دراسة دور المواد مُتغيرة الطور في تحسين كفاءة الأداء الحراري لأغلفة المباني التكيُفية

Studying The Role of Phase Change Materials in Improving the Thermal Performance Efficiency of Adaptive Building Envelopes

أ.د/ عبد الرحمن محمد بكر

أُستاذ التصميم البيئي بقسم التصميم الداخلي والأثاث – كُلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان.

Prof./ Abd El-Rahman Muhammad Bakr

Professor of Environmental Design, Interior Design and Furniture Department, Faculty of Applied Arts - Helwan University

abdelrahman_hussein@a-arts.helwan.edu.eg

أ.د/ أحمد محمود يوسف

أُستاذ كيمياء وتكنولوچيا البلمرات – شعبة بحوث الصناعات الكيميائية – المركز القومي للبحوث.

Prof. Ahmed Mahmoud Youssef

Professor Of Polymer Chemistry And Technology - Chemical Industries Research Division - National Research Center

drahmadyoussef1977@gmail.com

أ.م.د/ ضياء الدين محمد طنطاوي

أُستاذ مُساعد بقسم التصميم الداخلي والأثاث – كُلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان.

Assist. Prof. Dr. Diaa-Elden Mohamed Tantawy

Associate Professor of Interior Design, Interior and Furniture Design Department, Faculty Of Applied Arts - Helwan University

diaatantawy@hotmail.com

د/ أحمد محمد لبيب عبد الحميد

دكتور باحث – قسم فيزياء الموجات الميكروئية – شعبة البحوث الفيزيقية – المركز القومي للبحوث.

Dr. Ahmed Mohamed Labeeb Abd El-Hamid

Research Doctor - Department of Microwave Physics - Division of Physical Research - National Research Center

ahmad.m.labeeb@gmail.com

م.م/ ياسمين عادل عبد المنعم ورد

مُدرس مُساعد بقسم التصميم الداخلي والأثاث – كُلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان.

Assist. Lect. Yassmin Adel Abd El-Moneim Ward

Assistant Lecturer, Department Of Interior Design And Furniture - Faculty Of Applied Arts - Helwan University

YasmineAdel@a-arts.helwan.edu.eg

المُلخص:

في إطار النُهج غير المُستدامة، تعتمد المباني بشكل مُتزايد على الأنظمة الميكانيكية لضمان توفير مُتطلبات جودة البيئة الداخلية الحرارية، مما يتسبب في الحاجة إلي المزيد من الطاقة وتصاعد مُعدلات إنبعاثات غازات الإحتباس الحراري المُصاحبة. الأمر الذي يتطلب تزايد الوعي نحو الحفاظ على الطاقة والحد من إستهلاكها بالتزامن مع تعزيز إستدامة المباني. وفي هذا الشأن، نجد أن لغُلاف المبنى دوراً حاسماً في تقليل إستهلاك الطاقة فضلاً عن دوره في رفع أداء المبني بإعتباره الوسيط المُنظم للعلاقة التبادلية بين البيئة الداخلية والخارجية، خاصةً عند تطبيق الحلول التقنية المُناسبة والمواد الموفرة

للطاقة التى تُعزز مفهوم التكيف السلبي للمبنى مع المُتغيرات البيئية المُتواقتة. لذلك، يُعد تحسين كفاءة أداء الطاقة خلال المراحل التشغيلية لغُلاف المبنى مجالاً نشطاً للبحوث؛ فدائماً ما تسعي المُنظمات المسئولة إلي التوصل لتقنيات مُتقدمة تستند على مصادر الطاقة المُتجددة بهدف تقليل إعتماد المباني على الوقود الأحفوري وتوفير مُتطلبات طاقة التبريد و/أوالتدفئة، فضلاً عن تحسين الراحة الحرارية الداخلية بطريقة أكثر إستدامة وفاعلية.

وفي هذا الصدد، يتم مُناقشة أنظمة تخزين الطاقة الحرارية كأحد التقنيات المُتقدمة الفعالة في إدارة الأداء الحراري لغُلاف المبني مع التركيز على دور المواد مُتغيرة الطور في رفع كفاءة الأداء الحراري للمبنى. تُسلط هذة الدراسة الضوء على أهمية تطبيق المواد مُتغيرة الطور في غُلاف المبنى ودورها في تفعيل مبدأ التكيف الحراري مع التقلبات اليومية، وذلك من خلال مُناقشة ماهية تلك الفئة من المواد، أنواعها، خصائصها المُميزة بالإضافة إلي دراسة مبدأ العمل التشغيلي لها، ثم دراسة معايير إختيار أنسبها. بالإضافة إلي التركيز بشكل خاص على الدراسات الحالية والسيناريوهات المُستقبلية لتلك المواد لرصد سلوكها الحراري وفحص دورها في رفع كفاءة الأداء الحراري لعناصر الغُلاف. تُشير النتائج الرئيسية للدراسة إلي أن للمواد مُتغيرة الطور تأثير كبيراً على تقليل أحمال التبريد/التدفئة وتوفير الطاقة بمعدلات كبيرة فضلاً عن الحفاظ على تفعيل الراحة الحرارية المرجوة في الحيزات الداخلية.

الكلمات المفتاحية:

المواد مُتغيرة الطور – أنظمة تخزين الطاقة الحرارية – جودة البيئة الداخلية الحرارية (الراحة الحرارية) - أغلفة المباني التكيُفية – التبريد السلبي - توفير الطاقة.

Abstract:

In the context of unsustainable approaches, buildings are increasingly dependent on mechanical systems to ensure quality requirements of thermal indoor environment, which causes the need for more energy as well as rising the associated greenhouse gas emissions rates. This requires increased awareness towards energy conservation and reduction of energy consumption in conjunction with enhancing buildings sustainability. In this regard, we find that the building envelope plays a crucial role in reducing energy consumption; as well as its role in raising the performance of buildings as the regulating mediator in the reciprocal relationship between the internal and external environment, especially when applying appropriate technical solutions and energy-saving materials within the structure of the envelope, which enhances the concept of passive adaptation to the simultaneous environmental changes. So, Improving the efficiency of energy performance during the operational phases of the building envelope is a vigorous area of research; Organizations and responsible authorities are always seeking to come up with advanced technologies based on renewable energy sources in order to reduce buildings' dependence on fossil fuels and provide cooling and/or heating energy requirements, as well as improve indoor thermal comfort in a more sustainable and cost-effective manner.

In this regard, Thermal Energy Storage Systems (TES) are discussed as one of the most effective advanced technologies in managing the thermal performance of the building envelope with a particular focus on studying the role of Phase Change Materials (PCMs) in raising the efficiency of the building's thermal performance. This study sheds light on the importance of applying phase-changing materials in the building envelope and its role in activating the principle of thermal adaptation to daily fluctuations. by discussing the nature of that category of materials,

their types, and their distinctive properties in addition to studying its main working principle, then studying criteria for choosing the most appropriate. focusing on current studies and future scenarios for these materials to monitor their thermal behavior and examine their role in raising the efficiency of the building envelopes performance. The main results indicated that the phase change materials have a significant effect on reducing the cooling/heating load, saving energy and gaining thermal comfort.

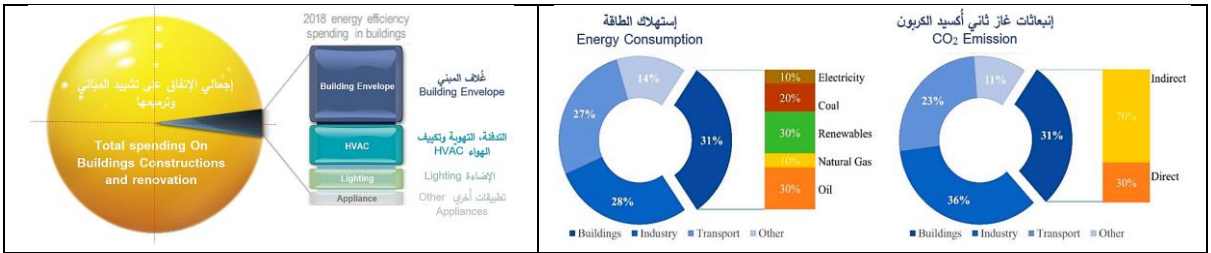
Keywords:

Phase change Materials (**PCMs**) - Thermal Energy Storage Systems (**TESSs**) - Thermal indoor environment quality (Thermal Comfort) - Adaptive Building Envelopes – Passive Cooling - Energy Saving.

المُقدمـــة:

يُعد إستمرار زيادة إستهلاك الطاقة في المباني أحد أكثر القضايا المُلحة في جميع أنحاء العالم. فعلى الصعيد العالمي، تصل نسبة الطاقة المُستهلكة لتوفير الراحة الحرارية (من تدفئة وتبريد) إلي ٤٠% و٦١% من إجمالي الطلب على الطاقة في المباني التجارية والسكنية على التوالي[١]. ووفقاً لوكالة الطاقة الدولية (IEA)، يُعتبر قطاع المباني المسئول الأكبر عن إجمالي الإستهلاك المتفاقم للطاقة في جميع أنحاء العالم (**الشكل ١**). ومن المُتوقع بحلول عام ٢٠٥٠م إرتفاع الطاقة المُستهلكة للتدفئة وللتبريد في المباني بنسبة تصل إلي ١٢% و٣٧% على التوالي[٢]. ورد في تقارير الأُمم المُتحدة خلال عام ٢٠٥٠م إحتمالية زيادة النمو السُكانى بشكل كبير حيث يتركز ٧٥% منهم في المُدن والمناطق الحضرية مما ينجم عنه زيادة الطلب على الطاقة حوالي ٥٠%، وكذا تضاعُف الطلب على تبريد المباني بثلاثة أضعاف مُقارنةً بعام ٢٠١٠م؛ مما يستوجب تصميم المُدن ضمن إطار بيئي يُعزز مباديء الإستدامة.[٣]

يؤثر غُلاف المبنى دوراً رئيسياً وفعالاً في ضبط الطاقة والتحكم في أحمال التدفئة و/أو التبريد لتلبية مُتطلبات الراحة الحرارية لدي قاطني حيزات المبني على المدي القريب، فضلاً عن دوره الفعال في تقليل إستهلاك الطاقة وإنبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على المدي البعيد[٣]. لذا، يُمثل غُلاف المبني الدرع الواقي من التغيرات المُناخية المُتعاقبة، كما أنه يُعد عُنصر فعال في إدارة أداء المبني من منظور الطاقة بكفاءة. وهو الأمر الذي توجهت بصدده العديد من الجهات والمُنظمات الدولية المسؤولة نحو تقديم جيل جديد من أغلفة المباني التى تتسم بقُدرتها على التكيُف للإستجابة بشكل ديناميكي مع مُتغيرات البيئة المُحيطة بهدف التخفيف من حدة المناخ، وخفض ثاني أكسيد الكربون وكفاءة الطاقة. وهو ما أكدت عليه تقارير وكالة الطاقة الدولية (IEA) أن مُعظم الإستثمارات والنفقات لقطاع المباني قد توجهت لتجديد أغلفة المباني القائمة وتخليق أغلفة مُستجيبة تكون أكثر موائمةً وتأقلماً مع مُحفزات البيئة الخارجية[٤]، كما هو موضح في (**الشكل ٢**).



شكل ١.[٤]

شكل ٢.[٤]

شكل ١. يوضح الإستهلاك المُتزايد للطاقة في قطاع المباني - شكل ٢. يوضح الإنفاق العالمي والإستثمارات في مجال توفير الطاقة في قطاع المباني، وفقاً لتقرير وكالة الطاقة الدولية لعام ٢٠١٨م – (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة، ٢٠١٩م[٤]).

وفي هذا الشأن، فقد قُدمت العديد من الحلول المُختلفة لخفض أحمال التدفئة والتبريد من خلال تصميم غُلاف مُتكيف يتضمن تقنيات مُتقدمة تُحث على تقليل إستهلاك الطاقة بهدف توفير مُتطلبات الراحة الحرارية المرجوة[٥-٧]. يُعد من بين أفضل المُمارسات والإستراتيجيات الناجحة لتخليق أغلفة تكيُفية هو دمج مواد تخزين الطاقة الحرارية (المواد مُتغيرة الطور PCMs) في عناصره الرئيسية للتحكم في الأحمال الحرارية مما ينجم عنه توفير الطاقة بشكل ملحوظ[٨-٩]؛ حيث تعمل المواد مُتغيرة الطور على تقليل أحمال التبريد والتدفئة من خلال قُدرتها على تخزين وإطلاق الطاقة الحرارية أثناء دورات الذوبان والتصلب وبالتالي الحفاظ على توفير الراحة الحرارية ضمن نطاق مقبول من قبل المُستخدمين[١٠-١١]. ولايزال مجال البحث حول المواد مُتغيرة الطور في تزايد مُستمر لتخليق أنواع جديدة وتطبيقات تقنية مُحسنة للوصول إلي السلوك الحراري الأمثل والأعلى في الأداء التشغيلي لتلك الفئة من المواد.

لذلك، تُركز الدراسة البحثية على أهمية الأغلفة التكيفية كحل مُستدام للتصدي للقضايا البيئية المُتعلقة بتغير المُناخ، بينما تتمركز الدراسة بصفة رئيسية على دراسة خصائص وإمكانيات المواد مُتغيرة الطور في رفع كفاءة أداء المبني حرارياً ومردود تطبيقها - كأنظمة تكيفية مُستدامة - على توفير مُتطلبات جودة البيئة الداخلية الحرارية. تتكون هذة الدراسة البحثية من ثلاثة أقسام رئيسية مُتضمنة: الدراسة النظرية لتقديم موجز عن مفهوم الراحة الحرارية والتقنيات الفعالة في تعزيز الكُتلة الحرارية لغُلاف المبني، ثم يليها الدراسة الإستقصائية لرصد وتقييم مدي كفاءة المواد مُتغيرة الطور في رفع كفاءة الأداء الحراري للمبني عند دمجها ضمن بنية عناصره المُختلفة، وأخيراً الدراسة التحليلية التى تتضمن تحليل نماذج تطبيقية لتنفيذ تلك المواد في تصميم غُلاف المبني بغرض تحسين أداءه الحراري.

مُشكلة البحث:

تكمُن مُشكلة الدراسة البحثية في الآتي:

- الإستناد الأعظم في توفير مُتطلبات جودة البيئة الداخلية الحرارية على الأنظمة الميكانيكية النشطة التى تستهلك المزيد من الطاقة، وعدم قُدرة المباني بتصميماتها التقليدية على تحقيق الإستقرار الحراري الداخلي.
- القصور المعرفي حول تطبيق تقنيات تخزين الطاقة الحرارية الكامنة في أغلفة المباني التكيُفية.

لذلك، يُمكن صياغة مُشكلة الدراسة في التساؤل الآتي: ما هو دور التقنيات المُتقدمة المُستندة على تخزين الطاقة الحرارية الكامنة (المواد مُتغيرة الطور) في تحسين الأداء الحراري للمبني من منظور حفظ الطاقة، وما مدي مردودها على خفض أحمال التبريد و/أو التدفئة لضمان توفير الراحة الحرارية؟

أهمية البحث:

تكمُن أهمية البحث في إلقاء الضوء على دور تقنيات تخزين الطاقة الحرارية في إدارة الأداء الحراري لغُلاف المبني بمنهجية تكون أكثر توافقاً وتلائماً مع البيئة ضمن إطار بيئي مُستدام.

أهداف البحث:

تهدف الدراسة البحثية إلي ما يلى:

- دراسة دور التقنيات المُتقدمة المُستندة على مصادر الطاقة الشمسية المُتجددة (أنظمة تخزين الطاقة الحرارية) في تحسين الأداء الحراري للمبني.
- رصد وتقييم السلوك الحراري للمواد مُتغيرة الطور المُدمجة في عناصر غُلاف المبني المُختلفة وفقاً لما ورد في الأدبيات السابقة، لتحديد مدي فاعلية تطبيقها من منظور توفير الطاقة (ومردود تطبيقها في خفض أحمال التبريد و/أو التدفئة).

فرضية البحث:

تتحقق الدراسة البحثية من مدي صحة الفرضية التى تنص على أن: تطبيق أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة بواسطة دمج المواد مُتغيرة الطور في عناصر غُلاف المبني يؤدي إلي تحسين الأداء الحراري للمبني، مما يُعزز توفير الطاقة من منظور خفض أحمال التبريد و/أو التدفئة.

منهجية البحث:

تتبع الدراسة البحثية المنهج الوصفي المسحي والوصفي التحليلي للتحقق من مدي صحة فرضية الدراسة بواسطة تحليل مجموعة من الدراسات السابقة والحالية التى تضمنت دمج المواد مُتغيرة الطور ضمن بنية عناصر الغُلاف المُختلفة، وذلك لرصد وتقييم السلوك الحراري لتلك الفئة من المواد؛ من أجل التحقق من مدي فاعليتها المُثلي على خفض أحمال التبريد و/أو التدفئة، ومن ثم توفير أو حفظ الطاقة.

١. الإطار النظري للبحث (الدراسة النظرية)

١-١. الطاقة الحرارية في المباني وتقنيات تقليل الأحمال الحرارية من منظور الأغلفــة التكيُفيــة

١-١-١. الراحــة الحراريــة في البيئة الداخلية.

