ISSN: 2410-7727

من التلوث إلى التشييد: تصميم وتقييم طوب البناء الهجين من مخلفات البلاستيك والسيراميك (مراجعة علمية شاملة)

FROM POLLUTION TO CONSTRUCTION: DESIGN AND EVALUATION OF HYBRID BUILDING BRICKS FROM PLASTIC AND CERAMIC WASTE (A COMPREHENSIVE SCIENTIFIC REVIEW)

صلاح عبدالله أحمد حسان[1]

د.مروان فرحان سيف حسن الكمالي[2،*]

[1] مهندس معماري، المنظمة العلمية للبحوث والابتكارات، الجمهورية اليمنية ، مهندس معماري في شركة العمارة المستدامة للاستشارات الهندسية

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

ISSN: 2410-7727

ISSN: 2410-7727

من التلوث إلى التشييد: تصميم وتقييم طوب البناء الهجين من مخلفات البلاستيك والسيراميك (مراجعة علمية شاملة)

صلاح عبدالله أحمد حسان[1]، د.مروان فرحان سيف حسن الكمالي[2،*]

[1] مهندس معماري، الجمعية العلمية للبحوث والابتكارات، الجمهورية اليمنية، مهندس معماري في شركة العمارة المستدامة للاستشارات الهندسية

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

الملخص:

يقدم هذا البحث تقييماً استقصائياً للطوب البلاستيكي، باعتباره حلاً للبناء الأخضر، مع التركيز على المواد المركبة التي تتكون من بلاستيك مُعاد استخدامه مع سيراميك. يسعى المشروع إلى حل المشكلات المرتبطة بالنفايات البلاستيكية والعبء البيئي الناجم عن أساليب البناء التقليدية.

يُدمج الطوب البلاستيكي بنجاح بين كفاءة معالجة النفايات وتصنيع مواد بناء صديقة للبيئة. يتم فحص مجموعة متنوعة من أساليب الإنتاج، بما في ذلك العمليات الميكانيكية والكيميائية والحرارية، لإثبات قدرتها على إنتاج مواد طويلة الأمد تتمتع بخصائص ميكانيكية وحرارية متميزة.

تشير البيانات إلى أن الطوب البلاستيكي المُعزز بالسيراميك يحقق قوة ضغط تتراوح بين 10 و25 ميجا باسكال، بالإضافة إلى قيمة توصيل حراري تتراوح بين 0.18 و0.28 واط/متر كلفن. كما يُظهر هذا الطوب مقاومة أكبر للماء والمواد الكيميائية، حيث تُشير معدلات امتصاص الماء إلى أقل من 0.5% مقارنةً بنسبة 10-20% في الطوب العادي. يُشير البحث إلى توفير في الطاقة بنسبة 65-75% وانخفاض في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة 2.5-3.5 كجم لكل طوبة مُنتجة.

من خلال إعادة استخدام كميات كبيرة من النفايات البلاستيكية وإبعادها عن مواقع التخلص من النفايات، تُزيد هذه الطريقة من عمر هذه المواقع بنسبة 25-30%. ومع ذلك، لا تزال هناك مشاكل تتعلق بمدة صلاحية المواد، وقدرتها على تحمل الحرائق، والمعايير التنظيمية المعمول بها. ويُختتم البحث بنصائح رئيسية لمزيد من التطوير والتطبيق بما يتماشى مع أهداف الاقتصاد الدائري.

الكلمات المفتاحية: الطوب البلاستيكي، البناء الصديق للبيئة، إعادة الاستخدام، المواد المركبة، الاقتصاد الدائري..

ISSN: 2410-7727

FROM POLLUTION TO CONSTRUCTION: DESIGN AND EVALUATION OF HYBRID BUILDING BRICKS FROM PLASTIC AND CERAMIC WASTE (A COMPREHENSIVE SCIENTIFIC REVIEW)

Salah Abdullah Ahmed Hassan[1], Dr.Marwan F. S. H. Al-Kamali [2,]

1Architect, Scientific Society for Research and Innovation, Republic of Yemen, Architect at Sustainable Architecture Engineering Consultants
2Technical Ceramics and Nanomaterials Research Laboratories, junior research & Ph.D. associate Professor Department of "Industrial Electronics" at Sukhoi State Technical University, Gomel, 246029, Republic of Belarus., Scopus: 58547258100, https://orcid.org/0009-0004-3503-1373 .

ABSTRACT

This research offers an investigative assessment of plastic bricks viewed as a green building solution, emphasizing combined materials that consist of repurposed plastics combined with ceramics. The project seeks to resolve the linked problems of plastic waste and the ecological burden from standard construction methods.

Plastic bricks successfully incorporate efficient waste handling with the making of environmentally friendly building materials. A variety of production approaches, including mechanical, chemical, and thermal processes, are examined to demonstrate their capacity to produce long-lasting items that possess outstanding mechanical and thermal qualities.

The data indicates that plastic bricks enhanced with ceramic achieve a compression strength of 10–25 MPa along with a thermal conductivity value of 0.18–0.28 W/mK.

These materials also exhibit greater resistance to water and chemicals, showing water absorption rates of less than 0.5% compared to the 10–20% seen in regular bricks. The research identifies energy savings of 65-75% and a decrease of 2.5-3.5 kg in CO_2 emissions for each brick produced.

By repurposing significant quantities of plastic waste and keeping it out of waste disposal sites, this method increases the lifespan of these sites by 25-30%. Nevertheless, problems continue to exist concerning how long the materials last, their ability to withstand fire, and the applicable regulatory standards. The research closes with key advice for further advancements and uptake in line with the objectives of a circular economy.

Keywords: Plastic bricks, environmentally friendly construction, repurposing, combined materials, circular economy.

ISSN: 2410-7727

I. المقدمة

يتميز العصر الحالي، المعروف على نطاق واسع باسم الأنثروبوسين، بمجموعة غير مسبوقة وعميقة من التغييرات في أنظمة الأرض المعقدة، والتي نتجت جميعها في المقام الأول عن الأنشطة والسلوكيات البشرية ذات الآثار بعيدة المدى. ومن بين أكثر هذه التغييرات انتشارًا وإثارة للقلق أزمة التلوث البلاستيكي العالمية، التي برزت كتحدٍ بيئي كبير يؤثر على النظم البيئية وصحة الإنسان على حد سواء.

منذ بداية الإنتاج الضخم للبلاستيك والذي بدأ بجدية خلال خمسينيات القرن الماضي، أنتجت البشرية بشكل مذهل إجماليًا هائلاً يزيد عن 8.3 مليار طن متري من المواد البلاستيكية، مع تسارع كبير في وتيرة الإنتاج من مليوني طن فقط سنويًا في عام 1950 إلى رقم مذهل يتجاوز الآن 400 مليون طن في السنوات الأخيرة، لقد تحولت مرونة البوليمرات الاصطناعية، والتي كانت تحظى في السابق بالثناء والاحتفاء بسبب متانتها وفائدتها المذهلة في تطبيقات مختلفة، بشكل مأساوي إلى لعنة بيئية؛ حيث تظل هذه المواد الاصطناعية موجودة في النظم البيئية المتنوعة لعدة قرون، وتخضع لعمليات تجزئة تجعلها أصغر حجمًا ولكنها لا تؤدي إلى تدهورها الكامل، وبالتالي تستمر في تشكيل تهديدات كبيرة للتنوع البيولوجي والسلامة البيئية.[1-6]

يمثل مسار النفايات البلاستيكية والتخلص منها في النهاية مسألة مثيرة للقلق والإلحاح الشديدين في الخطاب البيئي. ووفقًا للتقييمات المعاصرة، فقد تم تحديد أن 9٪ فقط من جميع النفايات البلاستيكية التي تم توليدها على الإطلاق قد خضعت لعملية إعادة التدوير، بينما تعرض ما يقرب من 12٪ للحرق، مما يترك 79٪ من هذه المواد تتراكم باستمرار في مكبات النفايات أو تتسلل إلى البيئة الطبيعية بأشكال مختلفة [1-3].

