة إلى حرق الطين.

- أظهر اللوح (5) انخفاضًا ملحوظًا في التوصيل الحراري من 0.30 واط/م·ك (اللوح 3) إلى 0.19 واط/م·ك عند استبدال 10% من الطين بـ10% من مادة تغيير الطور. ومع ذلك، ظلت هذه القيمة أعلى من التوصيل الحراري لمادة تغيير الطور وحدها (0.16 واط/م·ك، انظر الجدول 1). وفي المقابل، أظهر اللوح (6) زيادة تدريجية في التوصيل الحراري (0.229 واط/م·ك) عند استبدال 5% إضافية من الطين بـ5% إضافية من مادة تغيير الطور.

11. الخلاصة:

إن استخدام نسبة 15% من الإسمنت يُعد كافيًا لتقليل الأثر البيئي الناتج عن تصنيعه، مع التأكيد على أهميته كمادة رابطة، مع إتاحة استخدام الطين كمادة صديقة للبيئة يمكن دمجها مع مواد تغيير الطور. كما أن استبدال نسب متفاوتة من الطين بمواد تغيير الطور يُسهم في تحسين ضعف التوصيل الحراري لهذه المواد، مما يُسرّع من قدرتها على امتصاص الحرارة وإطلاقها. ومع ذلك، يُوصى بإجراء مزيد من الاختبارات على نسب خلط مختلفة للوصول إلى فهم أعمق لتأثير دمج مواد تغيير الطور مع الطين على الخصائص الحرارية.

12. المراجع:

[1] N. H. H. Tao, "Application of Phase Change Material (PCM) in Concrete for Thermal Energy Storage," in *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*, 2018.

[2] Y. W. M. X. Y. Y. W. C. M. F. S. W. Xingguo Guo, "Optimal phase-change temperatures for PCM-integrated building walls: Effect of orientation and positioning on thermal performance in China's hot summer and cold winter zone," *Optimal phase-change temperatures for PCM-integrated building walls: Effect of orientation and positioning on thermal performance in China's hot summer and cold winter zone,* vol. 71, 2026.

[3] Z. (. Y. T. Y. D. Q. S. L. G. Z. F. H. M. M. J. Zhengxuan Liu, "A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications," *Building and Environment,* vol. 144, pp. 281-294, 2018.

[4] S. A. A. &. M. O. Osibodu, "Phase change material integration in concrete for thermal energy storage: techniques and applications in sustainable building," *Sustainable Energy Research,* vol. 11, no. 2, pp. 1-17, 2024.

[5] M. E. N. H. N. Huang, "The application of a validated numerical model topredict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building," *Solar Energy Materials &Solar Cells,* pp. 1951-1960, 2006.

[6] L. D. R. H. J. D. W. Peeters, "Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation," *Applied Energy,* 2008.

[7] B. T. c. Company, "BASF The chemical Company," [Online]. Available: <http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_29081. [Accessed 15 12 2025].

[8] A. F, "An Introduction to Traditional and Modern German Clay Building," [Online]. Available: http://networkearth.org/naturalbuilding/clay.html. [Accessed 07 06 2025].

[9] N. H. P. E. M. S. Francis Agyenim, "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* no. 14, pp. 615-628, 2010.

[10] D. K. K. J., "Heat transfer in neuron composite laminated phase change drywall," The Applied Energy and Environmental Engineering Group, 2004.

[11] Basf, "Micronal PCM," Basf, 01 11 2008. [Online]. Available: www.micronal.de. [Accessed 05 01 2026].

[12] B. S. d. sheet, "Micronal PCM Intelligent Temperature Managment for Buildings," BASF, 2010.

[13] M. A. M. I. M. H. eyad Amin Al-Absi, "eyad Amin Al-Absi, Muhammad Asif, Mohd Isa Mohd Hafizal," vol. 65, 2025.

[14] K. J. F. K. B. Lamrani, "Phase change materials integrated into building walls: An updated review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 140, 2021.

[15] D. M. A. K. A. S. M. E. Mahshid Abdoli, "Lightweight concrete with improved thermomechanical properties incorporating PCM-infused microsilica additives," *Case Studies in Thermal Engineering,* vol. 80, 2026.

[16] "Solids," Specific Heat Capacities, [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html. [Accessed 10 07 2025].