يقضي الأفراد أكثر من ٩٠% من أنشطتهم اليومية بداخل حيزات المبني[١٢]. لذلك، تُعد الراحة الحرارية مُتطلب ضروري لابد من توفيره ليس فقط من أجل الحفاظ على صحة المُستخدمين بالداخل ولكن أيضاً لزيادة قدرتهم الإنتاجية في العمل بكفاءة وفعالية. وتُعرف **الراحة الحرارية** بأنها **"هي الحالة الذهنية التى تُعبر عن مدي رضا المُستخدمين فيما يخص البيئة الحرارية بداخل المبني"**. وفقاً لفانجر، لا تعتمد الراحة الحرارية فقط على درجة حرارة الهواء الداخلي ولكنها تتأثر أيضاً بكُل من الرطوبة النسبية للهواء، مُتوسط درجة الحرارة المُشعة، سُرعة الهواء والملابس الشخصية ومُستوي النشاط المؤدى من قبل الفرد و/أو الأفراد[١٣]، وهو ما يُشير إلي مدي تأثير غُلاف المبني على الراحة الحرارية الداخلية فيما يُسمي بـ **"درجة الحرارة الفعالة *OT*"**. وتُمثل **درجة الحرارة الفعالة *OT*** (°م) كونها **"درجة الحرارة التى يشعر بها قاطنى الحيزات الداخلية للمبني"**، والتى تُحتسب بأنها هي مُتوسط قيمتى درجة حرارة الهواء الداخلي T_a (°م) ودرجة الحرارة المُشعة T_r (°م)، كما هو موضح في (**المُعادلة ١**)[١٤]:

$$OT = \frac{T_a+\overline{T}_r}{2} \quad \text{(مُعادلة ١)}$$

تُطبق هذة المُعادلة في حالة مُمارسة الأفراد بداخل الحيزات لنشاط بدنى طبيعي بمُعدلات تمثيل غذائي تتراوح بين ١ و١،٣ تحت ضوء الشمس غير المُباشر وفي حالة عدم التعرض لسرعة هواء تزيد عن ٠،٢ م/ث. ويُعتبر **مُتوسط درجة الحرارة المُشعة** $\overline{T_r}$ هو **"التبادل الإشعاعي بين قاطنى الحيزات الداخلية والبيئة المُحيطة"**، حيث تُستخدم (**المُعادلة ٢**) لتحديد قيمة درجة الحرارة المُشعة[١٣]:

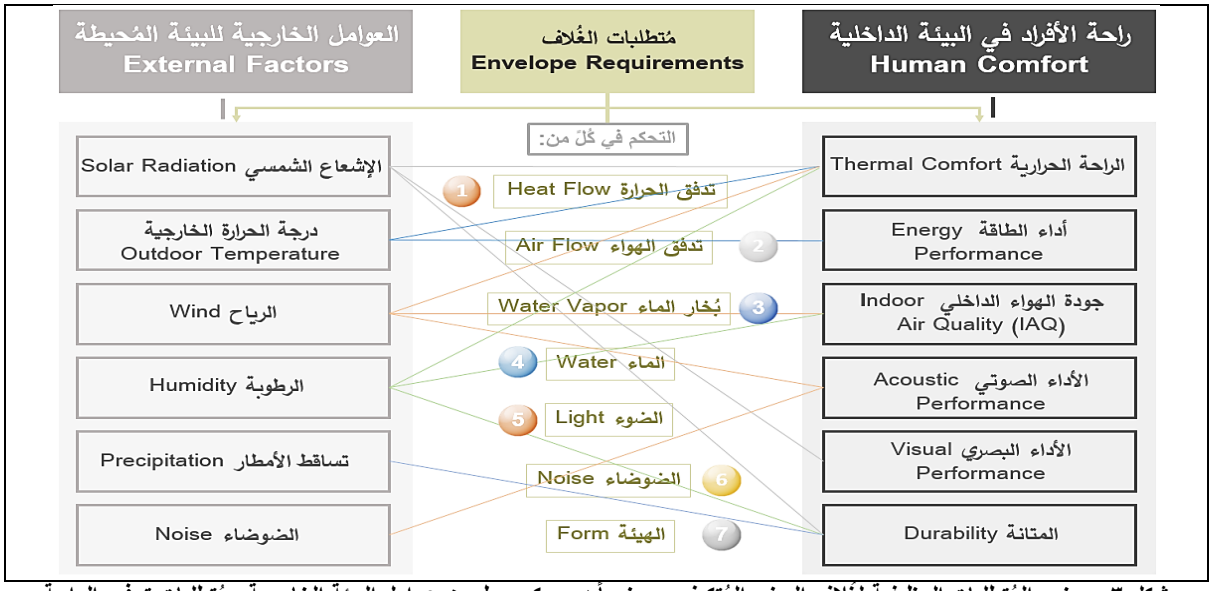
$$\overline{T_r} = \frac{T_1A_1+T_2A_2+\cdots+T_nA_n}{A_1+A_2+\cdots+A_n} \quad \text{(مُعادلة ٢)}$$

حيث أن: T_1، T_2 وT_n تُشير إلي درجات حرارة الأسطُح بداخل الغرفة (°م) على التوالي، بينما يُرمز إلي مساحة كل سطح من أسطُح الغُرفة بـالرمز A_1، A_2، A_n (م٢).

١-١-٢. الصياغة المُتقدمة لواجهات المباني: الإنتقال الفكري من الأغلفة التقليدية إلي الأغلفة التكيُفية الحية.

شهدت العمارة في النصف الثاني من القرن العشرين فترة من الإبتكار التقني الذي كان له مردود واضح في تصميم أغلفة المباني حيث تم تقديم أشكالاً مُعقدة، فضلاً عن تطويع العديد من الخامات الصلدة وإدراجها ضمن قائمة الخامات الإنشائية وذلك بفضل إدخال التكنولوجيا الرقمية والتقنيات الحاسوبية في عمليات التصميم والتصنيع. ولكن نتج عن الإهتمام المُتزايد بالقضايا الشكلية والجمالية لأغلفة المباني إهمال المهندسين المعماريين للأداء التشغيلي لها من منظور الطاقة حيث تم الإستناد في توفير الراحة الحرارية بداخل المباني على الأنظمة الميكانيكية لتعويض إضطراب البيئة الحرارية الداخلية الناتج عن الإستخدام العشوائي للأسطح الزُجاجية في الواجهات[٣]. إلا أن الطلب المُتزايدة على الطاقة والحاجة المُستمرة لتوفير جودة البيئة الداخلية دفع المُصممين نحو مفاهيم تصميمية جديدة لأغلفة المباني، مما ساهم في تسارع المُمارسات المُبتكرة التى تُناشد نحو تفعيل مباديء الإستدامة من خلال تعزيز مبدأ التكيف والإستجابة لمُتغيرات البيئة، وذلك ضمن نظام هجين يجمع بين التكامل والتحكم الذكي بهدف تقديم جيل جديد من الأغلفة التكيُفية.[٣][١٥]

حيث يتمثل هذا الجيل المُبتكر في تقديم نموذج مُحسن من الأغلفة قادرة على تبادل عناصر المُناخ بين الخارج والداخل بطريقة ذكية تُحقق الراحة الداخلية وفقاً للمُعطيات البيئية (**الشكل ٣**)[١٦]. وعادةً ما تستند تلك الأغلفة التكيُفية على تكنولوجيات وتقنيات مُستجيبة بيئياً مثل المواد التكيُفية التى تُناظر الأنظمة البيولوجية في أدائها السلوكي المُتكيف والمُتفاعل مع الضغوط الخارجية المُعادية، وذلك لتوفير الحماية المُتكاملة للنظام.[١٧]



شكل ٣. يوضح المُتطلبات الوظيفية لغلاف المبني المُتكيف، موضحاً دوره كوسيط بين عوامل البيئة الخارجية ومُتطلبات توفير الراحة للأفراد في البيئة الداخلية – (المصدر: إيليني وآخرون، ٢٠١٦م[١٦]).

أما من منظور تصميم الأغلفة التكيُفية الحية، فقد إستُخدمت تقنيات ومواد تتفاعل مع المُحفزات البيئية بطريقة عضوية سلبية[١٨]؛ تُناظر الأداء السلوكي للكائن الحي وتكون قادرة على تغير وظائفها وخصائصها خلال فترة زمنية مُحددة بهدف الإستجابة مع الظروف البيئية المُتغيرة ولتحسين أداء المبني بشكل عام. لذلك، توجهت العديد من الدراسات المُتقدمة نحو تخليق مواد تُحاكي سلوك الكائنات الحية في تفاعلها مع البيئة؛ تتسم بالديناميكية الضمنية والتكيف الذاتي بدون الحاجة إلي مُشغلات ميكانيكية تستنفذ المزيد من الطاقة الكهربائية لتشغيلها. وبالتالي لم تعد المواد التقليدية ذات الخصائص الثابتة كفيلة بتلبية مُتطلبات الأغلفة التكيفية الحية، بل يجب أن تُستخدم مواد مُتقدمة تكون أكثر قُدرة على تحقيق الوظائف المرجوة بشكل أكثر ديناميكية وإنتقائية.[١٩]

١-١-٣. التقنيات المُتقدمة لخفض الأحمال الحرارية في غُلاف المبني.

في ضوء ما سبق، نجد أن غُلاف المبني يُمثل الحل الأمثل الذي من خلاله يُمكن تقليل إستهلاك الطاقة[٢٠]. ومن أجل تصميم أغلفة تكيفية كان لابد من طرح مجموعة من الحلول المُتقدمة التى تحث على تقليل إستهلاك الطاقة بخلاف الحلول التقليدية[٢٠]؛ ففي وقتنا الحالي توجد العديد من التقنيات والمواد المُتقدمة التى أظهرت تحسينات مُلحوظة في تقليل أحمال التدفئة والتبريد فضلاً عن تحسين الأداء الحراري لغُلاف المبني ومن ثم التحكم في مقدار إستهلاك المبني للطاقة، فقد يصل خفض إستهلاك طاقة المبني عند تطبيق تلك التقنيات إلي ٢٠% مُقارنة بنظائرها التقليدية[٢١]. من أكثر تلك التقنيات المُستخدمة في تحسين أداء المبني حرارياً هي: تقنية التنشيط الحراري للمبني (أو **المباني النشطة حرارياً TABS**) و**أنظمة تخزين الطاقة الحرارية TES**.

١-١-٣-١. أنظمة تخزين الطاقة الحرارية.

تُمثل أنظمة تخزين الطاقة الحرارية دوراً فعالاً في الحفاظ على الطاقة بشكل مُستدام، حيث تسمح بتخزين كميات مُحددة من الطاقة الحرارية الزائدة المُجمعة خلال ساعات سطوع الشمس كي يتم إطلاقها أثناء الليل[٢٢]. وتستند أنظمة تخزين الطاقة الحرارية على الدورات الإنتقالية لأطوار المواد بين التسخين (الصهر) والتبريد (التصلب). تُصنف أنظمة تخزين الطاقة الحرارية وفقاً لطبيعة العمليات المؤثرة على وسط التخزين إلي فئتين رئيسيتين، هُما: التخزين **الكيميائي** والتخزين **الفيزيائي** الذي يُصنف إلي: أنظمة تخزين الحرارة المحسوسة، أنظمة تخزين الحرارة الكامنة (**جدول ١**).[٢٣-٢٤]

أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TESSs) Thermal Energy Storage Systems		
١. تخزين الطاقة الحرارية فيزيائياً		٢. تخزين الطاقة الحرارية كيميائياً
أ. تخزين الحرارة المحسوسة (SHSSs)	ب. تخزين الحرارة الكامنة (LHSSs)	
يتم تخزين الطاقة على شكل طاقة داخلية عن طريق رفع درجة حرارة وسط التخزين بدون حدوث تغيير في الطور. تعتمد الطاقة الحرارية المُخزنة على كُل من: الحرارة النوعية للمادة، كمية المواد المُستخدمة، ودرجة حرارتها. تتسم تلك الأنظمة بالبساطة في التصميم، إنخفاض التكلفة، سهولة صيانتها ... سريعة الشحن والتفريغ. تتطلب تلك الأنظمة حاويات كبيرة الحجم للتخزين، كما أن لديها كثافة	يتم تخزين الطاقة من خلال تغيير الطور عند درجة حرارة ثابتة (ضمن نطاق حراري محدود). تعتمد الطاقة الحرارية المُخزنة على الكتلة والحرارة الكامنة للإنصهار. تعتبر أنظمة مُعقدة في تصميمها ومُرتفعة التكلفة ... تستغرق عملية الشحن والتفريغ وقتاً طويلاً. تُخزن طاقة أكثر بعشر مرات من أنظمة تخزين الحرارة المحسوسة وهي فعالة بحوالي	يتم **تخزين الطاقة الحرارية الكيميائية** عن طريق كسر وتشكيل الروابط الجزيئية للمادة (وسط التخزين). يعتمد تخزين الطاقة الحرارية الكيميائية على العمليات الكيميائية القابلة للعكس فيما بين المواد الحرارية الكيميائية TCM، كما في (**المُعادلة ٣**).[٢٥] $A + Heat \leftrightarrow B + C$ (**مُعادلة ٣**) تُخزن المادة الحرارة من خلال عملية إمتصاص الطاقة الحرارية Endothermic ، حتى يتم فرض العملية العكسية الطاردة للحرارة Exothermic. يُعتبر تخزين الطاقة الحرارية الكيميائية مُناسب للتخزين طويل الأجل أو التخزين الموسمي حيث

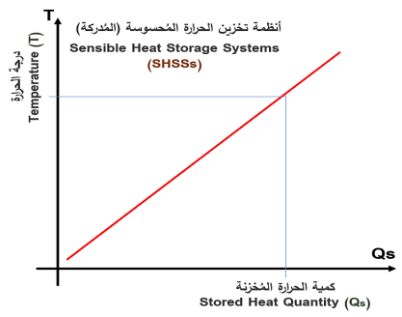
تخزين طاقة أقل مُقارنةً بأنظمة تخزين الحرارة الكامنة.	٧٥-٩٠%. تتميز بكثافة تخزين طاقة حرارية أعلى.	الإحتفاظ بالحرارة خلال فصل الصيف لإستخدامها في فصل الشتاء.

أ. أنظمة تخزين الحرارة المحسوسة Sensible Heat Storage Systems (SHSSs)

تُعرف **الحرارة المحسوسة (المُدركة)** بأنها **"هي الحرارة المنقولة إلى وسط التخزين والتى تؤدي إلى زيادة درجة حرارته"**، أي هي كمية الطاقة المُخزنة عندما يزيد كل كيلو جرام واحد من المواد درجة حرارة واحدة[٢٦]؛ تُحتسب قيمتها من خلال تطبيق **(المُعادلة ٤)**.[٢٦]

$$Q_s = m \times C_p \times \Delta T \quad \textbf{(مُعادلة ٤)}$$

حيث أن: Q_s تُمثل كمية الحرارة المحسوسة المُخزنة (جول)، m تُشير إلي كُتلة مادة التخزين (كجم)، C_P ترمز إلي الحرارة النوعية لمادة التخزين و ΔT ترمز إلي التغير الحادث في درجة الحرارة (كلفن). يتحقق التخزين الحراري المُحسوس عندما تتغير درجة حرارة وسط التخزين بدون حدوث تغير في الأطوار الإنتقالية للمادة، تعتمد كمية الحرارة التى يُمكن للأنظمة تخزينها على كُل من: إختلاف درجة الحرارة، كُتلة وسط التخزين والسعة الحرارية للمادة.**(الشكل ٤)**



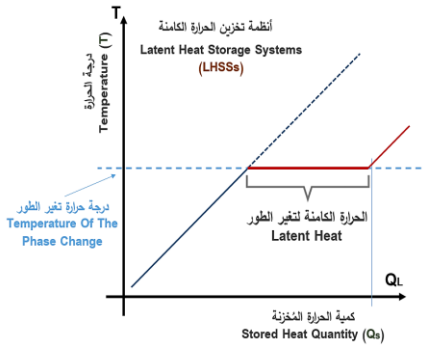
شكل ٤. يوضح العلاقة الطردية بين كثافة الطاقة المُخزنة والتغير الحادث في درجة حرارة المادة أثناء عملية الشحن والتفريغ – **(المصدر:** موروجانانثام، كارثيك، ٢٠١٠م[٢٦])

ب. أنظمة تخزين الحرارة الكامنة Latent Heat Storage Systems (LHSSs)

تُعرف **الحرارة الكامنة** بأنها **"هي كمية الطاقة المُخزنة عندما يتغير كيلو جرام واحد من المادة في الطور دون تغير كبير في درجة الحرارة"**. يعتمد التخزين الحراري الكامن علي إمتصاص الحرارة أو إطلاقها عندما تخضع مادة التخزين لتغير في الطور. في حالة المواد مُتغيرة الطور (من الصلب إلي السائل) تُساوي الحرارة الكامنة المُخزنة فرق المُحتوي الحراري بين الطور الصلب والسائل للمادة، كما هو موضح في **(المُعادلة ٥)**.[٢٥]

$$\Delta Q_l = \Delta H = m \times \Delta H \quad \textbf{(مُعادلة ٥)}$$

حيث أن: Q_l تُمثل كمية الحرارة الكامنة المُخزنة (جول)، تُمثل ΔH فرق المُحتوي الحراري للمادة عند تغير الطور من الصلب إلي السائل والعكس. يتحقق التخزين الحراري الكامن عندما تُغير أوساط التخزين أطوارها بهدف تخزين كميات كبيرة من الطاقة في صورة كامنة عند درجة حرارة ثابتة نسبياً.**(الشكل ٥)**



شكل ٥. يوضح ثبات الطاقة الحرارية المُخزنة عند تغير طور المادة من حالة إلي أُخري. **(المصدر:** موروجانانثام، كارثيك، ٢٠١٠م[٢٦])

جدول ١. يوضح أنظمة تخزين الطاقة الحرارية القابلة للتطبيق في أغلفة المباني، موضحاً الفرق بين أنظمة التخزين الحرارية المحسوسة والكامنة – **(المصدر:** جاداف وآخرون، ٢٠٢١م[٢٣]).