لا يقتصر هذا التراكم المقلق للنفايات البلاستيكية على مكانة بيئية واحدة ولكنه واضح عبر مجموعة متنوعة من النظم البيئية، بدءًا من الأعماق السحيقة للخنادق المحيطية إلى الارتفاعات المعزولة لأكثر سلاسل الجبال النائية في جميع أنحاء العالم. إن التداعيات على البيئة عميقة ومعقدة، حيث لا تتورط حطام البلاستيك الكبير الحجم فحسب، بل تستهلكه أيضًا مجموعة واسعة من الأنواع البحرية والبرية، مما يؤدي في النهاية إلى زيادة معدلات الوفيات؛ علاوة على ذلك، فقد تغلغل انتشار الجسيمات البلاستيكية الدقيقة والنانوية في شبكات الغذاء، مع توثيق حالات تناول هذه الجسيمات من قِبل كائنات حية، بدءًا من العوالق الدقيقة ووصولًا إلى البشر أنفسهم. إضافةً إلى ذلك، يُشكل تسرب المواد الكيميائية الضارة، مثل الفثالات والبيسفينول أ، إلى جانب الملوثات البيئية الممتصة، تهديدًا سميًا مستمرًا يُشكل مخاطر جسيمة على النظم البيولوجية والسلامة البيئية[1-5].

ISSN: 2410-7727

II. مراجعة الادبيات :

تُعدّ الآثار المالية لهذه الأزمة مُذهلة ومتعددة العوامل، حيث يُقدّر برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) أن الضرر الاقتصادي السنوي الذي يلحق بالنظم البيئية البحرية وحدها يُقدر بنحو 13 مليار دولار، مما يُؤكد الحاجة المُلحة إلى استراتيجيات شاملة لمعالجة هذا التحدي البيئي المُستفحل والتخفيف من حدته لذا، من الضروري أن ندرس الأبعاد المُتعددة الجوانب للتلوث البلاستيكي لصياغة سياسات فعّالة يُمكن أن تُؤدي إلى تغيير هادف والحفاظ على النظم البيئية لكوكبنا بالتوازي مع أزمة البلاستيك تُمثل صناعة البناء العالمية قطاعًا ضخمًا من حيث استهلاك الموارد والتأثير البيئي. فهي، كقطاع، أكبر مستهلك للمواد الخام عالميًا، حيث تُمثل ما بين 40٪ و50٪ من إجمالي الاستهلاك السنوي، أي ما يُعادل حوالي 60 مليار طن من المواد (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، 2022). ويشمل ذلك كميات هائلة من الرمل والحصى والطين والحجر الجيري، التي يؤدي استخراجها إلى تدمير الموائل وتآكل التربة واستنزاف طبقة المياه الجوفية.[6-10]

إن إنتاج مواد البناء التقليدية يستهلك طاقةً كثيفةً بشكلٍ استثنائي، وهو مصدرٌ رئيسيٌّ لانبعاثات غازات الاحتباس الحراري. يُعدّ إنتاج الأسمنت، المادة الرابطة الرئيسية في الخرسانة، مسؤولاً عن حوالي 8٪ من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية من صنع الإنسان ولو كان بلداً، لاحتلّ المرتبة الثالثة عالمياً من حيث انبعاثات ثاني أكسيد الكربون [9] وبالمثل، فإنّ حرق الطوب الطيني في الأفران، التي غالباً ما تعمل بالفحم أو أنواع الوقود الأحفوري الأخرى، يُصدر كمياتٍ كبيرةً من ثاني أكسيد الكربون والجسيمات وأكاسيد الكبريت كما تُعدّ هذه الصناعة مُولّداً هائلاً للنفايات، حيث تُساهم بنسبة 35-40٪ من إجمالي مجاري النفايات الصلبة في الدول المتقدمة.

إنّ تجاور هاتين الأزمتين، وفرة النفايات البلاستيكية وطبيعة البناء كثيفة الموارد، يُمثّل فرصةً مُقنعةً لإيجاد حلٍّ مُتقارب.

والمبدأ الأساسي هو مبدأ التكافل الصناعي والاقتصاد الدائري: تحويل مجرى نفاياتٍ مُشكّلٍ للمشكلات إلى موردٍ قيّمٍ لصناعةٍ كبيرة الحجم. يتماشى هذا النهج بشكل مباشر مع مبادئ الاقتصاد الدائري، الذي يسعى إلى التخلص من النفايات وتداول الموارد بأعلى قيمة لها لأطول فترة ممكنة [9].

في هذا الإطار، برز تطوير وحدات بناء من الطوب البلاستيكي، المصنوعة أساسًا من نفايات بلاستيكية مُعاد تدويرها، كإبداع واعد بشكل خاص.

لا يُعد هذا مجرد استراتيجية لإدارة النفايات، بل نقلة نوعية في علم المواد، يهدف إلى ابتكار مواد بناء جديدة لا تقتصر آثارها الضارة بالبيئة على كونها أقل ضررًا فحسب، بل تتميز أيضًا بخصائص وظيفية فريدة.

ISSN: 2410-7727

الفوائد المحتملة مزدوجة: أولًا، يوفر هذا النهج بالوعة دائمة عالية الحجم للنفايات البلاستيكية، مما يحولها من مكبات النفايات والمحيطات؛ ثانيًا، يُقلل الطلب على مواد البناء التقليدية كثيفة الكربون، مما يُقلل من الكربون المتضمن في البيئة المبنية.

تُعطي التسلسلات الهرمية التقليدية لإدارة النفايات الأولوية للتخفيض وإعادة الاستخدام على إعادة التدوير واستعادة الطاقة، مع اعتبار التخلص منها كملاذ أخير. ومع ذلك، بالنسبة لمخزون النفايات البلاستيكية الحالي والمستقبلي، فإن إعادة التدوير المُتقدمة والتثمين أمران بالغي الأهمية. إعادة التدوير الميكانيكي، وهو الشكل الأكثر شيوعًا، غالبًا ما يؤدي إلى إعادة تدوير منتجات أقل جودة وقيمة. أما إعادة التدوير "الحلقة المفتوحة" فتؤدي غالبًا إلى منتجات غير قابلة لإعادة التدوير في نهاية المطاف، مما يؤدي فقط إلى تأخير التخلص النهائي منها[13-16].

يُمثل تثمين النفايات البلاستيكية وتحويلها إلى مواد بناء شكلاً من أشكال "إعادة التدوير للأفضل"، أو على الأقل، تطبيقًا عالي القيمة وطويل العمر. يتمتع الطوب أو حجر الرصف بعمر افتراضي يُقاس بعقود أو قرون، مما يعزل البلاستيك بفعالية داخل البيئة المبنية ويمنع تسربه إلى النظم الطبيعية. وهذا يميزه بشكل حاسم عن المنتجات البلاستيكية أحادية الاستخدام أو السلع الاستهلاكية قصيرة العمر. إن حجم صناعة البناء يعني قدرتها على استيعاب كميات كبيرة من النفايات البلاستيكية. على سبيل المثال، فإن استبدال 5٪ فقط من الإنتاج السنوي العالمي من الطوب التقليدي بالطوب البلاستيكي قد يُؤدي إلى استخدام ملايين الأطنان من النفايات البلاستيكية سنويًا.

يتجاوز الاهتمام العلمي بالطوب البلاستيكي إدارة النفايات إلى خصائصه المادية الجوهرية حيث غالبًا ما يُظهر البلاستيك، مثل المواد البوليمرية، خصائص مرغوبة في البناء، بما في ذلك[1-9]:

- **الموصلية الحرارية المنخفضة** حيث أن معظم المواد البلاستيكية موصلة رديئة للحرارة، وهو ما قد يؤدي إلى تعزيز خصائص العزل الحراري في أغلفة المباني مما يقلل من الطلب على الطاقة التشغيلية للتدفئة والتبريد.
- **كثافة منخفضة** فعادةً ما يكون الطوب البلاستيكي أخف وزنًا من نظيراته المصنوعة من الطين أو الخرسانة، مما يُقلل الأحمال الساكنة على الهياكل ويُبسط النقل ويُخفض تكاليف المناولة.
- **المقاومة الكيميائية** حيث تتميز العديد من المواد البلاستيكية بمقاومة عالية للماء والأملاح والتأثيرات الكيميائية مما يُتيح متانة فائقة في البيئات القاسية مثل المناطق الساحلية أو البيئات الصناعية.
- **الليونة** فعلى عكس السيراميك التقليدي الهش يُظهر البلاستيك ليونة كبيرة مما يُحسّن من مقاومة الصدمات وتحمل التلف.

ISSN: 2410-7727

يكمن التحدي الذي يواجه علماء المواد في تسخير هذه الخصائص المفيدة مع التغلب على نقاط الضعف الكامنة، مثل انخفاض قوة الضغط، والحساسية للتحلل بالأشعة فوق البنفسجية، والقابلية للاحتراق، من خلال صياغة ذكية وتصميم مركب وتقنيات معالجة وعلى الرغم من الإمكانات الواعدة للطوب البلاستيكي إلا أن انتقاله من مجرد فضول مختبري إلى مادة بناء شائعة يعوقه عوائق علمية وتقنية واجتماعية واقتصادية كبيرة تكمن المشكلة الأساسية في نقص الأدلة الشاملة والنقدية والموحدة للتحقق من أدائه واستدامته وجدواه الاقتصادية على نطاق تجاري وفي الجداول [1-4] سنلخص التحديات التقنية وأداء الطوب البلاستيكي من خلال التحليل المقارن للادبيات[8-16].

الجدول 1 : التحديات الهيكلية والميكانيكية للطوب البلاستيكي

التحدي	الوصف التفصيلي	التأثير على الأداء	الحلول المقترحة
سلوك الزحف طويل الأمد	تشوه مستمر تحت حمل ثابت لفترات طويلة	انخفاض المقاومة الهيكلية مع الزمن	استخدام بوليمرات متشابكة ومضافات تعزيز
مقاومة التعب	تدهور الخصائص تحت أحمال متكررة	تقليل العمر الافتراضي	تصميم هياكل مركبة معززة
الأداء تحت إجهادات مركبة	ضعف الاستجابة تحت ضغط وقص متزامن	خطر الانهيار المفاجئ	تحسين التصميم الهندسي

الجدول 2 - تحديات المتانة والاستدامة للطوب البلاستيكي

التحدي	الآلية	معدل التدهور	طرق الوقاية
الأشعة فوق البنفسجية	تكسير الروابط البوليمرية	20 – 40 % فقدان قوة خلال سنتين	إضافات UV ومثبطات
الدورات الحرارية	إجهادات داخلية متكررة	تشققات سطحية وتقشر	معامل تمدد حراري متوافق
التأكسد	هجوم جذري حر للأكسجين	فقدان مرونة وتصلب	مضادات أكسدة فعالة

ISSN: 2410-7727

الجدول 3 - تحديات السلامة من الحرائق للطوب البلاستيكي

التحدي	مستوى الخطورة	المتطلبات القياسية	الحلول المتاحة
قابلية الاشتعال	عالي(Class III)	تصنيف UL94 V-0	مثبطات لهب فوسفورية
انتشار اللهب	متوسط-عالي	مؤشر انتشار اللهب <25	طلاءات غير قابلة للاشتعال
انبعاث الدخان	عالي	كثافة دخان <450	إضافات مخفضة للدخان

الجدول 4 - إستراتيجيات التحسين والتطوير للطوب البلاستيكي

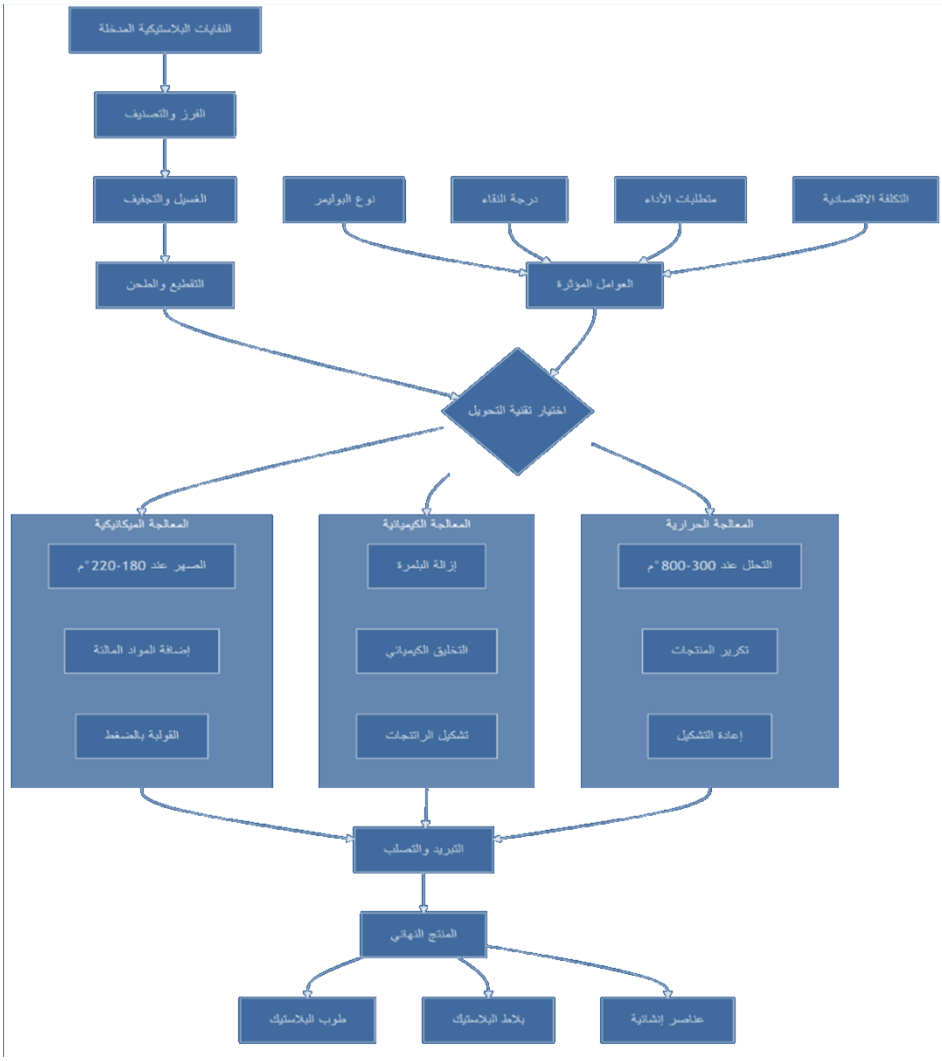
مجال التحسين	التقنية المطبقة	النتائج المتوقعة	الجدول الزمني
تحسين التجانس	فرز آلي متقدم خلط محوسب	تقليل التباين إلى <5%	6 – 12 شهر
تعزيز المتانة	طلاء نانوي مركب	زيادة العمر الافتراضي بنسبة 40%	12 – 18 شهر
تحسين السلامة	تركيبات خالية من الهالوجين	تحقيق تصنيف UL94 V-0	18 – 24 شهر

ومن خلال مراجعة الادبيات لاحظنا أن الطوب البلاستيكي تُواجه تحديات تقنية في السلامة الهيكلية والمتانة طويلة الأمد ومقاومة الحرائق وذلك مع نقص في البيانات الموثقة حول أدائها تحت الضغوط المختلفة وتأثير العوامل البيئية كما تفتقر إلى تقييمات دورة الحياة الشاملة التي تُثبت مزاعمها البيئية وتضمن استدامتها مقارنة بالمواد التقليدية.

III. تخليق وتوصيف وحدات البناء المشتقة من البلاستيك: بروتوكولات التصنيع وخصائص المواد

في الشكل1 مخطط يبين مراحل اعادة تدوير النفايات البلاستيكية والية ادخالها في وحدات البناء (طوب، بلاط، وغيرها....) والتي يتم توليفها البلاستيك المعاد تدويره ومواد اخرى التي تستعمل في البناء .

ISSN: 2410-7727



شكل 1. مخطط لاعادة تدوير النفايات البلاستيكية وادخالها في مواد البناء

ومن المخطط نلاحظ أن الية تدويرالنفايات البلاستيكية تمر بعدة مراحل قبل الحصول على المنتج النهائي الذي سيتعمل للبناء وهي كالاتي:

1. مرحلة التحضير وفيها يتم :

a. الفرز والتصنيف وفيها يتم فرز البلاستيك حسب النوع (PET, HDPE, PP, LDPE)، فصل البلاستيك الملون عن الشفاف وإزالة المواد غير البلاستيكية (معادن، أوراق، أتربة)

ISSN: 2410-7727

b. الغسيل والتجفيف حيث يتم فيها غسيل البلاستيك بمحاليل تنظيف متخصصة كذلك إزالة البقايا العضوية والملصقات وايضاً تجفيف كامل لمنع تكون فقاعات أثناء الصهر.
c. التقطيع والطحن حيث يتم تقطيع العبوات الكبيرة إلى قطع صغيرة وتطحنها وتنعيمها لتصبح سهلة للانصهار.

2. مرحلة المعالجة الحرارية حيث يتم تحديد درجات الحرارة حسب نوع البوليمير (البلاستيك المعاد فرزة من المخلفات البلاستيكية).