١-١-٢-٣. مواد تخزين الطاقة الحرارية الكامنة.

تُسمي المواد التى تستخدم لتخزين الطاقة الحرارية الكامنة بإسم المواد مُتغيرة الطور PCMs أو مواد تخزين الحرارة الكامنة LHSMs[٢٣-٢٧]. وتستند أوساط تخزين الحرارة الكامنة على عمليات التصلب والذوبان الدورية، حيث تُخزن الطاقة الحرارية أثناء إنتقال طور المادة من الصلب إلي السائل (دورة الذوبان) كي يتم إطلاقها أثناء الإنتقال الطوري من السائل إلي الصلب (دورة التصلب)؛ إذن ترتبط الطاقة الحرارية المُخزنة بتغير طور وسط التخزين[٢٤]. تُستخدم (**المُعادلة ٦**) لحساب كمية الطاقة المُخزنة بداخل وسط التخزين الكامن (المادة مُتغيرة الطور)[٢٣-٢٤]:

$$Q_{latent} = \int_{T_1}^{T_{pcm}} (m.C_{p.s}.dT) + m.H_{latent} + \int_{T_{pcm}}^{T_2} (m.C_{p.l}.dT) \quad \textbf{(مُعادلة ٦)}$$

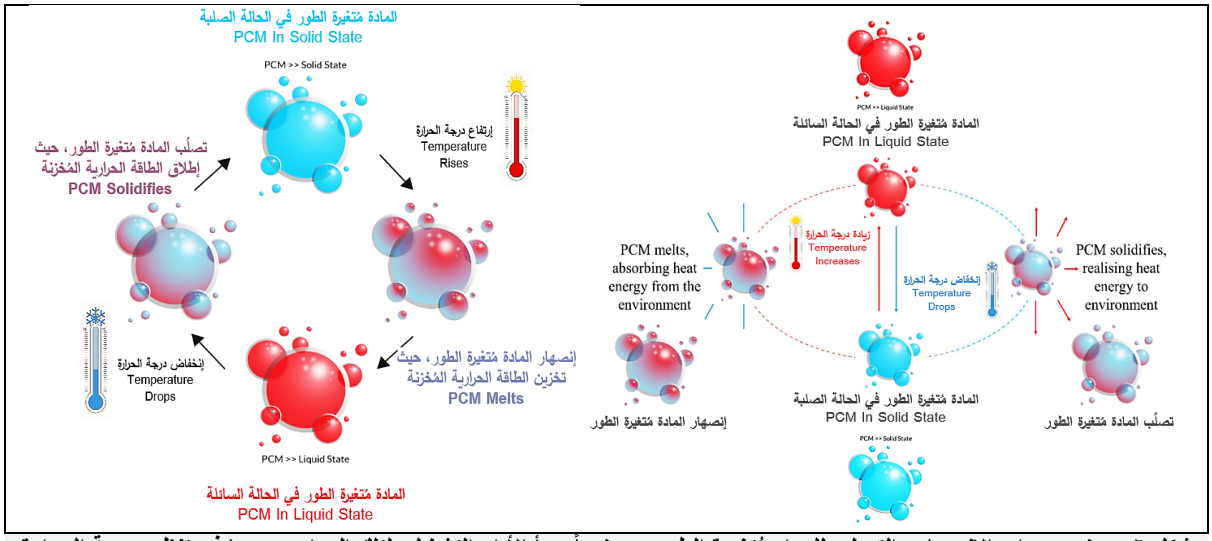
حيث أن: Q_{latent} هي الحرارة الكامنة المُخزنة بداخل وسط التخزين، $C_{p.s}$ و$C_{p.l}$ تُشير إلي الحرارة النوعية لوسط التخزين في الحالة الصلبة والسائلة على التوالي، بينما يُرمز H_{latent} إلي المُحتوي الحراري لإنصهار وسط التخزين عند درجة حرارة تغير الطور T_{pcm}.

١-٢. المواد مُتغيرة الطور.

١-٢-١. مفهوم المواد مُتغيرة الطور.

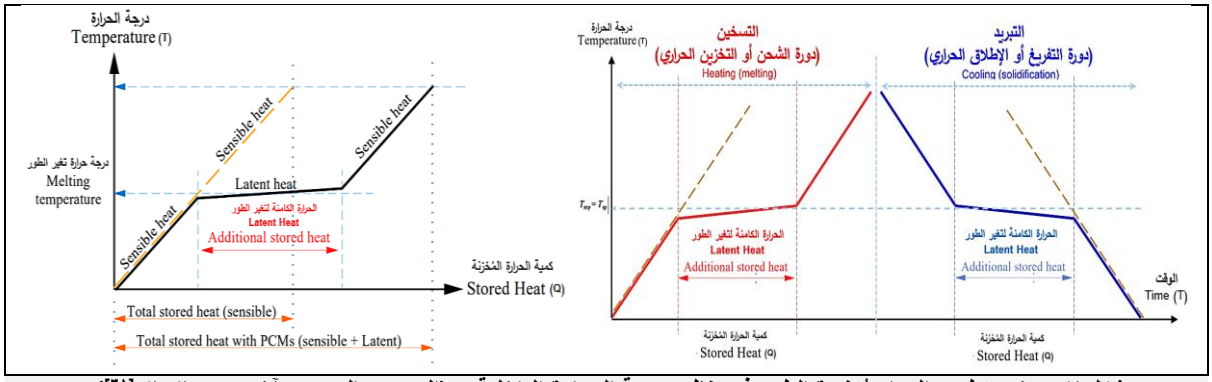
يُعرف الطور بأنه "هو مُجموعة من حالات نظام المادة التى له تركيب كيميائي وخصائص فيزيائية موحدة نسبياً، مثل الكثافة، الترتيب البلوري، مُعامل الإنكسار ..."، بينما يُعرف تغيير الطور بأنه "هو تحول النظام الديناميكي الحراري للمادة من حالة إلي أُخري ذات تركيب كيميائي وخواص فيزيائية مُختلفة نسبياً"[٢٧]. تُعرف المواد مُتغيرة الطور Phase Change Materials (PCMs) بأنها "**هي فئة من المواد الوظيفية المُتميزة بدرجة حرارة إنصهار عالية بحيث يُمكنها أن تنصهر وتتصلب خلال نطاق حراري مُحدد، ومن ثم فهي قادرة على إمتصاص، تخزين وإطلاق كميات كبيرة من الطاقة الحرارية أثناء تغيير طورها (من الحالة الصلبة إلي الحالة السائلة والعكس) في صورة حرارة كامنة**"[٢٨-٣٠].

يستند مبدأ الأداء التشغيلي للمواد مُتغيرة الطور على تنظيم درجة الحرارة المُحيطة ضمن نطاق حراري قريب من درجة حرارة الإنتقال الطوري لها، وذلك من خلال دورات الإنصهار والتصلب (الشحن والتفريغ). عندما تزيد درجة الحرارة المُحيطة بالمادة عن درجة حرارة إنصهارها تتفكك الروابط الكيميائية في المادة مما يتسبب في إمتصاص المادة للحرارة الزائدة أثناء تغير طورها من الصلب للسائل، وبمجرد إنخفاض درجة الحرارة المُحيطة عن درجة حرارة التجمد للمادة تقوم المادة بتفريغ الطاقة المُخزنة بداخلها كي تعود إلي الحالة الصلبة، كما هو موضح في (**الشكل ٦**).[٣١-٣٢]



شكل ٦. يوضح دورات الإنصهار والتصلب للمواد مُتغيرة الطور، موضحاً مبدأ الأداء التشغيلي لتلك المواد ودورها في تنظيم درجة الحرارة الداخلية ضمن نطاق حراري مُحدد – (المصدر: فريجوني وآخرون، ٢٠١٩م[٢٤]).

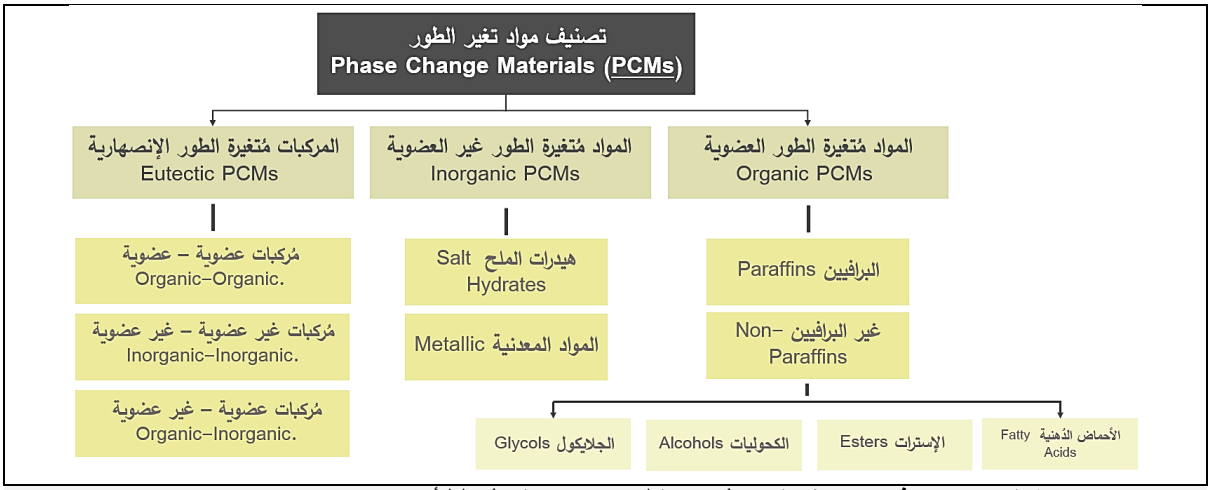
وفقاً للأداء التشغيلي للمواد مُتغيرة الطور، نجد أن لديها القُدرة على إدارة الطاقة عن طريق تخزين الحرارة أثناء مرحلة الإنصهار وإطلاقها أثناء مرحلة التصلب، وبالتالي عندما تتطابق درجات حرارة الإنتقال الطوري للمادة مع درجة حرارة الراحة المطلوبة بداخل حيزات المبني؛ فيُمكن لتلك المواد أن تُساهم في الحفاظ على البيئة الحرارية الداخلية ضمن نطاق حراري مُريح للأفراد بالداخل ومن ثم تقليل أحمال التدفئة و/أو التبريد.[٣٣-٣٤] يوضح (**الشكل ٧**) قُدرة مواد تغيير الطور على تحسين البيئة الداخلية للمبنى عن طريق تقليل قمم درجات الحرارة وضبط التقلبات الحرارية في الأماكن المُغلقة، مما يؤدي إلي رفع كفاءة أداء المبني حرارياً.[٣١]



شكل ٧. يوضح تطبيق المواد مُتغيرة الطور في تنظيم درجة الحرارة الداخلية – (المصدر: العبسي وآخرون، ٢٠٢٠م[٣١]).

١-٢-٢. تصنيفات وخصائص المواد مُتغيرة الطور.

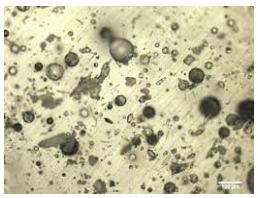
بشكل عام، يتمثل تغيير الطور للمواد في أربعة أنواع: (صلب - صلب)، (صلب - سائل)، (صلب - غاز) و(سائل -غاز). عادةً ما تُطبق المواد مُتغيرة الطور (صلب - سائل) في قطاع المباني بسبب التغيير الحجمي الصغير، ولكونها لا تتطلب كمية كبيرة من المادة لتخزين كمية مُحددة من الطاقة، فضلاً عن الثبات الحراري[٣١]. تُصنف المواد مُتغيرة الطور وفقاً لتركيبها الكيميائي إلي ثلاث فئات رئيسية، هُم: المواد العضوية، المواد غير العضوية والمُركبات الإنصهارية. يُمكن تقسيم كل فئة رئيسية إلي فئات فرعية وفقاً لمُكوناتها، كما هو موضح في (**الشكل ٨**).[٣١-٣٥]



شكل ٨. يوضح فئات تصنيف المواد مُتغيرة الطور بالإستناد إلي مُخطط أبهات Abhat`s Scheme.
(المصدر: العبسي وآخرون، ٢٠٢٠م[٣١]).

تتميز كل فئة من الفئات الثلاثة بدرجات حرارة تشغيل مُميزة وخصائص فيزيائية حرارية فريدة تُميزها عن غيرها، وبالتالي تكون لكل فئة تطبيقات مُعينة ملائمة مع خصائصها الفيزيائية. يعرض **(جدول ٢)** الخصائص المُشتركة للفئات الثلاثة، موضحاً مزاياهم وعيوبهم الرئيسية.

مزايا وعيوب فئات المواد مُتغيرة الطور

الفئات Categories	المزايا ADVANTAGES	العيوب DISADVANTAGE
المواد مُتغيرة الطور العضوية Organic	تتوافر ضمن نطاق حراري كبير – يُمكن تصنيعها بكميات كبيرة - يُمكن إستخدامها في نطاق درجات حرارة كبير نسبياً - نادراً ما يحدث لها تبريد فرعي – لديهم فصل طوري صغير نسبياً - مُستقرة كيميائياً أثناء الدورات الحرارية المُتكررة (فضلاً عن تحقيق الإستقرار في درجات الحرارة العالية التى تصل إلي ٥٠٠°م) - قابلة لإعادة التدوير - التوافق الجيد مع مواد البناء الأُخرى التقليدية – القُدرة على الذوبان بشكل مُتطابق - آمنة غير ضارة وغير مُتفاعلة أو مؤثرة على البيئة سلبياً وغير قابلة للتآكل.	ذات توصيل حراري مُنخفض - التغيير الحجمي أثناء إنتقالات الطور - قابلة للإشتعال في بعض الأحيان – مُكلفة نسبياً – ذات سعة تخزين مُنخفضة الحجم – تتطلب مُعدلات نقل الحرارة عالية أثناء دورة التصلب – غير مُتوافقة مع المواد البلاستيكية (الحاويات/العبوات البلاستيكية) – ذات كثافة مُنخفضة.
المواد مُتغيرة الطور غير العضوية Inorganic 	ذات حرارة كامنة عالية لكل وحدة حجم - غير قابلة للإشتعال – ذات قُدرة تخزين عالية للحرارة الكامنة - غير مُكلفة ومُتوفرة بسهولة – ذات درجة حرارة إنصهار حادة – ذات توصيل حراري عالي – نطاق تغيير حجم مُنخفض خلال المراحل الإنتقالية للطور - ذات تكلفة مُنخفضة – مُتوافقة مع الحاويات البلاستيكية – يُحتمل إعادة تدويرها - مُتوافقة مع	التبريد الفرعي يُعد مُشكلة رئيسية في الإنتقال الطوري من الحالة السائلة إلي الحالة الصلبة – الفصل الطوري ومشاكل الإستقرار الحراري – متانة مُنخفضة – قابلة للتحلل وسامة في بعض الأحيان –

	درجات حرارة الراحة المطلوبة لتطبيقات البناء (بين ١٥- ٧٠ درجة مئوية).	غير مُتوافقة مع بعض مواد البناء والحاويات الداعمة.
المُركبات الإنصهارية Eutectic PCMs	ذات درجة إنصهار حادة – ذات كثافة تخزين حرارية عالية مُقارنةً بالمُركبات العضوية – لا يوجد فصل أو تطابق أثناء تغير الحجم.	نُدرة الإختبارات لرصد الخصائص الفيزيائية الحرارية لها – بعض المخاليط الإنصهارية لديها رائحة نفاذة وبالتالي لا يُنصح بإستخدامها في التطبيقات المعمارية (خاصةً ألواح الحوائط).

جدول ٢. يوضح مُقارنة بين فئات المواد مُتغيرة الطور الثلاثة من حيث مزايا وعيوب كل فئة، موضحاً خصائص كل فئة – (المصدر: جاداف وآخرون، ٢٠٢١م[٢٣]).

من خلال الجدول السابق، نجد أن لكل فئة من فئات المواد مُتغيرة الطور عيوب تُحد من كفاءتها على مدار العمر التشغيلي لها بداخل عناصر غُلاف المبنى، ومن أجل حل تلك المُشكلات التشغيلية لكافة فئات المواد مُتغيرة الطور كان لابد من وضعها ضمن نظام مُحكم يتضمن **مواد مُضافة (مواد إضافية)** للتغلب على تلك العيوب وذلك للتوصل إلى أفضل كفاءة تشغيلية. فعلي سبيل المثال من أجل التعامل مع عيوب المواد مُتغيرة الطور العضوية في كونها قابلة للإشتعال فيُمكن إضافة مُثبطات للحريق كوسيلة لتقليل تلك الآثار السلبية وذلك عن طريق إضافة الأمونيوم متعدد الفوسفات Ammonium Polyphosphate (AP)، هيدروكسيد الألومنيوم Aluminum Hydroxide، بنتاريريثريتول (رباعي نترات خماسي ايريثريتول) Pentaerythritol والجرافيت المُتمدد Expanded Graphite (EC). نستشهد على ذلك بأن دراسة سيتيسارت وفريد (عام ٢٠١١م) أثبتت أن إضافة مزيج من (AP+EC) إلي مادة البارفيين مُتغيرة الطور أدى إلي تحسين خواصها التشغيلية وتحويلها إلي مواد ذاتية الإطفاء.

وبالتالي يُمكن إستخدام جميع فئات المواد مُتغيرة الطور في تحسين كفاءة الأداء الحراري لغُلاف المبنى ولكن لابد أن تُدرج تلك المواد مُتغيرة الطور ضمن نظام مُتكامل يتضمن مجموعة من المواد المُضافة وذلك بهدف التصدي لعيوب كل فئة من تلك الفئات. إلا أن أكثر تلك الفئات قابلية للتطبيق في العناصر المُختلفة لغلاف المبنى هي فئة المواد مُتغيرة الطور العضوية Organic PCMs وذلك لتعدد مزاياها ولقابلية تحسين خواصها أو لإمكانية التغلب على عيوبها.

أما بالتطرق إلي تكلفة تلك الفئة من المواد مُتغيرة الطور العضوية يصعُب رصد قيمة مُحددة لها نظراً لكونها تعمل ضمن نظام مُتكامل يتضمن مجموعة من المُواد المُركبة المُضافة لتحسين خواصها التشغيلية كما سبق ذكره. إلا أن المواد مُتغيرة الطور العضوية في صورتها الخام تُعد رخيصة نسبياً حيث يُكلف شمع البارافيين حوالي ٢ دولار أمريكي/كجم، أما الأحماض الدهنية فتتراوح تكلفتها ما بين ٠،٢٢ إلي ١،٧٦ دولار أمريكي/كجم، بينما تبلغ تكلفة مادة الإيكوسان الخام حوالي ٥٤ دولار أمريكي/كجم. أما من منظور الجدوى المالية لتثبيت نظام مُتكامل من المواد مُتغيرة الطور، فعلي سبيل المثال فقد رصد موقع الطاقة الشمسية في المملكة المتحدة (عام ٢٠١٧م) تكلفة تثبيت نظام المواد مُتغيرة الطور في منزل سكنى بالمملكة المُتحدة بحوالي ٥٠٠٠ جنية إسترليني وذلك لضمان أفضل أداء تشغيلي يدوم لخمسة وعشرين عام.

١-٢-٣. المعايير القياسية لإختيار المواد مُتغيرة الطور المُثلى.

يتوقف إختيار المادة مُتغيرة الطور المُثالية أو الأنسب في التطبيق على مجموعة واسعة من الخصائص والمُتطلبات التى يجب تلبيتها، بما في ذلك الخصائص الديناميكية الحرارية، الخصائص الكيميائية، الخصائص الحركية، الخصائص التقنية والخصائص الإقتصادية[٢٣-٢٧][٣٦-٣٧][٣٨] **(جدول ٣)**. بينما تنحصر المعايير القياسية لإختيار أنسب المواد مُتغيرة الطور للتطبيق بداخل عناصر غُلاف المبني في كُل من: السلوك الحراري، كثافة الطاقة وسعة التخزين، التكاليف، الأمان، التأثير البيئي، المتانة والسلامة الهيكلية.[١٦][٤٠][٤١]

مُتطلبات إختيار أنسب المواد مُتغيرة الطور			
١. الحرارية	**٢. الكيميائية**	**٣. الحركية**	**٤. التقنية والإقتصادية**
درجة الحرارة الإنتقالية: يجب أن تكون ضمن درجة حرارة التشغيل – تتحدد وفقاً لمُتطلبات الراحة الحرارية الداخلية – يجب أن تكون قريبة من مُتوسط درجة حرارة الغرفة. **التوصيل الحراري (الموصلية الحرارية):** يجب أن تكون ذات موصلية حرارية جيدة في حالة تخزين الطاقة، بينما تنخفض الموصلية الحرارية لتطبيق العزل الحراري. **إرتفاع الحرارة الكامنة للإنصهار.** **الإستقرار المادي مع تغيرات طفيفة في الحجم - سلوك الإنصهار والتصلب الثابت.**	**إستقرار كيميائي طويل الأمد:** ثبات مُستقر في دورات الصهر والتصلب مع عدم وجود تدهور بعد دورات الذوبان/التصلب المُتكررة. **دورة ذوبان/تجمد قابلة للعكس كاملة.** **غير قابلة للتآكل - غير قابلة للإشتعال -غير مُتفجرة - غير سامة.**	**التبريد الفائق (التبريد الفرعي):** عدم وجود تبريد فائق أو نادراً ما يحدث (يميل إلى التبريد الفائق تحت درجة حرارة الانصهار قبل أن يبدأ في التصلب). **إرتفاع مُعدل التبلور.**	قابلية التطبيق وتتسم بكُل من: البساطة والفعالية والتوافق مع المواد الأخرى والجدوى. **متوفرة على نطاق واسع.** **ذات تكلفة مُنخفضة.**
	٥. المُتطلبات البيئية	**غير مؤثرة سلبياً على البيئة أو ذات تأثير بيئي مُنخفض طوال العُمر التشغيلي لها - إمكانية إعادة تدويرها (أي قابلة لإعادة التدوير).**	

جدول ٣. يوضح المُتطلبات الواجب توافرها في المواد مُتغيرة الطور لإختيار أكثر تلك المواد مُلائمة للتطبيقات المعمارية – (المصدر: فريجوني وآخرون، ٢٠١٩م[٢٤]) (المصدر: سواريس، نيلسون ميجيل لوبيز، ٢٠١٩م[٣٩]).

١-٣. تقنيات دمج المواد مُتغيرة الطور في أغلفة المباني.

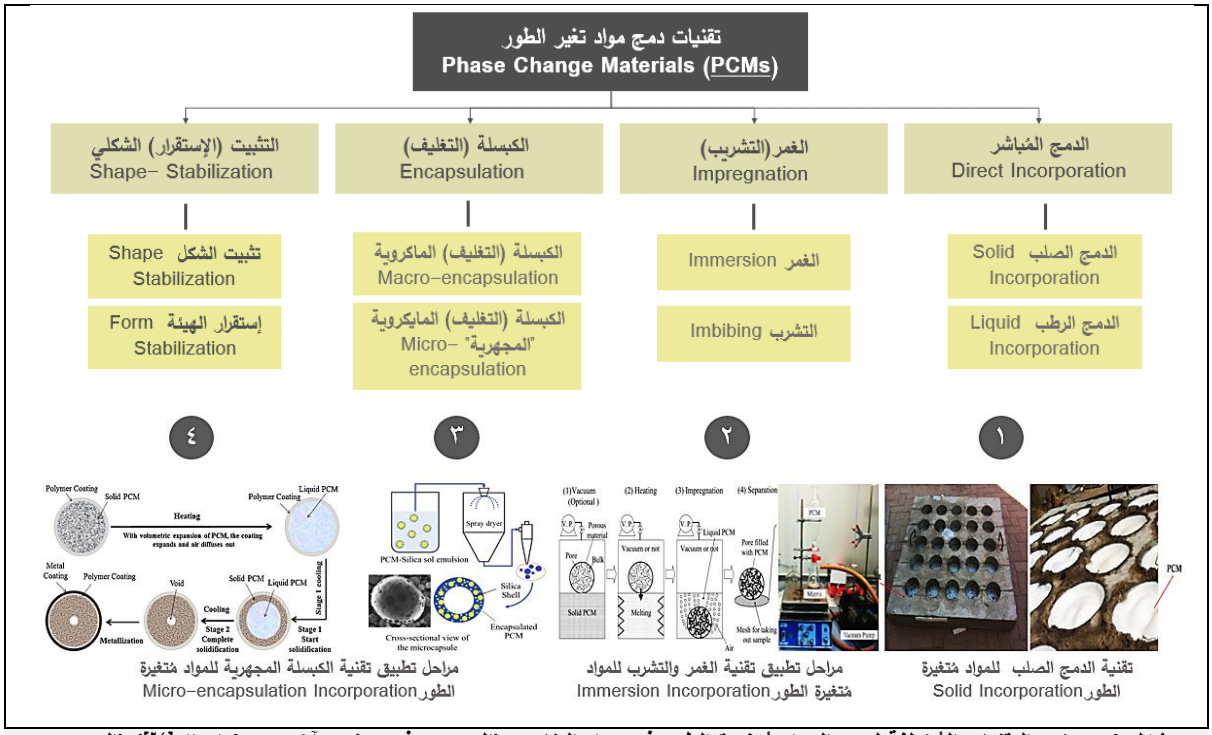
للمواد مُتغيرة الطور تأثيراً جذرياً في تعزيز الكُتلة الحرارية للمبنى ومن ثم رفع كفاءة أداء المبني حرارياً. فعادةً ما يتم تطبيق المواد مُتغيرة الطور في غُلاف المبني لتكون جُزءاً لايتجزأ من مواد البناء كي تضمن أقصي إستفادة من إمكانات تخزين الحرارة. وفقاً لدراسة هاوز،١٩٩٣م ودراسة كينيسارين، ٢٠١٦م، يجب أن تستوفي مواد البناء المُستضيفة للمواد مُتغيرة الطور الشروط التالية : تُستخدم على نطاق واسع في البنية الهيكلية للمبني، تمتلك سطح تلامس كبير يُعزز نقل الحرارة، تمتلك عمق صغير للتبادل الحراري، تُساعد هندستها وهيكلها على العمل كقناة حرارية في إستغلال وتحسين وظيفة

الخزانات الحرارية والمبادلات الحرارية، يسهل بناء هياكل لإختبارها وتكون قادرة على الإحتفاظ بالمواد مُتغيرة الطور وهي في الحالة السائلة.

١-٣-١. تقنيات دمج المواد مُتغيرة الطور في عناصر غُلاف المبني ومواد البناء المُختلفة.

تعددت تقنيات دمج أنظمة المواد مُتغيرة الطور في غُلاف المبني ومواد البناء، حيث تُصنف هذة التقنيات إلي الدمج المُباشر، الغمر أو التشريب، التغليف أو الكبسلة، وتثبيت أو إستقرار الشكل [٢٤][٤٠] (**الشكل ٩**).

في حالة الدمج المباشر، يتم إضافة المواد مُتغيرة الطور مباشرةً إلى عناصر أو مواد البناء، بينما في حالة تقنية الغمر، يتم غمر مواد البناء في المواد مُتغيرة الطور السائلة مما يسمح بالإمتصاص عن طريق الخاصية الشعرية. على الرغم من أن كلتا التقنيتين إقتصاديتان وعمليتان، إلا أن تسرب مواد تغير الطور والقابلية للإشتعال وعدم التوافق مع مواد البناء هي العوائق الرئيسية لهذه التقنيات. تتضمن تقنية التغليف أو الكبسلة أنواع مُختلفة سواء التغليف بشكل كُلي (عياني) أو والتغليف المجهري الدقيق والتغليف الأدق بمقياس النانو. في التغليف الكُلي، يتم تعبئة المادة مُتغيرة الطور في أنواع مختلفة من الحاويات (مثل: الأنابيب، والألواح ...)، أما في حالة التغليف الجزيئي (المجهري) والتغليف بمقياس النانو، يتم وضع جُسيمات المادة مُتغيرة الطور في مغلف رقيق (يتراوح ما بين ١٠٠٠ و١ ميكرومتر للكبسولات الدقيقة المجهرية وأقل من ١٠٠٠ نانومتر للكبسولات النانوية). وأخيرًا، يعني تثبيت الشكل للمواد مُتغيرة الطور بأنها مُدمجة في بنية مسامية داعمة مثل البولي إيثيلين عالي الكثافة.



شكل ٩. يوضح التقنيات المُختلفة لدمج المواد مُتغيرة الطور في مواد البناء – (المصدر: فريجوني وآخرون، ٢٠١٩م[٢٤]) (المصدر: نسيم، ماريان وسارة إليريان، ٢٠١٧م[٤٠]).

١-٣-٢. البارامترات المؤثرة على أداء المواد مُتغيرة الطور المُدمجة في أغلفة المباني.

يتأثر الأداء الحراري للمواد مُتغيرة الطور المُدمجة بداخل عناصر غُلاف المبني بعده عوامل، يوصى ضبط تلك المعلمات (البارامترات) لضمان أفضل أداء لتلك المواد للإستفادة من إمكاناتها بكفاءة، وتتمثل **تلك البارامترات** في الآتى:

١-٣-٢-١. درجة حرارة الإنصهار للمواد مُتغيرة الطور المُستخدمة.

تُعتبر درجة حرارة الإنصهار من أهم العوامل المؤثرة على كفاءة الأداء الحراري للمواد مُتغيرة الطور لأنها تؤثر على دورات الشحن والتفريغ. فيجب أن تكون درجة حرارة الإنصهار للمادة مُناسبة للإستفادة من الإشعاع الشمسي المُنخفض خلال فصل الشتاء لتلبية الطلب على التدفئة، كما يجب أن تكون درجة حرارة الإنصهار عالية للحد من الإشعاع الشمسي العالي ونقل الحرارة خلال الصيف وبالتالي تقليل حمل التبريد. ضمن هذا الإطار إقترحت دراسة جيل وكالنيس (عام ٢٠١٧م)[٤٣] أن أفضل درجة حرارة إنصهار لمواد تغير الطور المُثلي لتطبيقات تسخين المياة تتراوح بين ٢٩ و٦٠°م، بينما لابد أن تتراوح بين ٢٢ و٢٨°م لتوفير الراحة الحرارية للأفراد بداخل حيزات المبني، وقد تصل درجة حرارة الإنصهار إلي ٢١°م لتطبيقات التبريد.

١-٣-٢-٢. كمية وسُمك المواد مُتغيرة الطور المُستخدمة.

تؤثر كمية المادة مُتغيرة الطور المدمجة في أغلفة المبنى بشكل كبير على كمية الطاقة الحرارية المُخزنة أثناء إنتقال الطور. فعندما يتم دمج كمية صغيرة من المادة في عناصر غُلاف المبني لتقليل أحمال التبريد خلال الصيف، تُخزن المادة حرارة محدودة في مرحلة الشحن حتى تصل إلي الحالة السائلة الكاملة خلال وقت قصير، وبالتالي لا يُمكنها إمتصاص المزيد من الطاقة. على النقيض من ذلك، تُخزن كمية أكبر من المادة مزيداً من الحرارة أثناء عملية الشحن وتقيد الحرارة من المرور عبر العنصر البنائي، وفي الوقت نفسه تتطلب الحرارة المُخزنة مزيداً من الوقت ليتم تفريغها بالإضافة إلى التأثير السلبي على القوة الميكانيكية لعنصر المبنى. الأمر الذي يتطلب دراسة كمية وحجم المادة مُتغيرة الطور المُستخدمة بالتوازى مع تأثير درجة حرارة الإنصهار لضمان أداء إيجابي للمادة بدون الإضرار بالقوة الميكانيكية لعُنصر المبنى. لذلك، يُحتسب حجم مادة تغير الطور PCM المطلوبة لأي تطبيق V_{PCM} بإستخدام (**المُعادلة ٧**)، من خلال قسمة كتلة المادة ***m*** (كجم) على كثافتها ***ρ*** (كجم/م^3).

$$V_{PCM} = {m_{PCM}}/{\rho_{PCM}} \quad \text{(مُعادلة ٧)}$$

كما يتم حساب سعة تخزين الحرارة الكامنة الإجمالية للمادة مُتغيرة الطور ***E**latent*** (كيلوچول) من خلال كُل من: كُتلتها (***m***)، وإجمالي تبادل الطاقة لمُحتوى المادة الحراري ***Hf*** (كيلوچول/كيلوجرام) وعدد الدورات خلال اليوم ***n***، وفقاً (**للمُعادلة ٨**) على النحو التالي:

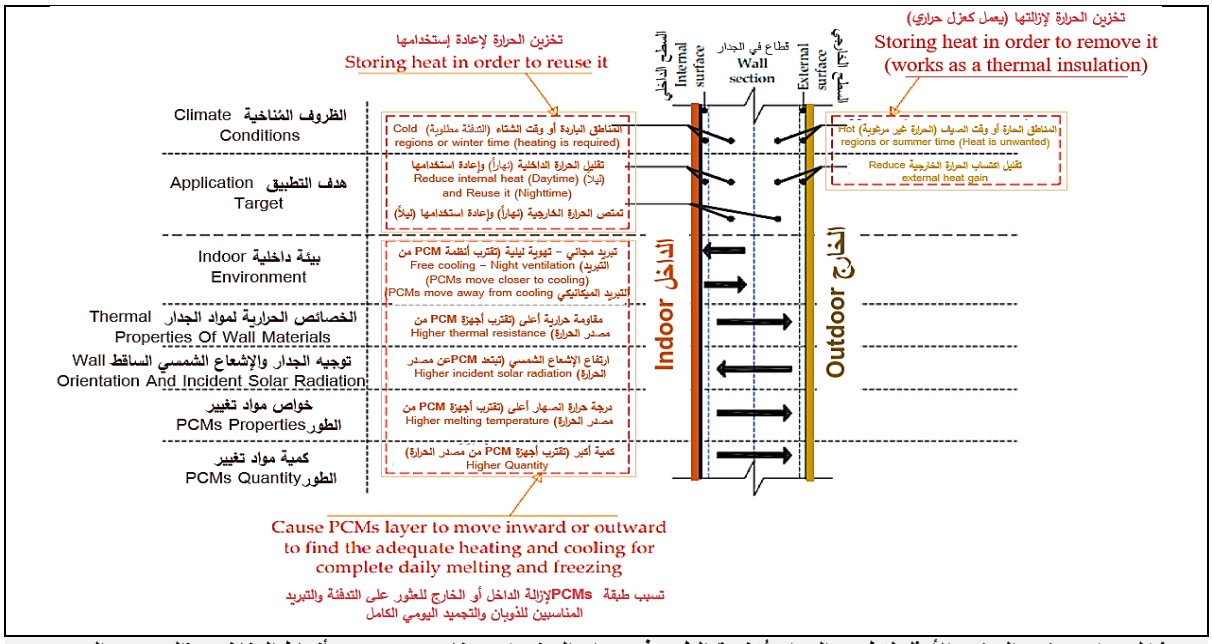
$$E_{latent} = n \times m \times H_f \quad \text{(مُعادلة ٨)}$$

١-٣-٢-٣. الموضع الأنسب للمواد مُتغيرة الطور المُدمجة في عناصر البناء.