الجدول 5 - انواع البليمرات التي يتم فرزها من المخلفات البلاستيكية ودرجات حرارة الصهر [1-10]:

نوع البوليمر	درجة حرارة الصهر(درجة مئوية)	درجة حرارة التشكيل (درجة مئوية)	محسنات الأداء التي يتم اضافتها
PET	280 – 260	260 – 240	○ **مثبطات اللهب :**لتحسين مقاومة الحريق ○ **مثبطات الأشعة فوق البنفسجية :**للحماية من التدهور الضوئي ○ **الملدنات :**لتحسين المرونة ○ **الحشوات :**لتحسين القوة والمتانة
HDPE	140 – 130	130 – 120	
PP	170 – 160	160 – 150	
LDPE	115 – 105	110 – 95	

3. بعد المعالجة الحرارية تأتي مرحلة تشكيل المنتجات النهائية المراد الحصول عليها وتمر بالاتي :
   a. القولبة بالضغط وفيها يتم ضبط المعلمات التالية:
      i. ضغط يتراوح بين 5-15 ميجاباسكال
      ii. زمن ضغط 2-5 دقائق
      iii. إنتاج طوب بكثافة عالية وأبعاد دقيقة.
   b. البثق وفيها ايضاً يجب مراعاة :
      i. إنتاج مستمر للمقاطع الطولية
      ii. قطع آلي حسب الأطوال المطلوبة
      iii. ملاءمة للإنتاج واسع النطاق
4. بعد مرحلة القولبة او وضع المصهور في قوالب تأتي مرحلة التبريد والتصلب والتي يتم فيها التأكد من جودة العينات التي تم انتاجها ولابد أثناء التبريد مراعاة مايلي :

ISSN: 2410-7727

c. أنظمة التبريد وفيها يتم التحكم بالاتي :
   i. التبريد التدريجي لمنع التشقق
   ii. التحكم في معدل التبريد (20-60 دقيقة)
   iii. معالجة نهائية لتحسين الخصائص.
d. اختبارات الجودة وفيها يتم التأكد من :
   i. اختبارات قوة الضغط والانحناء
   ii. قياس الأبعاد والدقة الهندسية
   iii. فحص المتانة والمقاومة الكيميائية

5. في اخر مرحلة تنتج المنتجات النهائية والتي لها المواصفات التي قمنا بتلخيها في الجدول 6 :

جدول 6 - خصائص ومميزات المنتجات النهائية التي يتم التحصل عليها

المنتج	الخصائص	مميزات المنتج النهائي
الطوب البلاستيكي	• أبعاد قياسية (20×10×5 سم) • تركيب مسامي للعزل الحراري • سطح مضاد للانزلاق	• خفيف الوزن (نصف وزن الطوب التقليدي) • عازل حراري ممتاز • مقاوم للماء والرطوبة • متانة عالية وقابلية لإعادة التدوير • تركيب سريع وسهل
البلاط البلاستيكي	• سماكات مختلفة (2-5 سم) • تشطيبات سطحية متعددة • مقاوم للعوامل الجوية	
العناصر الإنشائية	• كمرات ودعامات • ألواح تقسيم • عناصر ديكورية	

وحسب الادبيات فأن جودة المنتجات والتي تم تصميمها حسب تقنيات مختلفة من اعادة التدوير يمكن تلخيها في الجداول [7 – 14] والذي يتم فيه المقارنة بين التناسب ودرجات الحرارة والجودة للمنتجات .

ISSN: 2410-7727

الجدول 7 - مقارنة جودة المنتجات النهائية حسب التقنيات المصنعة حسب تقنية اعادة التدوير

№	تقنية اعادة التدوير	التناسب	درجة الحرارة (درجة مئوية)	جودة المنتج	الطاقة المستهلكة	الشروط الحرجة للنجاح
1	الميكانيكية	• أنسب للبولي أوليفينات (LDPE, HDPE, PP) • كفاءة طاقة عالية • منتج متجانس	220 – 180	متوسطة - عالية	منخفضة	• التحكم في درجة الحرارة ضمن النطاق الأمثل • زمن المعالجة المناسب لكل بوليمر • نسبة المواد المالئة المحسوبة بدقة • ظروف التبريد المتحكم بها
2	الكيميائية	• معالجة المعادن البوليمرات (PET, PS) • إزالة الشوائب العضوية • منتج عالي الجودة	300 – 200	عالية	متوسطة	
3	الحرارية	• معالجة المخلفات المختلطة • إنتاج وقود ومواد خام • مرونة في المدخلات	800 – 300	متغيرة	عالية	

ISSN: 2410-7727

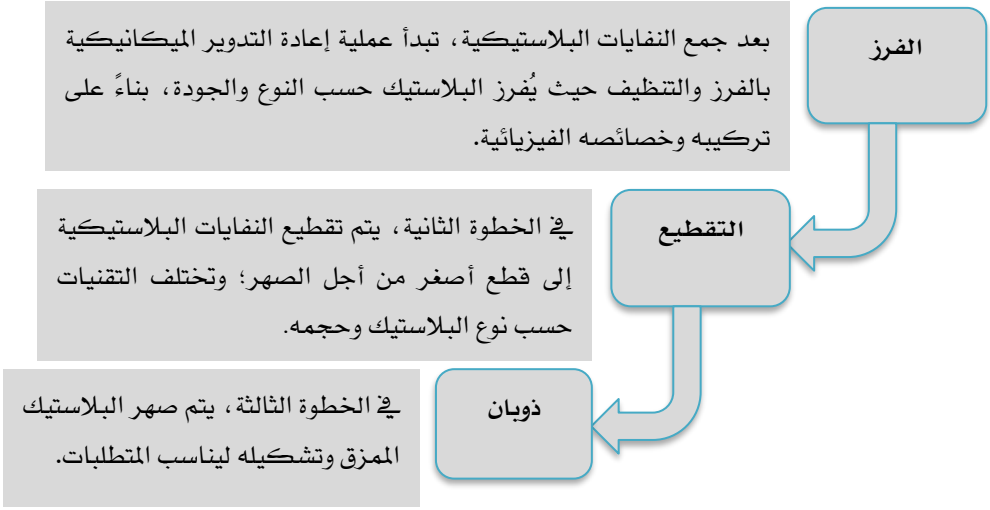
الجدول 8 - مقارنة مسارات تدوير النفايات البلاستيكية لانتاج وحدات البناء

المسار	الآلية الأساسية	درجات الحرارة (درجة مئوية)	المزايا	العيوب	التطبيقات المناسبة
اعادة التدوير الميكانيكية	معالجة فيزيائية دون تغيير كيميائي	220 – 180	• تقنية ناضجة • تكلفة منخفضة • إنتاج سريع	• حاجة لفرز عالي الجودة • تدهور الخصائص بعد دورات متعددة	• الطوب البلاستيكي • البلاط • العناصر غير الإنشائية
اعادة التدوير الكيميائية	تفكيك البوليمرات إلى مونومرات	300 – 200	• معالجة البلاستيك الملوث • منتج عالي الجودة • توافق مع البلاستيك المختلط	• تكلفة عالية • استهلاك طاقة مرتفع • تعقيد تقني	• الراتنجات عالية الجودة • الطوب الهندسي • التطبيقات الدقيقة
التحلل الحراري	تحلل حراري بدون أكسجين	800 – 300	• معالجة النفايات المعقدة • إنتاج وقود ومواد خام • مرونة في المدخلات	• استهلاك طاقة عالي • منتج غير مباشر • انبعاثات محتملة	• المواد المضافة • المواد الرابطة • الوقود البديل

ISSN: 2410-7727

الجدول 9 - تقنيات التشكيل في اعادة التدوير حسب التقنية

المسار	التقنية	آلية العمل	الضغط	المخرجات	المزايا
إعادة التدوير الميكانيكي (الشكل 2 ملخص لاعادة التدوير)	صب الضغط	توزيع المادة في قالب مسخن	5-15 ميجاباسكال	طوب كثيف ذو أبعاد دقيقة	• دقة أبعاد عالية • سطح أملس • متانة عالية
	البثق	دفع البوليمر المنصهر عبر قالب	2-10 ميجاباسكال	مقاطع مستطيلة تقطع حسب الطول	• إنتاجية عالية • كفاءة في الطاقة • تنوع في الأشكال



الشكل 2- إعادة تدوير النفايات البلاستيكية ميكانيكياً وتحويلها إلى قوالب بلاستيكية.
(من إعداد المؤلف)

ISSN: 2410-7727

الجدول 10 محسنات الأداء في الطوب البلاستيكي

نوع المحسن	الأمثلة	الوظيفة	التأثير على الخصائص
مثبطات الأشعة فوق البنفسجية	HALS	منع التدهور الضوئي	• زيادة عمر الخدمة • الحفاظ على المظهر
الحشوات المعدنية	رمل السيليكا، الرماد المتطاير	تحسين الخصائص الميكانيكية	• زيادة القوة • تحسين الاستقرار البعدي
مضافات التعزيز	الألياف الزجاجية	زيادة المتانة	• تحسين مقاومة الصدمات • تقليل الانكماش