يعتمد الموضع الأنسب لتطبيق المادة مُتغيرة الطور على موقع المبني والغرض من إستخدام المادة سواء لتقليل أحمال التدفئة و/أو التبريد. على الرغم من كثرة الدراسات التى أكدت على ضرورة وضع طبقة المادة مُتغيرة الطور بالقرب من مصدر الطاقة الحرارية[٤٤]، إلا أنه يجب تثبيت طبقة المادة مُتغيرة الطور على الجانب الخارجي لعنصر المبنى لأغراض التبريد، بينما يتم تثبيتها من الجانب الداخلي لأغراض التدفئة[٤٥].

كما تؤثر درجة حرارة إنصهار طبقة المادة مُتغيرة الطور أيضاً على الموضع الأمثل لها ضمن عناصر البناء، وهو ما أكدت عليه دراسة لاجو وآخرون[٤٦] التى أثبتت أن وضع طبقة المادة مُتغيرة الطور على السطح الداخلي للجُدران يتطلب أن تكون درجة حرارة إنصهار المادة ١٦°م للمواقع الجنوبية، و١١°م للمناطق الوسطى و٢٠°م للمُدن الشمالية من أجل

الحصول على الأداء الحراري الأمثل. كما أوضحت دراسة دارفيشي وآخرون[٤٧] إن وضع طبقة المادة مُتغيرة الطور في الوسط أو بالقرب من المنطقة الداخلية يُقلل الحمل الحراري ويُزيد من توفير الطاقة بغض النظر عن الظروف المُناخية الخارجية المُحيطة بالمبني. يوضح (**الشكل ١٠**) أفضل وضع لطبقة المادة مُتغيرة الطور، مع الأخذ في الإعتبار المعلمات الرئيسية المؤثرة في الأماكن الباردة والساخنة.



شكل ١٠. يوضح الوضع الأمثل لتطبيق المواد مُتغيرة الطور في جدار المبني كي يتناسب مع جميع أنماط المناخ – (المصدر: العبسي وآخرون، ٢٠٢٠م[٣١]).

٢. الإطار الإستقصائي للبحث (تقييم ورصد أداء المواد مُتغيرة الطور في الدراسات التجريبية السابقة)

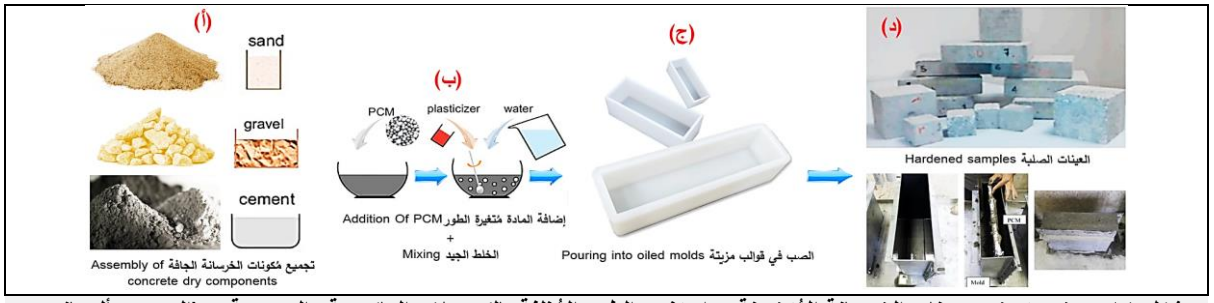
٢-١. رصد وتقييم الأداء الحراري لأغلفة المباني المُتضمنة المواد مُتغيرة الطور.

تناولت الدراسات السابقة العديد من التقنيات العملية لدمج المواد مُتغيرة الطور في عناصر المبني. فعادةً ما يتم تضمينها إما أثناء عملية البناء أو إضافتها كطبقة مُنفصلة بداخل هيكل المبنى. أظهرت تطبيقات أنظمة مواد تغير الطور تحسينات مُذهلة عند دمجها في عناصر المبني المُختلفة. وفيما يلي يتم تقييم دمج مواد تغيير الطور في غلاف المبنى، مع التركيز على تضمينهم في الأسطح والجدران الخارجية بسبب إشغالهم لأكبر مساحة من المبنى مُعرضة لظروف المُناخ المُتغيرة، ومن ثم تمثل تلك العناصر المصدر الأساسي لأحمال التدفئة والتبريد غير المرغوب فيها.[٤٨]

٢-١-١. تقييم الأداء الحراري لدمج المواد مُتغيرة الطور في المواد الخرسانية ومواد التكسية (التشطيب).

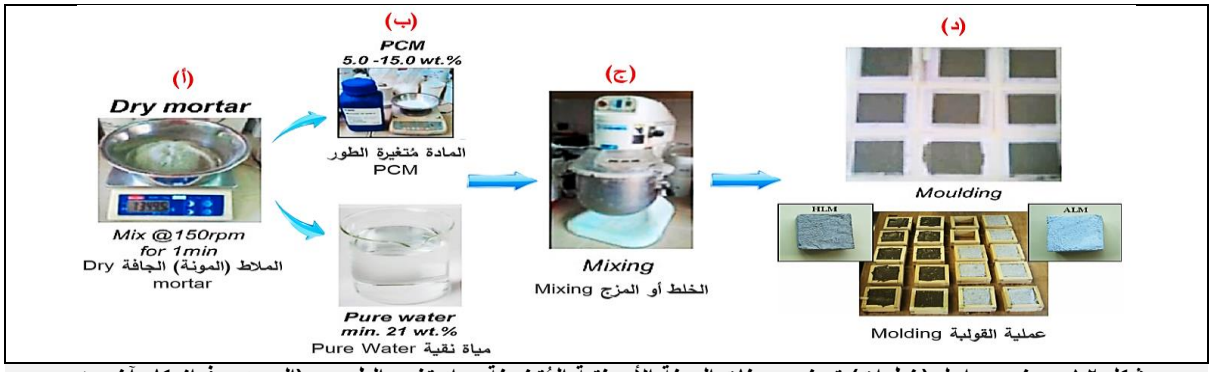
شهدت المونة المُدمجة مع المواد مُتغيرة الطور تحسناً كبيراً من حيث الراحة الحرارية وتوفير الطاقة. فقد أوضحت بعض الدراسات أن خلط المواد مُتغيرة الطور مع المونة لديه إمكانات عالية في تنظيم مُتطلبات الطاقة لتطبيقات التدفئة والتبريد، فضلاً عن التحكم في توفير الراحة الحرارية الداخلية[٤٢]. فقد إختبرت دراسة يون وآخرون[٤٩] خلط مادة تغيير الطور مع الخرسانة للتحكم في درجة الحرارة، وأظهرت النتائج أن درجة حرارة الخرسانة إنخفضت بنسبة تتراوح من ١٥% إلي ٢١%، كما أوضحت النتائج إنخفاض الإجهاد الحراري والتشققات للأسطح الخرسانية. وكذلك قدمت دراسة أنتونيلا وآخرون[٥٠] نوع مُتقدم من المواد المُتغيرة الطور المُدمجة في الخرسانة بواسطة تطبيق طريق التغليف الكُلي والمجهري،

وقد تم الإبلاغ عن أن الخرسانة المُنتجة تتمتع بإستقرار حراري جيد، بالإضافة إلي تحسين تأثير العزل الحراري لمدة تصل إلي ٩ ساعات زائدة مُقارنةً بالخرسانة التقليدية.(**الشكل ١١**)



شكل ١١. يوضح تحضير عينات الخرسانة المُتضمنة مواد تغيير الطور المُغلفة بالكبسولات الماكروية والمجهرية – (المصدر: أليساندرو وآخرون، ٢٠١٨م[٥٠]).

بينما إختبرت دراسة فرازيكا وآخرون[٥١] دمج المُركبات المُتغيرة الطور مع المونة الأسمنتية بنسب مُختلفة (**الشكل ١٢**)، حيث أشارت نتائج الدراسة إلي تحقيق زيادة بنسبة ١٥٪ في ظروف الراحة كنتيجة لإنخفاض درجة حرارة السطح الداخلي للمونة المُتضمنة المادة مُتغيرة الطور مقارنةً بالمونة الأسمنتية النقية.



شكل ١٢. يوضح مراحل (خطوات) تحضير عينات المونة الأسمنتية المُتضمنة مواد تغيير الطور – (المصدر: فرازيكا وآخرون، ٢٠١٩م[٥١]).

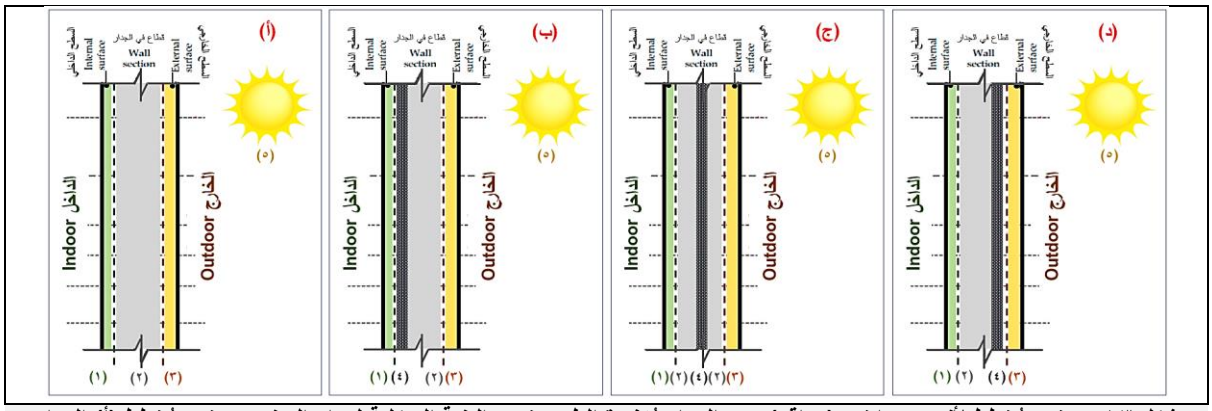
ضمن هذا الإطار، إختبرت دراسة يونس وناجي[٥٢] دمج المواد مُتغيرة الطور في طبقة المونة التى طُبقت على الجدار لإدارة الراحة الحرارية للمبني، حيث أشارت نتائج الدراسة إلي خفض درجة الحرارة بمقدار ٣°م. كما فحصت دراسة عابدين وآخرون[٥٣] بشكل تجريبي الأداء الحراري لسقف مُعلق من ألواح الجبس مُدمج به مواد تغيير الطور لتقليل أحمال التبريد وقد أظهرت النتائج إنخفاض درجة الحرارة بمقدار ٤،٩°م خلال اليوم الأول من التجربة بينما إستمر مُتوسط الإنخفاض إلي ٣،٥°م خلال الثلاثة أيام المُتتالية مُقارنةً بألواح الجبس التقليدية، كما خلصت الدراسة إلي أن الألواح المُتضمنة مواد تغيير الطور كانت فعالة في توفير أحمال التبريد بنسبة ١٦،٢%. وكذلك إختبرت دراسة لي وآخرون[٥٤] كفاءة ألواح الحائط الجبسية المُتضمنة مواد تغيير الطور في الحفاظ على توفير نطاق الراحة الحرارية لمُستخدمي الحيزات الداخلية للمبني، حيث أظهرت نتائج الدراسة إنخفاضاً ملحوظاً في مقدار الطاقة المُستهلكة لتلبية مُتطلبات جودة البيئة الداخلية بنسبة تصل إلي ٣٠% بالتزامن مع تفعيل التحكم الحراري لتقلبات درجات الحرارة مُقارنةً بالألواح الجبسية التقليدية.

٢-١-٢. تقييم الأداء الحراري لدمج ألواح و/أو طبقات المواد مُتغيرة الطور في عناصر المبني المُختلفة.

تناولت العديد من الأدبيات دراسة تثبيت شرائح و/أو طبقات المواد مُتغيرة الطور المُغلفة كُلياً كطبقة إضافية في هيكل المبني من أجل تنشيطه حرارياً بشكل سلبي أو نشط. ومنها فقد تناولت دراسة هو ويو[٥٥] مُحاكاة أداء لوح المادة مُتغيرة الطور المُدمجة في الحائط بإستخدام أداة EnergyPlus لرصد إجمالي توفير الطاقة ونسبة خفض إنبعاثات غاز ثاني أُكسيد الكربون مع الأخذ في الإعتبار نوع اللوح المُستخدم وسُمكه، وأشارت نتائج الدراسة إلي أن دمج المواد مُتغيرة الطور في جُدران المبنى يُمكن أن يوفر إستهلاك الطاقة بنسبة ٦% ويُقلل من إنبعاثات غاز ثاني أُكسيد الكربون بنسبة ١%، كما أفادت الدراسة إلي أن لموضع اللوح أثر كبير على مقدار توفير الطاقة؛ فعندما يُدمج اللوح المُتضمن مواد تغيير الطور بداخل عزل الجدار يقل إستهلاك الطاقة بنسبة تتراوح بين ١-٧% مُقارنةً بوضعه خارج العزل. وفي حالة زيادة سُمك اللوح يتم توفير الطاقة بنسبة تتراوح بين ٢-٦% في المناطق ذات المُناخ الحار الجاف.

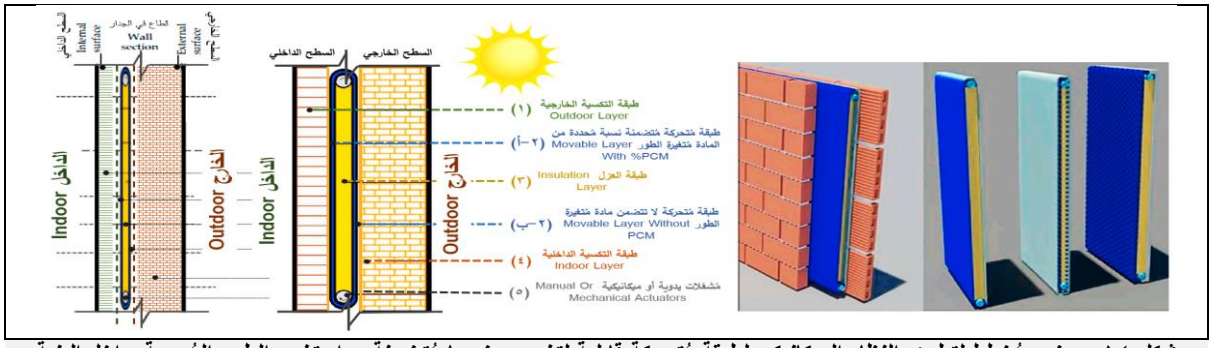
وكذلك، تحققت دراسة مريفت[٥٦] من تطبيق الراحة الحرارية وتوفير الطاقة في المباني عند تطبيق طبقات من المواد مُتغيرة الطور في حيز داخلي يقع في ظروف مُناخية جافة وشبه قاحلة بإستخدام برنامج EnergyPlus ونموذج ڤينجر للراحة الحرارية، وأشارت الدراسة إلي فاعلية نظام الطبقات حيث تم تحسين توفير الراحة الحرارية من ٧٣% إلي ٩٣% في المُناخ الحار ومن ٦٣% إلي ٧٥% في المُناخ شبه الجاف، كما تم خفض إستهلاك الطاقة الحرارية بنسبة ١٧،٥% في المُناخ الجاف و١٠،٥% في المُناخ شبه الجاف.

يُعد لموقع طبقة المواد مُتغيرة الطور بداخل غُلاف المبني دوراً رئيسياً في رفع كفاءة الأداء الحراري للمبني بشكل كبير. فقد قدمت دراسة چين وآخرون[٤٥] إختباراً تجريبياً لتحديد أنسب موضع لدمج طبقة مواد تغيير الطور ضمن البنية الهيكلية للجدار من أجل تقليل تدفق الحرارة من الخارج إلي الداخل (**الشكل ١٣**)، وقد أظهرت النتائج أن الوضع الأمثل لطبقة المادة مُتغيرة الطور يتحدد وفقاً لعده مُحددات خاصة بالخصائص الحرارية للمادة وبالظروف البيئية المُحيطة. حيث أشارت الدراسة إلي أن أكثر تلك المواقع فاعلية هو وضع المادة بالقرب من سطح الجدار الداخلي **(مخطط أ)** عندما زادت درجة الحرارة الداخلية **(مُخطط د)** حيث توجد طبقة المواد مُتغيرة الطور بالقرب من سطح الجدار الخارجي عندما تزداد كُل من سماكة الطبقة، وحرارة الإنصهار للمادة.



شكل ١٣. يوضح مُخطط لأنسب مواضع (مواقع) دمج المواد مُتغيرة الطور ضمن البنية الهيكلية لجدار المبني. يوضح مُخطط (أ) الجدار التقليدي بدون دمج المواد مُتغيرة الطور، أما مُخطط (ب) يوضح دمج طبقة المادة مُتغيرة الطور بالقرب من الجانب الداخلي للجدار، كما يوضح مُخطط (ج) دمج طبقة المادة مُتغيرة الطور في مُنتصف الجدار، بينما يوضح مُخطط (د) دمج طبقة المادة مُتغيرة الطور بالقرب من الجانب الخارجي للجدار. تُشير الأرقام المذكورة إلي: ١. ألواح الجبس "چيبسون بورد" – ٢. طبقة العزل – ٣. اللوح الخارجي الموجه للبيئة المُحيطة – ٤. طبقة المادة مُتغيرة الطور – ٥. البيئة الخارجية – (المصدر: چين وآخرون، ٢٠١٦م[٤٥]).

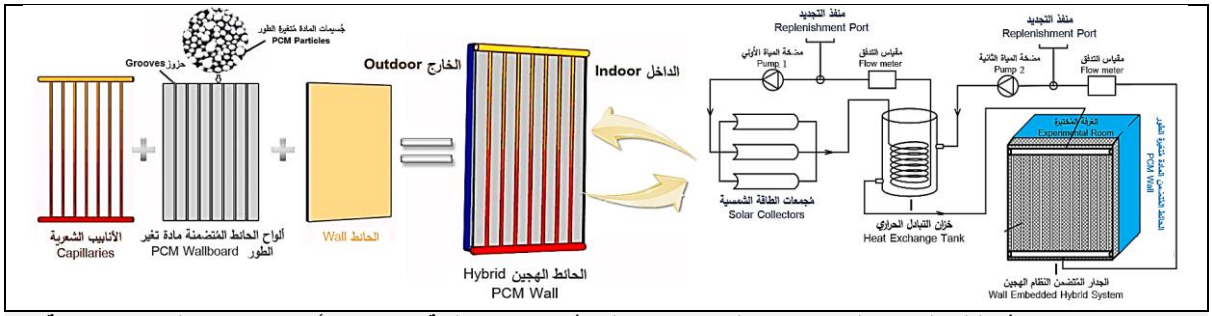
وضمن هذا الإطار، نفذت دراسة جراسيا[٥٧] طبقة بوليمرية من المواد مُتغيرة الطور بسُمك ٧ مم ضمن نظام بنائي ديناميكي قابل لتغير موضع طبقة العزل بداخل الجدار (**الشكل ١٤**). وذلك من أجل تخليق نظام يتفاعل سلبياً مع مُتغيرات البيئة المُستمرة إلي جانب تجنب تفريغ الحرارة إلي الداخل، وفي الوقت نفسه تعزيز التصلب الكامل للمادة مُتغيرة الطور بداخل النظام. كما أظهرت النتائج أن هذا النظام يعمل كمورد للتبريد في الأيام الحارة، مُشيراً إلي إمكانية قُدرة هذا النظام في تقليل أحمال التبريد بنسبة ٣٧،٩% مُقارنةً بالجدار بدون المواد مُتغيرة الطور.



شكل ١٤. يوضح مُخطط لتطبيق النظام الميكانيكي لطبقة مُتحركة قابلية لتغير موضعها مُتضمنة مواد تغيير الطور المُدمجة بداخل البنية الهيكلية للجدار – (المصدر: دي جراسيا، ٢٠١٩م[٥٧]).

كما خلق كونج وآخرون[٥٨] نظاماً هجيناً لغُلاف المبني مُكون من ألواح الحائط المُركبة المُتضمنة مادة مُتغيرة الطور (تقنية سلبية) مقترنةً بنظام تسخين شمسي (تقنية نشطة) من خلال الأنابيب الشعيرية وذلك للحفاظ على بيئة حرارية داخلية مُريحة بالإستناد على مصدر طاقة مُستدام. يتمثل هذا النظام الهجين في لوح حائطي مُركب مُخلق من خليط مادة البيرلايت مع مادة البارافيين مُتغيرة الطور، ويُدمج هذا اللوح مع نظام التسخين الشمسي النشط المُتمثل في مجموعة مُتكاملة من المُكونات وهي: المُجمعات الشمسية أو السخان، خزان التبادل الحراري، مضخات المياة، شبكة من الأنابيب الشعيرية، مصدر للتدفئة (أو للتسخين)، عداد التدفق، وجهاز التحكم في درجة الحرارة.(كما هو موضح في **الشكل ١٥**)

وقد تم تثبيت هذا النظام الهجين بداخل جدار الغرفة المُختبرة (**الشكل ١٥**). حيث أظهرت النتائج إنخفاضاً بنسبة ٤٤،١٦% في إستهلاك طاقة التدفئة اليومية للنظام الهجين، بالإضافة إلي أن مثل هذا النظام الهجين يُحافظ على توفير بيئة داخلية مُريحة ويُعزز كفاءة الأداء الحراري للمبني. يُشير هذا النظام الهجين المُقترح إلي أهمية دمج نظام التسخين النشط نظراً لقُدرته على لتوفير طاقة حرارية كافية للحفاظ على الراحة الحرارية وزيادة قدرة التخزين الحراري للمادة مُتغيرة الطور، كما يُمكن من خلاله إستخدام الطاقة الحرارية الشمسية كمصدر حرارة لنظام التدفئة النشط خلال فصل الشتاء.



شكل ١٥. يوضح مُخطط لتطبيق النظام الهجين (نظام سلبي ونشط) المُتضمن دمج طبقة من مادة و/أو مواد تغيير الطور بداخل البنية الهيكلية لجدار الغُرفة – (المصدر: كونج وآخرون، ٢٠٢٠م[٥٨]).

٢-٢. المسح الإستقصائي للدراسات السابقة حول دمج المواد مُتغيرة الطور في أغلفة المباني.

تعددت الدراسات السابقة التى تناولت دمج المواد مُتغيرة الطور في عناصر غُلاف المبني المُختلفة، لذلك يتم تقديم الدراسة الإستقصائية للدراسات السابقة التي إستخدمت أنواعاً مُختلفة من المواد مُتغيرة الطور في غُلاف المبني بإيجاز في (**جدول ٤**)، موضحاً تطبيقها وطرق الدمج ونتائجها الرئيسية لتضمين تلك المواد بداخل العناصر المُختلفة لغُلاف المبني.

الدراسة (المرجع)	عُنصر الغُلاف	طريقة الدمج	التطبيق	النتائج والمُلاحظات FINDINGS.
دراسة ناجانو (٢٠٠٦م)– **موقع الدراسة:** اليابان.	**الأرضيات.**	ضمن نظام هجين مُدمج مع أنظمة تكييف الهواء.	التبريد.	• توفير الطلب اليومي للتبريد **بنسبة ٨٩%.** • خفض إستهلاك التيار الكهربائي المُستخدم لتشغيل أنظمة التكيف حوالي ٣ ساعات يوميًا بدءًا من الساعة ١ ظهرًا.
دراسة علم وآخرون (٢٠١٤م)– **موقع الدراسة:** دراسة ستة مناطق مناخية أسترالية.	غُلاف المبني.	غُلاف المبني المُتضمن مواد تغير الطور.	التدفئة والتبريد.	• زيادة التوفير السنوي للطاقة بنسبة تتراوح بين **١٧% إلي ٢٣%.** • يُقلل دمج مواد تغير الطور في أغلفة المبني من الإستهلاك الزائد للطاقة في المُناخ البارد، المُعتدل والدافيء.
دراسة جسار ويون (٢٠١٧م)– **موقع الدراسة:** كوريا الجنوبية (سيول)، اليابان (طوكيو) والصين (هونج كونج).	الأسطُح والحوائط.	ألواح من المادة مُتغيرة الطور: **BioPCM (25) - RUBITHERM .PCM (29)**	التدفئة والتبريد.	• أظهرت مواد تغير الطور توفير الطاقة بنسبة تتراوح بين ٤،٤٨% و٨،٢١% (في سيول)، بينما تتراوح نسبة توفير الطاقة في طوكيو ما بين ٣،٨١% و٩،٦٩%، أما في هونج كونج فتتراوح بين **١،٩٤% و٥،١٥%.**
دراسة راماكريشنان وآخرون (٢٠١٧م)– **موقع الدراسة:** أستراليا.	الأسطُح والحوائط.	طبقة تكسية من مادة تغير الطور: **Bio-PCMTM (27).**	التبريد.	• تُقلل مادة تغير الطور مخاطر الإجهاد الحراري الداخلي وتحسين صحة المُقيمين، فضلاً عن توفير الراحة الحرارية. • خفض فترة الإنزعاج الحراري خلال ظروف الموجة الحارة الشديدة بنسبة ٦٥%.

دراسة فتح وآخرون (٢٠١٧م)– **موقع الدراسة:** في المُختبر التجريبي.	الحوائط.	طبقة من المادة مُتغيرة الطور المُنفصلة: **Energain® PCM**.	التبريد.	• تقليل التدفق الحراري (وقت الذروة القُصوي) **بنسبة ١٥%** وتأخيره لمُدة ساعتين.
دراسة حسن وآخرون (٢٠١٨م)– **موقع الدراسة:** العراق (الكوت).	غُلاف المبني.	غُلاف المبني المُتضمن شرائح مواد تغير الطور كي تعمل كطبقة عزل في المباني السكنية.	التبريد.	• خفض درجة الحرارة الداخلية بمقدار ٢،١٨°م. • خفض أحمال التبريد خلال ساعات الذروة (في اليوم) بنسبة ٢٠،٩%.
دراسة الهنجاري ومعريفت (٢٠١٨م)– **موقع الدراسة:** خمس مناطق مناخية مُختلفة في إيران.	غُلاف المبني.	غُلاف المبني المُتضمن طبقة داخلية مزدوجة من مواد تغير الطور.	التدفئة والتبريد.	• إنخفاض الطلب على الطاقة بنسبة ١٧،٥% (في المُناخ الدافيء/الجاف) وبنسبة ١٠،٤% (في المُناخ المُعتدل/شبه الجاف). • خفض إستهلاك الطاقة للتبريد بحوالي ١٢،٣% في المناخ البارد و ٩،٨% المناخ المُعتدل/الرطب.
دراسة يون وآخرون (٢٠١٨م)- **موقع الدراسة:** كوريا الجنوبية.	الأسطح.	قوالب من المادة مُتغيرة الطور: **BioPCM (26) n-docosane (44).**	التبريد.	• خفض درجة الحرارة الداخلية بمقدار ٥،٤٠°م. • إستنتجت الدراسة أن مادة n-docosane أكثر فعالية مُقارنةً بمادة BioPCM.
دراسة لاخضري والشيخ (٢٠١٨م)– **موقع الدراسة:** الجزائر.	الحوائط.	طمي متضمن مادة مُتغيرة الطور **(PCM (26))** وممزوج مع الأحجار.	التبريد.	• خفض أحمال التبريد **بنسبة ٧٣%.** • خفض درجة حرارة الجانب الداخلي للجدار بمقدار ٢°م.
دراسة سوفيتوفا وآخرون (٢٠١٩م)– **موقع الدراسة:**	الأسطُح والحوائط.	طبقة من المادة مُتغيرة الطور: **BioPCMs (20–32).**	التبريد.	• خفض درجة الحرارة الداخلية بمقدار **٢،٠٤°م.** • زيادة توفير الطاقة بنسبة تتراوح ما بين ١٧،٩٧% و٣٤،٢٦%.

السعودية، مصر والهند.				
دراسة جيونج وآخرون (٢٠١٩م)– **موقع الدراسة:** الولايات المتحدة (شيكاغو ولوس أنجلوس، ميامي وفينيكس).	الحوائط.	ألواح الجبس والأسمنت المُشبعة بمواد تغير الطور: **n-octadecane (18.80–37.83)- Beeswax (33.41–61.05).**	التدفئة والتبريد.	• زاد اللوح المُشبع بمادة n-octadecane وشمع العسل Beeswax من التوصيل الحراري بنسبة ١٢٩٪ و١٥٠٪ مُقارنةً باللوح الأصلي. • في ميامي، زاد توفير الطاقة بنسبة ٧،٨% (في حالة تطبيق n-octadecane) بينما وصل نسبة توفير الطاقة إلي ٦،٤% (عند تطبيق مادة شمع العسل Beeswax) خلال موسم التدفئة. • في ميامي وفينيكس، نتج عن تطبيق الألواح المُتشبعة بمادة تغير الطور n-octadecane خفض أحمال التبريد **بنسبة ٣،٦%** و٤،٣ على التوالي.
دراسة تساو ويوي (٢٠١٩م)– **موقع الدراسة:** النرويج (أوسلو).	الحوائط.	الخرسانة المُتضمنة مادة: **PCM24D(21.9)** وإضافة مادة **RT21 (21)** كطبقة مُنفصلة.	التدفئة والتبريد.	• التوفير السنوي للطاقة بنسبة **٢٨%**، وإنخفاض الطاقة بنسبة ٣٢% (خلال فصل الصيف) مُقابل نسبة ٢٣% (خلال فصل الشتاء).
دراسة كنزيخانوف وآخرون (٢٠٢٠م)– **موقع الدراسة:** كندا، روسيا، فنلندا والسويد.	الأسطُح والحوائط.	طبقة من تسعة مواد مُتغيرة الطور: **PCM19 (19), PCM20 (20), …, PCM27 (27).**	التدفئة والتبريد.	• نتج عن تطبيق المادتين مُتغيرة الطور (PCM23 وPCM24) زيادة توفير الطاقة بمقدار يتراوح بين ٤٠٠٠ و١٠٠٠٠ كيلو وات في الساعة. • من المُتوقع أن تقل إنبعاثات غاز ثاني أُكسيد الكربون بمقدار يصل إلي ٤٨١٧،٤٤ كيلوجرام/السنة.
دراسة يان وآخرون (٢٠٢٠م)– **موقع الدراسة:** الصين (ووهان).	الحوائط.	أنابيب ذات مواد تغير الطور مُغلفة: **RT28+Expanded**	التبريد.	• مُقاومة الحرارة القادمة من الخارج بنسبة تتراوح بين ٥٥،٦% و٨٢،٨%. • خفض دخول الحرارة المُتراكمة إلي الداخل بنسبة تتراوح بين ٣٢،٤% و٥٥،٥%.

		graphite . (26.5–28.5)		
دراسة ناجي وآخرون (٢٠٢٠م)– **موقع الدراسة:** في المُختبر التجريبي.	الحوائط.	الأسمنت (الخرسانة والمونة) المُتضمن مواد تغير الطور: **Micronal DS 5038 (25)**.	-----	• إنخفضت الموصلية الحرارية للمونة الأسمنتية بنسبة ٣٧٪ ونحو ٣٠٪ للخرسانة. • زادت السعة الحرارية للملاط بنسبة ١٣٪ مقابل ٩٪ للعينات الخرسانية.
دراسة راثور وآخرون (٢٠٢٠م)– **موقع الدراسة:** الهند (ماثورا).	الأسطُح والحوائط.	أنابيب الألمنيوم المغلفة بمادة تغير الطور: **OM37 (39.1).**	التبريد.	• خفض درجة حرارة الذروة الداخلية بمقدار ٠،٢-٣،٤°م. • تقليل ذروة التدفق الحراري بنسبة **١٧،٣٧%** سنويًا، مما أدى إلى توفير تكلفة ذروة أحمال التبريد إلي ١،٤٧ روبية/كيلو وات ساعة/م٢/يوم.
دراسة سو وداركوا (٢٠٢٠م)– **موقع الدراسة:** الصين (هانجتشو).	الحوائط.	طبقات مادة مُتغيرة الطور مُدمجة في الجدار. **n-octadecane**(23.55) **n-eicosane**(34.99)	التبريد.	• خفض درجة الحرارة القصوي بمقدار يتراوح بين ٢،٩°م و٦،٧°م (خلال فصل الصيف). • زيادة ساعات الشعور بالراحة الحرارية بنسبة ١٢%.