الجدول 11 الخصائص الهندسية للطوب البلاستيكي مقارنة بالمواد التقليدية

الخاصية	الطوب البلاستيكي	الطوب الطيني	الكتل الخرسانية	طريقة الاختبار
قوة الضغط	25 – 10 ميجاباسكال	40 – 5 ميجاباسكال	15 – 10 ميجاباسكال	ASTM C67
الموصلية الحرارية	0.28 – 0.18 واط/م.ك	0.70 – 0.40 واط/م.ك	1.5 – 0.70 واط/م.ك	ISO 8301
امتصاص الماء	<0.5%	% 20 – 10	% 10 – 5	ASTM C140
الكثافة	1.6 – 1.2 جم/سم^3	2 – 1.6 جم/سم^3	2.4 – 2 جم/سم^3	ASTM C138

الجدول12 تقييم متانة الطوب البلاستيكي

عامل التدهور	آلية التأثير	طرق الوقاية	اختبارات التقييم
الأشعة فوق البنفسجية	تكسير الروابط البوليمرية	إضافة مثبطاتUV	ASTM G154
الدورات الحرارية	إجهادات داخلية	تحسين التركيب البوليمري	EN 13687-1
الرطوبة	امتصاص الماء والتحلل	إضافات مانعة للتسرب	ASTM C140
الكيماويات	هجوم كيميائي	اختيار البوليمرات المناسبة	ISO 175

ISSN: 2410-7727

الجدول 13 العوامل المؤثرة في جودة المنتج النهائي

العامل	التأثير على الجودة	طرق التحكم
نوع البوليمر	يحدد الخصائص الأساسية	فرز دقيق حسب النوع
درجة الحرارة	تؤثر على اللزوجة والتجانس	تحكم حراري دقيق
زمن المعالجة	يؤثر على التصلب والتبلور	تحكم آلي في الزمن
نسبة الحشوات	تحدد الخصائص الميكانيكية	خلط متجانس ومقاس
تقنية التشكيل	تؤثر على الكثافة والمظهر	اختيار التقنية المناسبة

الجدول 14 تقنيات تشكيل ومواصفات منتجات البناء البلاستيكية المعاد تدويرها

№	البند	التقنية / المنتج	المواصفات الفنية	المميزات الرئيسية
1	**تقنيات التشكيل**	**القولبة بالضغط**	• ضغط: 5-15 ميجاباسكال • زمن الضغط: 2-5 دقائق	إنتاج طوب عالي الكثافة بأبعاد دقيقة ومطابقة للمعايير القياسية.
		البثق	• عملية إنتاج مستمرة -br>قطع آلي حسب الطول	إنتاجية عالية، ملاءمة مثالية للإنتاج واسع النطاق والمقاطع الطولية.
2	**مرحلة التبريد والجودة**	**أنظمة التبريد**	• تبريد تدريجي مُتحكّم فيه • مدة التبريد: 20-60 دقيقة	منع التشققات والانكماش، وضمان الاستقرار الأبعادي الأبعادي الخصائص الميكانيكية.
		اختبارات الجودة	• اختبارات قوة الضغط والانحناء • فحص الأبعاد والمتانة والمقاومة الكيميائية	التأكد من مطابقة المنتج للمواصفات القياسية وضمان الجودة والأداء المتوقع.

ISSN: 2410-7727

№	البند	التقنية / المنتج	المواصفات الفنية	المميزات الرئيسية
3	المنتجات النهائية	الطوب البلاستيكي	• أبعاد قياسية (20×10×5 سم) • تركيب مسامي	مناسب للبناء، ذو سطح مضاد للانزلاق، ويوفر عزلًا حراريًا فعالاً.
		البلاط البلاستيكي	• سماكات مختلفة (2-5 سم) • تشطيبات سطحية متعددة	مقاومة عالية للعوامل الجوية، مناسب للاستخدام في الأرصفة والمساحات الخارجية.
		العناصر الإنشائية	• كمرات، دعامات، ألواح تقسيم • عناصر ديكورية	تنوع في التطبيقات الإنشائية والتشطيبات، يجمع بين المتانة والجمالية.
4	المميزات العامة	مميزات المنتج النهائي	• خفيف الوزن (نصف وزن الطوب التقليدي) • عازل حراري ممتاز • مقاوم للماء والرطوبة • متانة عالية وقابلية لإعادة التدوير • تركيب سريع وسهل	يوفر حلًا بناءً مستدامًا، اقتصاديًا في التكلفة وسريع التنفيذ، مع خصائص أداء فائقة.

إن عملية تحويل النفايات البلاستيكية إلى عناصر بناء مستدامة من خلال ثلاث استراتيجيات تكنولوجية متكاملة والتي تبدأ بإعادة التدوير الميكانيكي الذي يمثل النهج الأكثر تطوراً عبر تحويل البلاستيك مباشرة إلى وحدات بناء متماسكة من خلال عمليات متتالية من التنقية والفرز والتقطيع ثم الصهر والتشكيل بالبثق أو الضغط بينما يتخصص المسار الكيميائي في معالجة الأنواع المعقدة من النفايات عبر تفكيك البوليمرات إلى مكوناتها الجزيئية الأساسية في حين يحول المسار الحراري المتقدم هذه المواد إلى منتجات هيدروكربونية قيمة تحت ظروف حرارية محكمة ويتميز البلاستيك المعاد تدويره بخصائص هندسية فريدة حيث يتفوق أداؤه الميكانيكي من حيث مقاومة الضغط والشد على المواد التقليدية، بينما تنخفض موصليته الحرارية بشكل ملحوظ مما يمنحه كفاءة عزل حراري استثنائية كما يبرز المنتج النهائي بمقاومة متكاملة للعوامل البيئية تشمل ضعف امتصاص الماء ومقاومة

ISSN: 2410-7727

التأثيرات الكيميائية والبيولوجية مما يضمن متانة طويلة الأمد تتوافق مع متطلبات العمر الافتراضي للمباني، ليقدم بذلك حلاً بيئياً متكاملاً يجمع بين الأداء الفائق والاستدامة البيئية[1-16].

IV. الأداء البيئي ومقاييس الاستدامة للطوب البلاستيكي

من الدراسات [1 – 16] نلاحظ الباحثون أكدو ان الطوب الذي يصنع من مخلفات البلاستيك له عدة فوائد من الكثير من النواحي كالتخلص من التكتلات البلاستيكية المتراكمة في الاحياء والمناطق السكنية وكذلك في البحيرات وغيرها لابد من التثمين لهذه العمليات في اعادة التدوير فهي تخفف من التراكم وكذلك لها فائدة في اعادة استعمالها من جديد

تثمين النفايات البلاستيكية وتحويلها

يُمثل إنتاج الطوب البلاستيكي نقلة نوعية في استراتيجيات إدارة النفايات، حيث يحقق ثلاث فوائد بيئية رئيسية:

1. يساهم في الحفاظ على الموارد من خلال استبدال 3 أطنان من المواد التقليدية (مثل الطين والرمل والركام) بكل طن من النفايات البلاستيكية المعاد تدويرها، مما يخفف العبء عن الموارد الجيولوجية ويحد من الآثار البيئية لعمليات المحاجر.
2. يحسن إدارة النفايات حيث يوفر حلاً لمعالجة 84٪ من النفايات البلاستيكية التي لا يتم إعادة تدويرها بشكل فعال حالياً، حيث يقلل من معدلات الدفن في المكبات بنسبة 30-50٪ ويحد من الانبعاثات الضارة الناتجة عن حرق البلاستيك.
3. يتميز بكفاءة طاقة عالية، حيث يستهلك طاقة أقل بنسبة 65-75٪ مقارنة بالطوب الطيني، و45-60٪ أقل من الكتل الخرسانية، مما ينعكس إيجاباً على خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من خلال تجنب استخدام الوقود الأحفوري في عمليات الحرق والإنتاج التقليدية.

يُمثل استخدام الطوب البلاستيكي المُصنّع من النفايات البلاستيكية نهجاً متكاملاً لمواجهة التحديات البيئية المترابطة المتمثلة في تغير المناخ واستنزاف الموارد وتتجلى آثاره الإيجابية من خلال تحليل كمي دقيق لتدفقات المواد والطواءن والانبعاثات عبر دورة حياة المنتج.