جدول ٤. يعرض مُلخص لأحدث الدراسات التجريبية التى تناولت تطبيق المواد مُتغيرة الطور في عناصر غُلاف المبني المُختلفة، موضحاً طريقة الدمج المُتبعة والنتائج الرئيسية التى نتجت عن تضمين تلك المواد في عناصر الغُلاف من حيث مردودها على توفير مُتطلبات البيئة الداخلية من راحة حرارية ومن منظور توفير الطاقة وأحمال التدفئة والتبريد.

من خلال الجدول السابق، نجد أن الدراسات التى تناولت دمج المواد مُتغيرة الطور في الحوائط تُمثل نسبة ١:٢ مُقارنةً بالدراسات التى تناولت دمجها في الأسطح، وكما تُمثل نسبة ١:٤ مُقارنةً بالتالي تناولت دمجها في غُلاف المبني. وكذلك نُلاحظ تعدُد الدراسات التى تناولت تطبيق المواد مُتغيرة الطور لتقليل أحمال التبريد مُقارنةً بالدراسات التى تناولت تطبيقها لتقليل أحمال التدفئة والتبريد معاً (فنجد أن نسبة دراسات خفض أحمال التبريد إلي دراسات خفض أحمال التدفئة والتبريد ١:٢)، وهو ما يُشير إلي الأداء الأمثل للمواد مُتغيرة الطور في خفض أحمال التبريد. **كما نستخلص أن** دمج المواد مُتغيرة الطور في الأرضيات أدي إلي خفض أحمال التبريد بنسبة ٨٩% (وفقاً لدراسة ناجانو (٢٠٠٦م) التى أُجريت في اليابان) بينما تنخفض أحمال التبريد عند دمجها في الحوائط بنسبة تتراوح ما بين ٣،٦% (وفقاً لدراسة جيونج وآخرون (٢٠١٩م) التى أُجريت في الولايات المُتحدة) إلي ٧٣% (وفقاً لدراسة لاخضري والشيخ (٢٠١٨م) التى أُجريت في الجزائر). كما تم رصد أكبر نسبة توفير للطاقة سنوياً بحوالي ٢٨% (وفقاً لدراسة تساو ويوي (٢٠١٩م) التى أُجريت في أوسلو بالنرويج)،

بينما تم رصد أقل توفير سنوي للطاقة بمُتوسط يتراوح بين ١،٩٤ إلي ٥،١٥% (وفقاً لدراسة جسار ويون (٢٠١٧م) التى أُجريت في هونج كونج بالصين).

وكذلك، نستنتج أن لدمج المواد مُتغيرة الطور في عناصر غُلاف المبني المُختلفة (خاصةً الحوائط) أثراً كبيراً على خفض التدفق الحراري بنسبة تتراوح بين ١٥% (وفقاً لدراسة فتح وآخرون (٢٠١٧م)) إلي ١٧،٣٨% (وفقاً لدراسة راثور وآخرون (٢٠٢٠م))، بينما يؤدي دمج المواد مُتغيرة الطور إلي خفض درجة الحرارة الداخلية بمقدار ٢،٠٤°م (وفقاً لدراسة سوفيتوفا وآخرون (٢٠١٩م) التى أُجريت في السعودية ومصر)، فضلاً عن زيادة ساعات الشعور بالراحة الحرارية لمدة تزيد عن ١٢ ساعة على مدار اليوم الواحد (كما ورد في دراسة سو وداركوا (٢٠٢٠م) التى أُجريت في الصين).

٣. الإطار التحليلي للبحث (الدراسة التحليلية لنماذج معمارية مُتضمنة المواد مُتغيرة الطور)

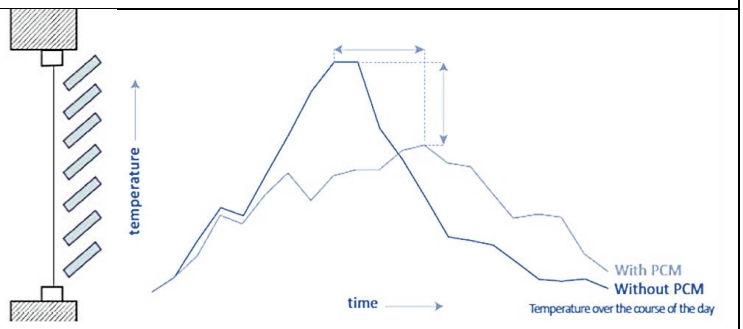
يتضمن هذا القسم، تقديم دراسة تحليلية لنماذج من المشروعات التى تم تطبيق المواد مُتغيرة الطور في غلافها من أجل تعزيز التكيف السلبي مع التقلبات الحرارية للبيئة المُحيطة، وتُقسم تلك الدراسة التحليلية إلي قسمين: القسم الأول يتضمن دراسة نموذجين لمباني مُقامة بالفعل والقسم الثاني يتضمن نموذجين لمباني مُقترحة قيد التجريب والتطوير.[٢٧]

٣-١. دراسة تحليلية لدمج المواد مُتغيرة الطور في أغلفة المباني القائمة بالفعل.

٣-١-١. تحليل النموذج المعماري الأول: مبني مقر شركة EnBW Energie Baden-Württemberg AG.

المشروع: مقر شركة EnBW Zentrale.	**مُهندس المواد مُتغيرة الطور:** بايرن **ZAE Bayern**.	**نوع المبني:** مبني إداري (شركة إدارية).	**الموقع:** كارلسروه، ألمانيا Karlsruhe, Germany.
مفهوم دمج أنظمة مواد تغيير الطور في غُلاف المبني: الستائر الشمسية الداخلية Internal Sun Blinds.			
نبذة مُختصرة عن المشروع ومفهوم تطبيق تقنية المواد مُتغيرة الطور بداخل غُلاف المبني: يبدو مبني مقر شركة EnBW Energie Baden-Württemberg AG تقليدياً من حيث المفهوم التصميمي إلا أنه يتضمن بعض الميزات المُتقدمة من حيث تطبيق المواد مُتغيرة الطور المُتكيفة بيئياً مع مُتغيرات البيئة المُناخية في السواتر الشمسية الداخلية، ويُعتبر المبني أحد المباني الأربعة في ألمانيا التي تضم دمج أنظمة المواد مُتغيرة الطور في عناصر الغُلاف الخارجي للمبني. تعمل الستائر المليئة بالمواد مُتغيرة الطور على توفير الراحة الحرارية الداخلية المرجوة من قبل الأفراد المُستخدمين لحيزات المبني الداخلية، وذلك عن طريق تدفئة و/أو تبريد الغرف بواسطة عمليات إمتصاص الطاقة الحرارية وتخزينها كي يتم إطلاقها لاحقاً خلال أوقات إنخفاض الحرارة المُحيطة، ويتم ضبط وتنظيم عمليات الشحن والتفريغ من خلال أنظمة مواد تغير الطور المُستخدمة.		
دور المواد مُتغيرة الطور في رفع كفاءة أداء المبني حرارياً: نتج عن دمج المواد مُتغيرة الطور في ستائر الشمس الداخلية خفض درجة الحرارة الداخلية بمقدار يتراوح من ١٠°م إلي ١٥°م، فضلاً عن خفض درجة الحرارة التشغيلية للغرفة بمقدار ٣°م. وقد نتج عنه حدوث تحسن ملحوظ في توفير الراحة الحرارية للغرفة خلال ساعات العمل مما يشير بشكل مُباشر إلى نتائج واعدة. ومن المُحتمل أن يكون		

التعديل التحديثي للستائر الشمسية المحسّنة بواسطة المواد متغيرة الطور أحد التطبيقات الأساسية لتلك الفئة من المواد في هندسة البناء.[٢٧]



شكل ١٦. يوضح لقطة منظورية لمبني شركة The ENBW Zentrale. يوضح المُخطط تأثير دمج مواد تغيير الطور في عناصر غُلاف المبني، موضحاً أثرها الملحوظ على خفض درجة الحرارة الداخلية خلال أوقات النهار والمُساهمة في خلق بيئة داخلية مُريحة حرارياً خلال اليوم – (**المصدر:** ماريا أليكسيو، ٢٠١٧م[٢٧]).

٣-١-٢. تحليل النموذج المعماري الثاني: مبني WILO BUILDING.

المشروع: WILO BUILDING.	**مُهندس المواد مُتغيرة الطور:** شركة باسف BASF الكيميائية.	**نوع المبني:** مبني إداري (شركة إدارية).	**الموقع:** ويستزان، هولندا Westzaan, Netherlands.

المعماري: بنثم كروويل Benthem Crouwel Architects. المُهندس الإنشائي: بيتر بويتشنيك ديلفت Pieters Bouwtechniek Delft.

مادة تغير الطور المُستخدمة: حُبيبات البارافين، ذات درجة إنصهار ٢١°م.

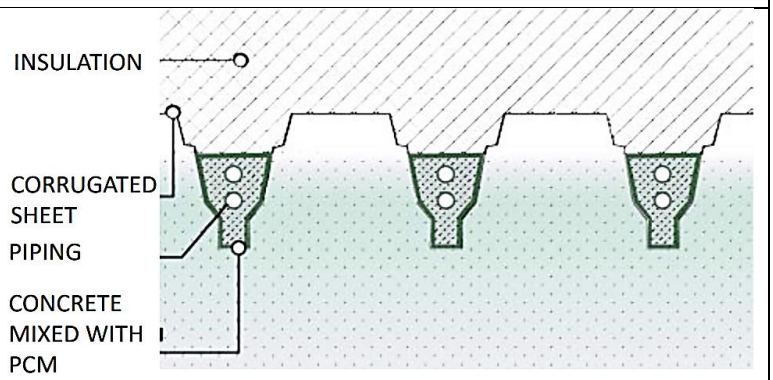
مفهوم دمج أنظمة مواد تغيير الطور في غُلاف المبني: هو **نظام هجين** لتطبيق شبه سلبي للمواد مُتغيرة الطور، حيث يتم دمج حبيبات البارافين المخلوطة بالخرسانة كنظام سلبي إلي جانب إستخدام أنابيب المياة الباردة كنظام نشط لتصريف الحرارة الزائدة.

نبذة مُختصرة عن المشروع ومفهوم تطبيق تقنية المواد مُتغيرة الطور بداخل غُلاف المبني: يندرج مبني المقر الرئيسي لشركة Wilo ضمن فئة المباني الهولندية الحديثة خفيفة الوزن والمُتميزة بتصميم أنظمة الأسقف المُبتكرة كي تمنع إرتفاع درجة الحرارة. وبسبب البنية الهيكلية المعدنية للمبني كان لابد من دمج أنظمة مواد مُتقدمة تعمل على تفعيل التكيف مع المُتغيرات المُناخية للبيئة الخارجية وتوفير الراحة الحرارية الداخلية. وقد تم تصميم ألواح السقف مُتخذة الشكل الملفوف والمثقوب حيث يُستخدم مزيجاً ذكياً من أنظمة المواد مُتغيرة الطور المُدمجة ضمن نظام مُتكامل يشتمل على دوائر التبريد وبالتالي زيادة قدرته على إمتصاص الصوت بكفاءة وذلك، لحجب إنتقال الصوت إلي الحيزات المجاورة. كما إستخدمت

الخرسانة المُشبعة بحبيبات البارافيين في تصميم ألواح السقف كطبقة علوية عازلة، بينما يقوم السائل المُتدفق عبر الأنابيب المُدمجة في الخرسانة بمثابة سائل ناقل للحرارة لضمان التوزيع المُتساوي لدرجة الحرارة.

دور المواد مُتغيرة الطور في رفع كفاءة أداء المبني حرارياً: نتج عن دمج المواد مُتغيرة الطور - كنظام سلبي - ضمن نظام هجين مُتكامل يتضمن أنظمة تبريد نشطة توفير التبريد الإشعاعي والمُساهمة في التخلص من درجات الحرارة المُخزنة نهاراً كي يتم إطلاقها ليلاً (في حالة عدم كفاية إزالة الحرارة من خلال التهوية الليلية).

يُعد لمواد تغيُر الطور دوراً فعالاً في تحسين الأداء الحراري للمبني حرارياً، حيث نتج عن تطبيقها ضمن نظام مُتكامل في غُلاف المبني خفض أحمال التبريد للمبني سنوياً بنسبة تتراوح بين ٤٠% و٥٠%.[٢٧]



شكل ١٧. يوضح لقطة منظورية لمبني Wilo Building، يوضح المُخطط تقنية دمج مواد تغيير الطور المُستخدمة لتضمين المادة ضمن البنية الهيكلية لعناصر غُلاف المبني، تتمثل تلك التقنية في تضمين حُبيبات مادة البارافيين مُتغيرة الطور المُغلفة مجهرياً بداخل الخرسانة – (**المصدر:** ماريا أليكسيو، ٢٠١٧م[٢٧]).

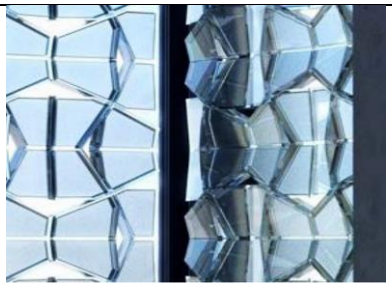
٣-٢. دراسة تحليلية لدمج المواد مُتغيرة الطور في أغلفة المباني التجريبية (قيد التطوير).

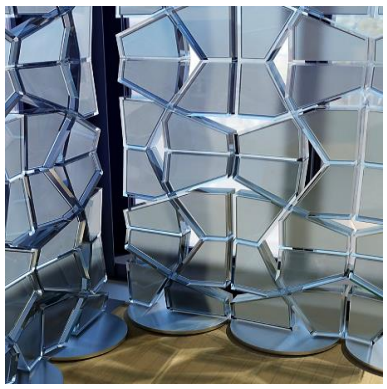
٣-٢-١. تحليل النموذج التجريبي الأول: مشروع الوجه المُزدوج DOUBLE FACE.

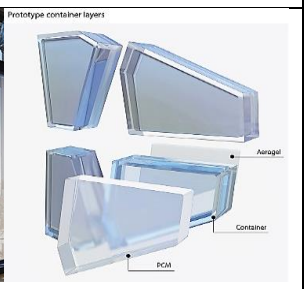
الوجه المُزدوج: نظام للكتلة الحرارية الشفافة القابلة للتعديل	
المشروع: الوجه المُزدوج.	**فريق البحث:** جامعة دلفت للتكنولوچيا Delft University of Technology.
وصف المشروع التجريبي: يهدف المشروع إلى تصميم نظام شفاف قابل للتعديل من شأنه تحسين الراحة الحرارية للمساحة الداخلية بطريقة سلبية، وذلك بواسطة إستخدام لمواد مُتغيرة الطور المدمجة في نظام خفيف الوزن لتخزين الحرارة الكامنة. تم تصميم النظام مع مراعاة المبادئ الحرارية لجدران ترومب كي يوفر عزلاً حراريًا وإمتصاصاً حرارياً بطريقة قابلة للمُعايرة، يمكن ضبطها وفقاً للأحمال الحرارية المختلفة خلال فصل الصيف والشتاء. **الأداء التطبيقي لدمج المواد مُتغيرة الطور بداخل غُلاف المبني:** يقترح المشروع التجريبي نظام مُتكيف يعتمد على عناصر التصميم الداخلي في تعزيز المنافع الحرارية، مستفيداً من السلوك الديناميكي للمادة مُتغيرة الطور إلي جانب المظهر الشكلي. يهدف هذا التصميم إلى تعزيز جماليات المساحة الداخلية، ولذلك صُممت الوحدات المديولية من مواد شفافة يتم وضعها أمام الواجهة الزجاجية لرفع كفاءة الأداء الحراري للمادة مُتغيرة الطور ومن ثم تعزيز مردودها على	

الراحة الداخلية. يتم تعرض تلك الوحدات المديولية للإشعاع الشمسي الشتوي من أجل إكتساب الحرارة وللحماية منه خلال فصل الصيف لتوفير التبريد السلبي.

دور المواد مُتغيرة الطور في رفع كفاءة أداء المبني حرارياً: تم تصميم تلك الوحدات المديولية متحركة كي يتم تغير الوجه (حيث يتم توجيه الوجه المُحتوي على المادة مُتغيرة الطور نحو مصدر الحرارة الواردة في حالة الحاجة لتخزين الحرارة والعكس لإطلاق الحرارة). خلال فصل الشتاء، يوجه الوجة المُتضمن المادة بإتجاه الخارج كي يتم شحنه حرارياً خلال فترة النهار، أما خلال أوقات الليل يتم توجيه الوحدات نحو الداخل لإطلاق الحرارة المُتراكمة للتدفئة. وفي فصل الصيف، يخزن النظام الحرارة نهاراً وأثناء الليل يُطلقها إلى البيئة الخارجية عن طريق التهوية الليلية، وبالتالي يعمل كلوح تبريد.[٢٧]







شكل ١٨. يوضح لقطة منظورية ومُكونات نظام الوجه المُزدوج Double Face، موضحاً مُكونات الوحدات المديولية المُتضمنة مواد تغير الطور – (**المصدر:** ماريا أليكسيو، ٢٠١٧م[٢٧]).

٣-٢-٢. تحليل النموذج التجريبي الثاني: مشروع واجهة قياس الحرارة THERMOMETRIC FACADE.

واجهة رصد وقياس درجة الحرارة الخارجية.

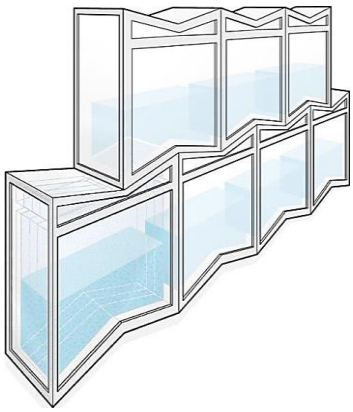
المشروع: واجهة قياس الحرارة.	**المهندس المعماري:** ديفيدسون رافيليديس Davidson Rafailidis.

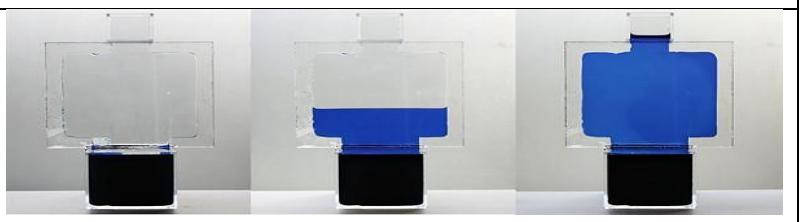
وصف المشروع التجريبي: يهدف المشروع إلي تخليق نظام لواجهة مُكونة من مجموعة من الوحدات المُتراكمة المُخزنة للحرارة الكامنة والمتضمنة مادة تغيير الطور (شمع البارافيين). تستند فكرة المشروع الرئيسية على سلوك التمدد الحراري والحجم لمواد تغيُر الطور القائمة على الشمع، وذلك لإنشاء كتلة زجاجية معيارية هيكلية مُتكيفة (تصبح شفافة ومعتمة إعتماداً على درجة الحرارة المُحيطة). يتكون نظام الجدار من مجموعة وحدات كُتلية مُتراكمة، تنشئ جدراناً ديناميكية مُتفاعلاً مع الظروف البيئية المُتغيرة وفقاً للصياغات المُبرمجة للنظام.

الأداء التطبيقي لدمج المواد مُتغيرة الطور بداخل غُلاف المبني: يقترح المشروع التجريبي أن توفر مواد تغُير الطور القائمة على الشمع داخل الكتل الزجاجية سعة تخزين حرارية فضلاً عن توفر مُستويات مُختلفة من الرؤية بالإعتمادًا على حالة المادة. في حالة إرتفاع درجة الحرارة المُحيطة، يتغير طور المادة من الحالة الصلبة إلي السائلة وبالتالي تملأ حجم الكتلة الزجاجية.

دور المواد مُتغيرة الطور في رفع كفاءة أداء المبني حرارياً وتوفير الراحة الحرارية: ينتُج عن دمج مواد تغُير الطور المُميزات التالية [٢٧]:

- في نطاق درجة حرارة الغرفة النموذجية، تتمتع مادة تغير الطور بسعة تخزين حراري عالية جداً مقارنةً بمواد البناء التقليدية، لأنها تذوب وتتصلب ضمن نطاق حراري مُحدد. وبالتالي يمكن تخزين كمية كبيرة من الحرارة في حجم صغير مما يزيد الكتلة الحرارية للمبنى دون إضافة الكثير من الحجم الإضافي إلى الجدران أو الهيكل.
- تعمل المادة مُتغيرة الطور المُستخدمة على تقليل درجات الحرارة القصوى يومياً كما توفر التبريد خلال النهار والدفء أثناء الليل خلال دورتى الإنصهار والتصلب.
- تزداد درجات الحرارة في الأماكن المغلقة بمعدل أبطأ، وبالتالي يستغرق وقتاً أطول للوصول إلى ذروتها.





شكل ١٩. يوضح لقطة منظورية لنظام واجهة قياس الحرارة المُقترحة، موضحاً مُكونات الرئيسية – (**المصدر:** ماريا أليكسيو، ٢٠١٧م[٢٧]).

النتائـــــج:

- يندرج تطبيق المواد مُتغيرة الطور في أغلفة المباني التكيُفية أسفل تفعيل أنظمة المواد المُنظمة لدرجات الحرارة الداخلية التى تُعزز القدرة الإستجابية لأغلفة المبني كي تتواءم مع مُتغيرات البيئية.
- تُعتبر فئة المواد مُتغيرة الطور العضوية هي من أكثر الفئات القابلة للتطبيق مُقارنةً بغيرها من الفئات الأُخرى وذلك لتعدد مزاياها ولقابليتها لتحسين خواصها أو لإمكانية التغلب على عيوبها، ولكن لابد من إدراجها ضمن نظام مُتكامل يتضمن مجموعة من المواد المُضافة بهدف التصدي لتلك العيوب. وجدير بالذكر أن تقديرات تكلفة تلك الفئة من المواد مُتغيرة الطور ترتبط بالنظام الحاوي لها والمُتضمن مجموعة من المُواد المُركبة المُضافة لتحسين خواصها التشغيلية.
- تُظهر تقنية مواد تخزين الطور تحسيناً ملحوظاً في الأداء الحراري للمبني، سواء عن طريق تقليل الأحمال الحرارية غير المرغوب فيها أو إدارة الطلب المُتزايد على الطاقة بشكل سلبي مُستدام، وبالتالي التأثير بشكل جذري على الراحة الحرارية وتوفير الطاقة.
- تُشكل الظروف المُناخية العوامل الرئيسية المُتحكمة في تحديد كُل من: نوع المادة مُتغيرة الطور الأمثل للتطبيق، كميتها، موضعها الفعال وطريقة الدمج أو التغليف.
- تتحدد وظيفة المادة مُتغيرة الطور تبعاً لموضع دمجها بداخل بنية الغُلاف، فعند تطبيقها بالقرب من الجانب الخارجي للغُلاف في حالة المُناخ الحار تعمل كحاجز حراري عازل، أما في ظل الظروف الباردة تعمل المادة كمورد للحرارة (أي تمنع/تقيد الحرارة التي تتسرب من الداخل إلى الخارج) وبالتالي يتم دمج المادة بالقرب من الجانب الداخلي لغُلاف المبني.

من خلال الدراسة المسحية للبحث (المسح الإستقصائي للدراسات السابقة)، نستنتج الآتي:

- زيادة نسبة الدراسات التى تناولت دمج المواد مُتغيرة الطور في غُلاف المبنى مُقارنةً بالدراسات التى تناولت دمجها في الأسطح والحوائط تُقدر بنسبة ٤:٢:١ على التوالي. **(إستنتاج الباحثة وفقاً لما ورد في جدول ٤)**
- تعدُد الدراسات التى تناولت تطبيق المواد مُتغيرة الطور لتقليل أحمال التبريد مُقارنةً بغيرها التى تناولت تطبيقها لتقليل أحمال التدفئة والتبريد معاً بنسبة ١:٢. **(إستنتاج الباحثة وفقاً لما ورد في جدول ٤)**
- ينتج عن دمج المواد متغيرة الطور في الأرضيات خفض أحمال التبريد بنسبة تصل إلي ٨٩% (وفقاً لدراسة ناجانو (٢٠٠٦م))، بينما تنخفض أحمال التبريد عند دمجها في الحوائط بنسبة تتراوح ما بين ٣،٦% (وفقاً لدراسة جيونج وآخرون (٢٠١٩م)) إلي ٧٣% (وفقاً لدراسة لاخضري والشيخ (٢٠١٨م))، كما تصل أكبر نسبة توفير سنوي للطاقة في كل من النرويج (بنسبة ٢٨%)، كما تم رصد أكبر نسبة توفير للطاقة سنوياً بحوالي ٢٨% (وفقاً لدراسة تساو ويوي (٢٠١٩م) التى أُجريت في أوسلو بالنرويج)، بينما تم رصد أقل توفير سنوي للطاقة بمُتوسط يتراوح بين ١،٩٤ إلي ٥،١٥% (وفقاً لدراسة جسار ويون (٢٠١٧م) التى أُجريت في هونج كونج بالصين).**(مُستخلص من جدول ٤)**
- ينتُج عن دمج المواد مُتغيرة الطور في عناصر غُلاف المبني المُختلفة (خاصةً الحوائط) خفض التدفق الحراري بنسبة تتراوح بين ١٥% (وفقاً لدراسة فتح وآخرون (٢٠١٧م)) إلي ١٧،٣٨% (وفقاً لدراسة راثور وآخرون (٢٠٢٠م))، بينما يؤدي دمج المواد مُتغيرة الطور إلي خفض درجة الحرارة الداخلية بمقدار ٢،٠٤°م (وفقاً لدراسة سوفيتوفا وآخرون (٢٠١٩م) التى أُجريت في السعودية ومصر)، فضلاً عن زيادة ساعات الشعور بالراحة الحرارية لمدة تزيد عن ١٢ ساعة على مدار اليوم الواحد (كما ورد في دراسة سو وداركوا (٢٠٢٠م) التى أُجريت في الصين). **(مُستخلص من جدول ٤)**

التوصيـــات:

توصي الدراسة البحثية المُصممين بأهمية التواصل الفعال مع مراكز البحوث العلمية المُتخصصة في مجال علوم المواد، فضلاً عن ضرورة الإنضمام إلي طاولة تصميم المواد كمُشاركين رئيسيين ضمن فريق العمل العلمي بهدف إحداث تحول جذري في مجال علوم المواد، حيث يتحول علم المواد من مجال يشرح المواد إلي مجال يُصمم المواد كي تتسم بخواص تتلائم مع المُتطلبات التصميمية والأدائية المنصوص عليها من قبل المُصمم ولتحقيق الوظائف التطبيقية المرجوة، وهو الأمر الذي ينتُج عنه توليد مفاهيم تخليقية وتوليفية جديدة في مجال علوم المواد المُتقدمة. **كما توصي أيضاً بالآتي:**

- ضرورة قيام المنظمات والمؤسسات المسئولة بتبنيها لحلول وتطبيقات التبريد السلبي في المشروعات القومية، بالإضافة إلي مُناشدة الجهات البحثية بأهمية العمل البحثي المُكثف للإرتقاء بتلك الفئة من المواد من أجل تحسين تطبيقاتها وإنتشارها بشكل موسع.
- دفع عجلة البحوث العلمية بإتجاه إبتكار مواد مُتقدمة تُزيد من كفاءة الأداء الحراري لأغلفة المباني ضمن إطار مفهوم التكيف السلبي من أجل تحقيق التوافق البيئي مع المُتغيرات الحالية والمُستقبلية.

المراجـــــــــع:

[1] Ürge-Vorsatz, Diana, et al., Renewable and Sustainable Energy Reviews 41 (2015).
[2] IEA, The Future of Cooling, IEA, Paris, 2018. https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling. (Accessed 11 November 2021).
[3] Scalisi, Francesca., FROM MEGA TO NANO: 44. (2020).

[4] IEA, 2019 global status report for buildings and construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. https://www.unenvironment.org/resources/publication/2019-global-status-report-buildings-and-construction-sector. (Accessed 11 November 2021).
[5] Gan, Vincent JL, et al., Journal of Cleaner Production 254 (2020).
[6] Lotfabadi, Pooya, and Polat Hançer, Sustainability 11.13 (2019).
[7] Far, Claire, and Harry Far., Indoor and Built Environment 28.6 (2019).
[8] Wang, Huakeer, et al., Renewable Energy 145 (2020).
[9] Nada, S. A., W. G. Alshaer, and R. M. Saleh., Alexandria Engineering Journal 58.4 (2019).
[10] Ye, H., Y. Wang, and F. Qian., Sustainable Buildings and Structures: Building a Sustainable Tomorrow. CRC Press, 2019.
[11] Afolabi, Lukmon Owolabi, et al., Solar Energy 181 (2019).
[12] T. Roberts, We spend 90% of our time indoors. Says who? https://www.buildinggreen.com/blog/we-spend-90-our-time-indoors-says-who, (Accessed ٢٧ October ٢٠٢١).
[13] Fanger, Poul O., Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. (1970).
[14] ANSI/ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, Thermal environmental conditions for human occupancy, Encycl. Financ. http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2015/11/ASHRAE-55-2010.pdf, 2010, (Accessed ٢٧ October ٢٠٢١).
[15] Perino, Marco, and Valentina Serra., Journal of Facade Design and Engineering 3.2 (2015).
[16] Aelenei, Daniel, Laura Aelenei, and Catarina Pacheco Vieira., Energy Procedia 91 (2016).
[17] Arnesano, Marco, et al., 2019 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N). IEEE, 2019.
[18] Tucci, F., Nature's paradigms for designing architectural envelopes, Agathon 2 (2017).
[19] Kasinalis, Charalampos, et al., Energy and Buildings 79 (2014).
[20] IEA, Energy efficient building envelopes, https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-energy-efficient-building-envelopes, (Accessed ٢٧ October ٢٠٢١).
[21] DOE, US., Quadrennial Technology Review. United States Department of Energy (2015).
[22] Farid, Mohammed M., et al., Energy conversion and management 45.9-10 (2004).
[23] Gadhave, Pitambar, et al., International Journal of Ambient Energy (2021).
[24] Frigione, Mariaenrica, Mariateresa Lettieri, and Antonella Sarcinella., Materials 12.8 (2019).
[25] Navarro Farré, Lidia. Thermal energy storage in buildings through phase change materials (PCM) incorporation for heating and cooling purposes. Diss. Universidad de Lleida, 2016.
[26] Muruganantham, Karthik. Application of phase change material in buildings: field data vs. EnergyPlus simulation. Arizona State University, 2010.
[27] Alexiou, Maria. "Adaptive Facade System based on phase change materials." (2017).
[28] Cui, Yaping, et al., Advances in Mechanical Engineering 9.6 (2017).
[29] Cui, Yaping, et al., Procedia Engineering 121 (2015).
[30] Martjanova, I., M. Miraliyari, and T. Kakolyri. "Smart Efficient Lightweight Facade." (2014).
[31] Al-Absi, Zeyad Amin, Mohd Hafizal Mohd Isa, and Mazran Ismail., Sustainability 12.4 (2020).

[32] Topličić-Ćurčić, Gordana, et al. "Phase change materials (PCMs)-innovative materials for improvement of energy efficiency of buildings", 2018.
[33] Tyagi, V. V., et al., Energy and Buildings 117 (2016).
[34] Al-Absi, Zeyad Amin Abdo Saeed, Mohd Hafizal Mohd Isa, and Mazran Ismail., International Conference on Architecture and Civil Engineering Conference. Springer, Singapore, 2018.
[35] Ismail, Mazran., The Advances in Civil Engineering Materials (2019).
[36] Chandel, S. S., and Tanya Agarwal., Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017).
[37] Pasupathy, A_, R. Velraj, and R. V. Seeniraj., Renewable and Sustainable Energy Reviews 12.1 (2008).
[38] Madhumathi, A. A., and B. M. C. Sundarraja., International Journal of Energy & Environment 3.5 (2012).
[39] Soares, Nelson Miguel Lopes. Thermal energy storage with phase change materials (PCMs) for the improvement of the energy performance of buildings. Diss. 2016.
[٤٠] Nessim, Marian A., and Sarah A. Elariane, 1st International Conference on Towards a Better Quality of Life. 2017.
[٤١] Aguado, A., et al., Mater. Construc. 64.315 (2014).
[٤٢] Frigione, Mariaenrica, Mariateresa Lettieri, and Antonella Sarcinella., Materials 12.8 (2019).
[٤٣] Jelle, B. P., and S. E. Kalnæs., Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting (2017).
[٤٤] Yu, Jinghua, et al., Energy Procedia 158 (2019): 3045-3051.
[٤٥] Jin, Xing, Mario A. Medina, and Xiaosong Zhang, Applied Thermal Engineering 103 (2016).
[٤٦] Lagou, Androniki, et al., Construction and Building Materials 225 (2019).
[٤٧] Darvishi, Faryar, et al., 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET). IEEE, 2019.
[48] Al-Yasiri, Qudama, Mushtaq A. Al-Furaiji, and Ahmed K. Alshara., J. Eng. Technol. Sci. 51.5 (2019).
[٤٩] Yun, Hyun-Do, et al., International Journal of Concrete Structures and Materials 13.1 (2019).
[٥٠] D'Alessandro, Antonella, et al., Applied energy 212 (2018).
[٥١] Frazzica, Andrea, et al., Solar Energy Materials and Solar Cells 193 (2019).
[٥٢] Younsi, Zohir, and Hassane Naji., Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 140.3 (2020).
[٥٣] Abden, Md Jaynul, et al., Applied Energy 259 (2020).
[٥٤] Li, Chaoen, et al., Journal of Building Engineering 28 (2020).
[٥٥] Hu, Jianying, and Xiong Yu., Solar Energy 193 (2019).
[٥٦] Ahangari, Mohamad, and Mehdi Maerefat., Sustainable Cities and Society 44 (2019).
[٥٧] de Gracia, Alvaro., Applied energy 235 (2019).
[٥٨] Kong, Xiangfei, et al., Solar Energy 195 (2020).