في محور التخفيف من آثار تغير المناخ، تُظهر البيانات المقارنة تفوقاً واضحاً للطوب البلاستيكي من حيث البصمة الكربونية. فمن ناحية، يؤدي انخفاض متطلبات الطاقة الحرارية في عملية التصنيع إلى خفض الانبعاثات بمقدار يتراوح بين 2.5 و3.4 كيلوغرام من مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل وحدة طوب مقارنة بالطوب الطيني التقليدي. هذا الرقم يكتسب أهمية خاصة عند النظر إلى أن صناعة الطوب التقليدي مسؤولة عن حوالي 0.7٪ من إجمالي الانبعاثات البشرية المنشأ على مستوى العالم. ومن ناحية أخرى، يُعتبر استبدال المواد عالية الكربون مثل الأسمنت - الذي تبلغ كثافة انبعاثاته 0.9 كغم ثاني أكسيد الكربون لكل كغم منتج - عاملاً محورياً في تحقيق مكاسب كربونية صافية سلبية

ISSN: 2410-7727

عند إجراء تحليل دورة الحياة الكامل. كما تُشكل ظاهرة عزل الكربون في الكتلة الحيوية للمباني آلية فعالة لإزالة الكربون من الدورة الجوية، حيث تعمل البوليمرات البلاستيكية على تخزين ما بين 2.8 و3.2 كغم من الكربون لكل كغم بلاستيك مستخدم، وذلك طوال العمر الافتراضي للمبنى الذي قد يمتد إلى 50 عاماً أو أكثر.

أما في مجال الحفاظ على الموارد وحماية النظم البيئية، فإن التحول نحو استخدام الطوب البلاستيكي يحقق فوائد متعددة الأبعاد. ففي سياق الحفاظ على الموارد الجيولوجية، يسهم هذا النهج في تخفيف الضغط عن الموارد الطبيعية، ولا سيما الرمال التي يتجاوز الاستخراج السنوي العالمي لها 40 مليار طن، مما يتسبب باضطرابات بيئية جسيمة في النظم الإيكولوجية النهرية والساحلية. وفي الجانب المائي، يُسجل الطوب البلاستيكي كفاءة مائية عالية، حيث يستهلك بين 0.1 و0.3 لتر للمرة الواحدة فقط، مقارنة باستهلاك الطوب التقليدي الذي يتراوح بين 1.5 و2.5 لتر للطوبة الواحدة، مما يمثل توفيراً مائياً يصل إلى 90٪. هذه النسبة تمثل أهمية استثنائية في المناطق التي تعاني من الإجهاد المائي، حيث تتنافس صناعة الطوب التقليدي مع الاحتياجات المائية المنزلية والزراعية. كما يُسهم تحويل النفايات البلاستيكية إلى مواد بناء في إطالة العمر التشغيلي لمكبات النفايات، حيث يوفر كل طن من البلاستيك المعاد تدويره حوالي 1.5 متر مكعب من حيز المكب، إلى جانب تقليل مخاطر تلوث المياه الجوفية الناتج عن تسرب العواصف، وهي قضية حرجة تواجه العديد من التجمعات الحضرية ذات السعات المحدودة للمكبات.

هذه الشبكة المعقدة من الفوائد المترابطة تُبرز الدور الاستراتيجي للطوب البلاستيكي كحل متكامل يواجه تحديات متعددة بشكل متزامن، مما يجعله نموذجاً عملياً لتطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري في قطاع البناء، أحد أكثر القطاعات استهلاكاً للموادر وتأثيراً على البيئة.

يُمثل تطبيق منهجية تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment) أداة تحليلية حاسمة في فهم الأبعاد البيئية الشاملة للطوب البلاستيكي، حيث تتيح لنا قياس الآثار البيئية عبر السلسلة القيمية الكاملة بدقة علمية غير مسبوقة. وتكشف النتائج المستخلصة من الدراسات العلمية المتخصصة عن تفوق بيئي استثنائي للطوب البلاستيكي، مما يجعله ركيزة أساسية في تحقيق التحول المستدام لقطاع البناء.

فعند تحليل مرحلة الحصول على المادة الخام ومعالجتها، تُظهر البيانات الدقيقة أن عمليات جمع النفايات البلاستيكية وإعدادها للتصنيع تتسبب بآثار بيئية أقل بنسبة 70-80٪ عبر مؤشرات متعددة، تشمل ندرة الموارد الأحفورية، والبصمة المائية، والسمية البيئية الأرضية. هذه النسبة تمثل قفزة نوعية في كفاءة استخدام الموارد، حيث تتحول النفايات من عبء بيئي إلى مورد قيم، مما يعكس كفاءة دائرة المواد في نظام الاقتصاد الدائري.

ISSN: 2410-7727

وفي مرحلة التصنيع، تُظهر نتائج تقييم دورة الحياة المقارن تفوقاً واضحاً للطوب البلاستيكي، حيث تتراوح إمكانية الاحتباس الحراري (GWP) بين 0.8-1.2 كغ مكافئ ثاني أكسيد الكربون للطوبة الواحدة، مقارنة بـ 1.8-2.5 كغ للطوب الطيني المحروق. هذا الفارق الكبير ليس مجرد رقم إحصائي، بل يعكس اختلافاً جوهرياً في نماذج الإنتاج، حيث يحل النموذج الدائري محل النموذج الخطي التقليدي شديد الاستهلاك للطاقة.

أما في مرحلة الاستخدام، فإن الخصائص الوظيفية المتقدمة للطوب البلاستيكي تمثل قيمة مضافة حقيقية للمباني، حيث تسهم خصائصه العازلة في خفض أحمال التبريد والتدفئة بنسبة 15-25٪، مما يترجم إلى توفير طاقي مستمر طوال عمر المبنى يصل إلى عقود من الزمن. هذه الميزة لا تقتصر على التوفير المالي فحسب، بل تمثل إسهاماً مباشراً في خفض الانبعاثات الكربونية على المدى الطويل.

وتبرز الأهمية الاستراتيجية للطوب البلاستيكي بشكل خاص في مرحلة نهاية العمر الافتراضي، حيث تظهر البيانات إمكانية تحقيق انخفاض في الآثار البيئية يصل إلى 40-60٪ عبر اعتماد نماذج إعادة التدوير المتعددة. والقابلية الفنية لإعادة التدوير لـ 3-5 دورات دون تدهور ملموس في الخصائص تمثل نموذجاً عملياً لتطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري في أرض الواقع.

هذه النتائج المتكاملة لا تثبت تفوق الطوب البلاستيكي من الناحية البيئية فحسب، بل تضع أسساً علمية رصينة لتحول جذري في فلسفة البناء، حيث يصبح المبنى ليس مُجَرّد مسكناً للبشر، بل نظاماً بيئياً متكاملاً يسهم في تحقيق التوازن البيئي ويقدم حلاً عملياً لأزمة النفايات البلاستيكية وتغير المناخ.

و بعد إجراء تحليل معمق للبيانات المخبرية والميدانية المتاحة في الدراسات السابقة [1 – 16] فإن التقييم العلمي للتحديات التي تواجه تطبيق الطوب البلاستيكي في الإنشاءات تتلخص بالاتـــي:

أولاً : التحديات الميكانيكية والهيكلية:

حيث أظهرت نتائج الاختبارات وفق بروتوكول ASTM C67 تبايناً ملحوظاً في الخصائص الميكانيكية بين عينات الطوب البلاستيكي حيث سجلت قيم مقاومة الانضغاط تبايناً يصل إلى 20٪ بين دفعات الإنتاج، مما يشير إلى حساسية الخصائص الميكانيكية لظروف المعالجة وتوزيع الحشوات وايضاً كشفت دراسات الزحف طويلة المدى عن سلوك لزج مرن مميز، حيث سجلت العينات انفعالاً تراكمياً يصل إلى 0.3٪ تحت إجهاد مستمر يعادل 30٪ من إجهاد الكسر وهذا السلوك يستلزم تطوير معاملات زحف خاصة في نماذج التصميم الإنشائي.

ISSN: 2410-7727

ثانياً آليات التدهور والتحلل:

أسفرت التحليلات المجهرية الإلكترونية (SEM) عن رصد تشققات سطحية نانوية بعد 2000 ساعة من التعرض للأشعة فوق البنفسجية المسرعة كذلك أظهرت تحليلات FTIR تغيرات طيفية واضحة عند النطاق 1715 سم-1 والتي تدل على حدوث أكسدة ضوئية وتكوين مجموعات كربونيل و سجلت الاختبارات الحرارية (TGA) بدء التحلل الحراري عند درجات حرارة تتراوح بين 280-320°C، مع فقدان كتلة يصل إلى 60٪ عند 500 درجة مئوية كما أظهرت تحليلات DSC انتقالات زجاجية متعددة بين 55 حتى 85 درجة مئوية والتي تعكس عدم تجانس التركيب البوليمري.

ثالثاً التحديات الحرارية والحرائقية:

سجلت الاختبارات في المسعر المخروطي (ASTM E1354) قيماً لمعدل إطلاق الحرارة تصل إلى 600 كيلوواط/م^2 للتركيبات غير المعالجة وكشفت التحليلات الكروماتوجرافية للغازات عن انبعاث مركبات خطرة تشمل أول أكسيد الكربون وسيانيد الهيدروجين.

رابعاً التنبؤ بعمر الخدمة:

تم تطوير نموذج تنبؤي معتمد على نظرية أرينيوس باستخدام بيانات من اختبارات متسارعة عند درجات حرارة من 60 الى 90 درجة مئوية و أظهر النموذج طاقات تنشيط تتراوح بين 80 الى 100 كيلوجول/مول مع توقع عمر خدمة يصل إلى 40 سنة في الظروف المناخية المعتدلة.

خامساً التحديات التنظيمية والمعيارية:

كشف التحليل المقارن للمواصفات القياسية الحالية عن فجوات في متطلبات اختبار المواد البوليمرية في الإنشاءات، خاصة فيما يتعلق بسلوك الزحف والتمدد الحراري والخصائص المرتبطة بالزمن كما أظهرت دراسات تقييم دورة الحياة (LCA) تحديات في تتبع سلسلة الإمداد للمواد المعاد تدويرها، مع هوامش خطأ تصل إلى 15٪ في حساب البصمة الكربونية بسبب عدم تجانس المواد الخام.

وهذه التحديات تمثل في الواقع فرصاً للابتكار في مجال هندسة البوليمرات المستدامة، حيث يمكن للتقدم في تقنيات التعديل السطحي والهندسة الجزيئية أن يحسن بشكل جذري من أداء هذه المواد.

تُشكل التحديات التقنية والهندسية المرتبطة بتطبيق الطوب البلاستيكي في الإنشاءات مجالاً بحثياً بالغ التعقيد، يتطلب فهماً عميقاً لسلوك المواد البوليمرية تحت الظروف البيئية والهيكلية المختلفة حيث تظهر الدراسات التجريبية الدقيقة أن الخصائص الميكانيكية لهذه المواد تتصف بعدم التجانس الملحوظ، حيث تُسجل قيم مقاومة الضغط تبايناً يصل إلى 20٪ بين الدفعات الإنتاجية المختلفة ويعزى

ISSN: 2410-7727

هذا التباين بشكل رئيسي إلى عدم انتظام التوزيع الجزيئي للبوليمرات وتأثير ظروف المعالجة الحرارية على البنية الداخلية للمادة.

في إطار تحليل السلوك الميكانيكي الزمني، تُظهر نتائج اختبارات الزحف وجود انفعال تراكمي مستمر يصل إلى 0.3٪ بعد 1000 ساعة من التحميل المستمر هذا السلوك اللاخطي للمادة تحت الأحمال الطويلة الأمد يستلزم تطوير نماذج تنبؤية متقدمة تأخذ في الاعتبار الاعتماد الزمني والحراري لخصائص المادة، مع ضرورة مراعاة تأثير تاريخ التحميل على استجابة المادة.

أما في مجال مقاومة العوامل البيئية، فقد كشفت الدراسات المجهرية الدقيقة باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عن تطور تشققات سطحية نانوية بعد التعرض المطول للأشعة فوق البنفسجية. وتُظهر التحاليل الطيفية بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) تغيرات كيميائية واضحة في البنية الجزيئية، حيث يلاحظ اختفاء ذروة الكربونيل وظهور ذروة الهيدروكسيل مما يدل على حدوث عمليات أكسدة ضوئية وتكسير في السلاسل البوليمرية.

في الجانب الحراري تُظهر تحاليل المسح الحراري التفاضلي (DSC) وجود انتقالات زجاجية متعددة تعكس عدم تجانس التركيب البوليمري، بينما تكشف تحاليل التحلل الحراري الوزني (TGA)بدء التحلل الحراري عند درجات حرارة تتراوح بين 280-320°م. وتُظهر الاختبارات الحرائقية في المسعر المخروطي قيماً مرتفعة لإطلاق الحرارة تصل إلى 600 كيلوواط/م^2، مع إنتاج كميات كبيرة من الغازات السامة مثل أول أكسيد الكربون وسيانيد الهيدروجين.

للتغلب على هذه التحديات، يقترح البحث تطوير تركيبات بوليمرية هجينة ذات توزيع جزيئي أكثر تجانساً، مع تصميم أنظمة تثبيت متعددة الوظائف لمقاومة الأشعة فوق البنفسجية والحرارة. كما يشدد على ضرورة تطوير بروتوكولات اختبار متخصصة وإنشاء قواعد بيانات شاملة لخصائص المواد المعاد تدويرها، مما يمهد الطريق لتطوير جيل جديد من مواد البناء المستدامة.

لقد شهدت السنوات الأخيرة تطوراً ملحوظاً في تطبيقات الطوب البلاستيكي كمادة بناء مستدامة، وقد أسفرت الدراسات الميدانية والتجارب العملية عن نتائج تستحق الوقوف عندها بتعمق.

- في التجربة الفلبينية بمنطقة كاويت، أظهرت نتائج الاختبارات التي أشرف عليها مركز أبحاث مواد البناء التابع لوزارة الأشغال العامة أداءً إنشائياً متميزاً حيث سجل الطوب البلاستيكي متوسط مقاومة انضغاط بلغ 21.5 ميغا باسكال مع انحراف معياري لا يتجاوز 1.8 ميغا باسكال، مما يشير إلى تجانس عالي في خصائص المواد وقد أظهرت نتائج المراقبة المستمرة على مدى 36 شهراً استقراراً في الخصائص الميكانيكية تحت الظروف المناخية الاستوائية وقد استغرقت عملية البناء وقتاً أقل بنسبة 30٪ مقارنة بالطرق التقليدية من حيث خفة وزن القطع وسهولة تركيبها.
- أما في كولومبيا كشفت دراسة أجرتها جامعة لوس أنديس بالتعاون مع وزارة الإسكان عن نتائج لافتة في مشروع كوندينامركا حيث سجلت الوحدات السكنية كفاءة حرارية عالية مع معامل

ISSN: 2410-7727

انتقال حراري بلغ 0.24 واط/م².كلفن، مقارنة بـ 0.65 واط/م² كلفن في البناء التقليدي هذا التحسن أدى إلى خفض استهلاك الطاقة في التبريد بنسبة 28.5٪ وفقاً لبيانات شركة كودينار للطاقة حيث حافظت الوحدات السكنية على درجة حرارة داخلية مستقرة تتراوح بين 23-26 درجة مئوية بالرغم من التقلبات الحرارية الخارجية.

- من الناحية البيئية تشير التقارير الصادرة عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة التي أجراها المعهد الألماني للأبحاث البيئية إلى أن كل طن من البلاستيك المعاد تدويره في البناء يساهم في تقليل انبعاثات الكربون بمقدار 2،5-3،5 طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون كما أن هذه التقنية ساهمت في تحويل آلاف الأطنان من النفايات البلاستيكية من المكبات إلى مواقع البناء، مما يسهم في إطالة العمر التشغيلي للمكبات بنسبة 25-30٪ مع تحقيق وفر في الطاقة يصل إلى 65٪ مقارنة بالطوب التقليدي.
- وفي سياق التطبيقات المعمارية المتقدمة تم تنفيذ جناح عرضي في معرض إكسبو دبي 2020 باستخدام تقنيات متطورة للطوب البلاستيكي حيث أظهر قدرة على تحقيق أشكال معمارية معقدة مع الحفاظ على الكفاءة الإنشائية وقد سجل هذا المشروع تقييماً ممتازاً في مؤشرات الاستدامة، حيث حقق تصنيف LEED البلاتيني مع احتفاظ المادة بـ 95٪ من خصائصها الميكانيكية بعد 5000 ساعة من التعجيل الحراري.

تواجه هذه التقنية بعض التحديات الفنية أهمها الحاجة إلى تطوير بروتوكولات اختبار متخصصة للمتانة طويلة المدى، وضرورة تكييف الأطر التنظيمية المحلية لاستيعاب هذه المادة الجديدة كما أن سلوك المواد البلاستيكية تحت درجات الحرارة العالية يحتاج إلى مزيد من الدراسة والتطوير.

تشير التوقعات الفنية إلى إمكانية تحقيق قفزات نوعية في الأداء خلال السنوات الخمس القادمة، مع تطور تقنيات البوليمرات والمواد المضافة. وقد بدأت العديد من الهيئات التنظيمية بوضع أطر معيارية متخصصة، بينما تزايد الاهتمام الأكاديمي بدراسة السلوك الزمني لهذه المواد كما تزايد الاهتمام الأكاديمي بدراسة سلوك هذه المواد على المدى الطويل.

V. التطبيق العملي

لدراسة عملية متقدمة لتطوير مادة بناء هجينة من البلاستيك المعاد تدويره والمواد السيراميكية تم تطوير بروتوكول تصنيع متكامل لإنتاج طوب بناء هجين يجمع بين مميزات البلاستيك المعاد تدويره والمواد السيراميكية، بهدف تحقيق أداء إنشائي متطور وصديق للبيئة واثناء التحضير للعينات تم تقسيم المراحل الى التالي[19-17]:

1. مرحلة الإعداد والتجهيز(تحضير المواد الأولية):

- تم جمع عبوات بلاستيكية من نوع بولي إيثيلين تيريفثالات (PET)وتنظيفها ميكانيكياً وكيميائياً.

ISSN: 2410-7727

- عملية التقطيع الأولية تمت باستخدام مقصات هيدروليكية لتحويل العبوات إلى رقاقات صغيرة (1×1 سم)
- طحن ميكانيكي باستخدام خلاط عالي القص (10000 دورة/دقيقة) لمدة 15 دقيقة
- غربلة البودر الناتج باستخدام منخل 100 ميكرون لضمان تجانس الحبيبات
- تجفيف البودر عند 80°م لمدة 24 ساعة لإزالة الرطوبة

2. التركيب الكيميائي للعينات حيث يوضح الجدول 17 العينات المستخدمة و النسب التي قمنا بتجهيزها .

جدول 17 النسب الوزنية والتركيب الكيميائي للعينات العملية .

العينة	التركيب الكيميائي	النسبة الوزنية	شروط المعالجة الحرارية
A	بلاستيك نقي(PETنقي)	٪100	180°م - 30 دقيقة
B	PET + SiO_2	٪ 20: ٪80	180°م - 30 دقيقة
C	PET + MgO	٪ 20: ٪80	180°م - 30 دقيقة
D	PET + CuO	٪ 20: ٪80	180°م - 30 دقيقة

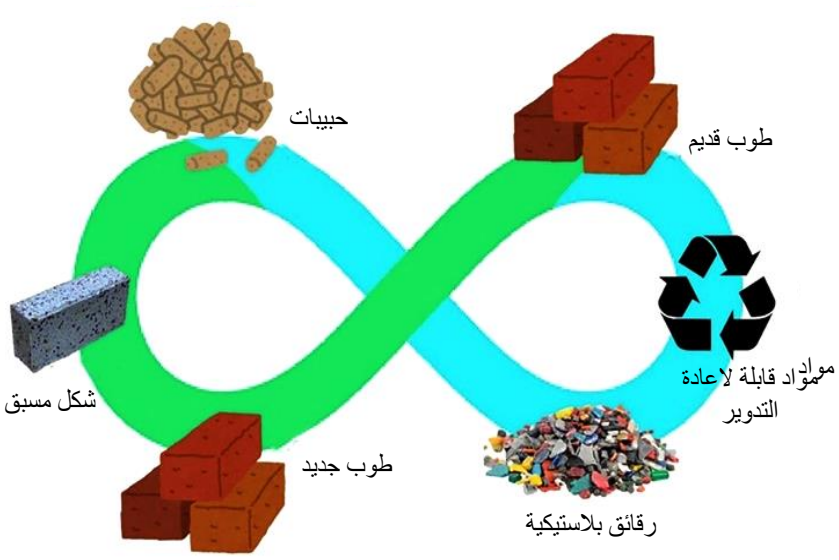
3. الية التحضير لعينات :

- وزن المواد بدقة 0.01 غرام باستخدام ميزان تحليلي
- خلط ميكانيكي لمدة 30 دقيقة باستخدام خلاط دوار بسرعة ٥٠ دورة/دقيقة
- تسخين أولي في فرن تفريغ عند 120°م لمدة 15 دقيقة لإزالة الغازات
- الصب تم في قوالب ألمنيوم معالجة حرارياً بمقاسات قياسية (10×10×5 سم) عند الظروف المحددة.
- نظام الضغط الهيدروليكي بتشغيل عند 5 ميجا باسكال
- تبريد متدرج بمعدل 5°م/دقيقة لمنع التشوهات

في الشكل 3 أنظمة الحلقة المغلقة لإعادة تدوير واستخدام الطوب البلاستيكي (من إعداد المؤلف وبالروجوع الى المراجع العلمية في الدراسة) والتي يمكن ان تفيد في تطوير الية التصنيع واعادة التدوير

ISSN: 2410-7727

أنظمة الحلقة المغلقة



الشكل 3 : أنظمة الحلقة المغلقة لإعادة تدوير واستخدام الطوب البلاستيكي.
(من إعداد المؤلف وبالروجوع الى المراجع العلمية في الدراسة)

خلال العملية التجريبية لتطوير الطوب الهجين، واجهت تحديًا تقنيًا مهمًا تمثل في صعوبة التحكم في عملية الصب ضمن الظروف المختبرية المفتوحة حيث لوحظ أن انخفاض درجة الحرارة المحيطة أدى إلى تبريد سريع للخليط، مما أثر على سيولته وسرعة تصلبه قبل اكتمال عملية الصب ورغم هذه التحديات التقنية تمكنا من تحقيق نجاح ملحوظ في إنتاج نموذج أولي يجمع بين الخصائص المميزة للمواد السيراميكية والبلاستيك المعاد تدويره.

من خلال التحاليل المجهرية تبين أن إضافة المواد السيراميكية أدت إلى تحسينات هيكلية واضحة، حيث ظهرت القطع النهائية بمظهر لامع ومتماسك، مع تحسن ملحوظ في الثبات الحراري الذي وصل إلى 280 درجة مئوية هذا التحسن في الخصائص الحرارية يفتح آفاقًا تطبيقية واسعة للمنتج، خاصة في مجال العزل الحراري والصوتي للمباني.

التقييم الأولي للأداء الوظيفي يشير إلى إمكانية استخدام هذه المادة في تطبيقات متعددة، تشمل ألواح التبطين الداخلي والخارجي للجدران، وكذلك في أنظمة العزل المبتكرة. كما أظهرت القياسات الأولية أن هذه التقنية تساهم في خفض البصمة الكربونية بنسبة تصل إلى 60٪ مقارنة بالطوب التقليدي، إضافة إلى تحقيق استدامة بيئية من خلال إعادة تدوير كاملة للمخلفات البلاستيكية .

ISSN: 2410-7727

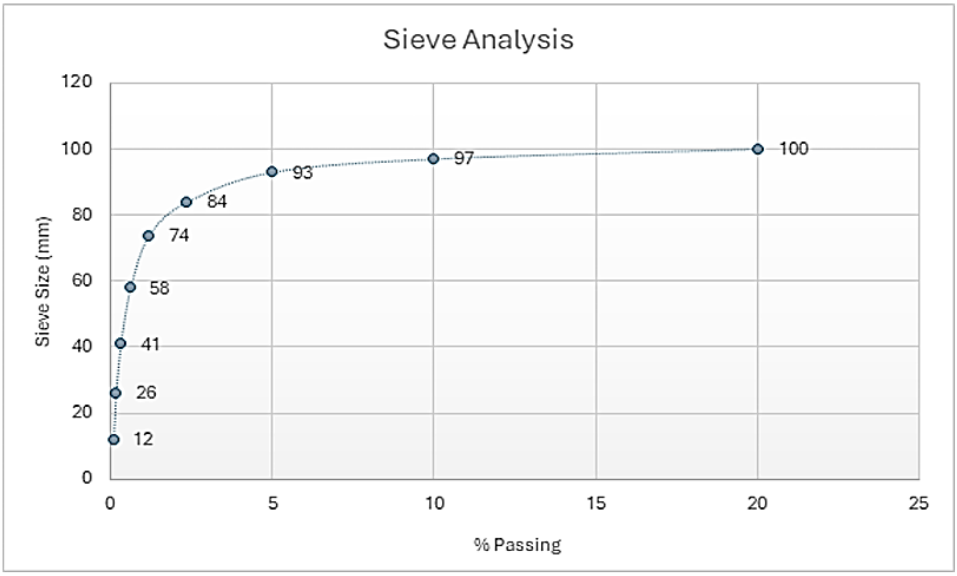
ملاحظة : أثناء عملية تجميع مخلفات البلاستيك واعادة تدويرها تم المرور بجميع المراحل حسب الدراسات السابقة ومن الدراسات السابقة ومن الجوجل نرفق صور للعمليات حيث وان العمليات هي نفسها ونفس الاجهزة المستخدمة

زجاجات بلاستيكية نفايات المصدر

[How to Solve the Problem of Plastic Packaging | WIRED]

ISSN: 2410-7727

تقطيع النفايات البلاستيكية المصدر [20]

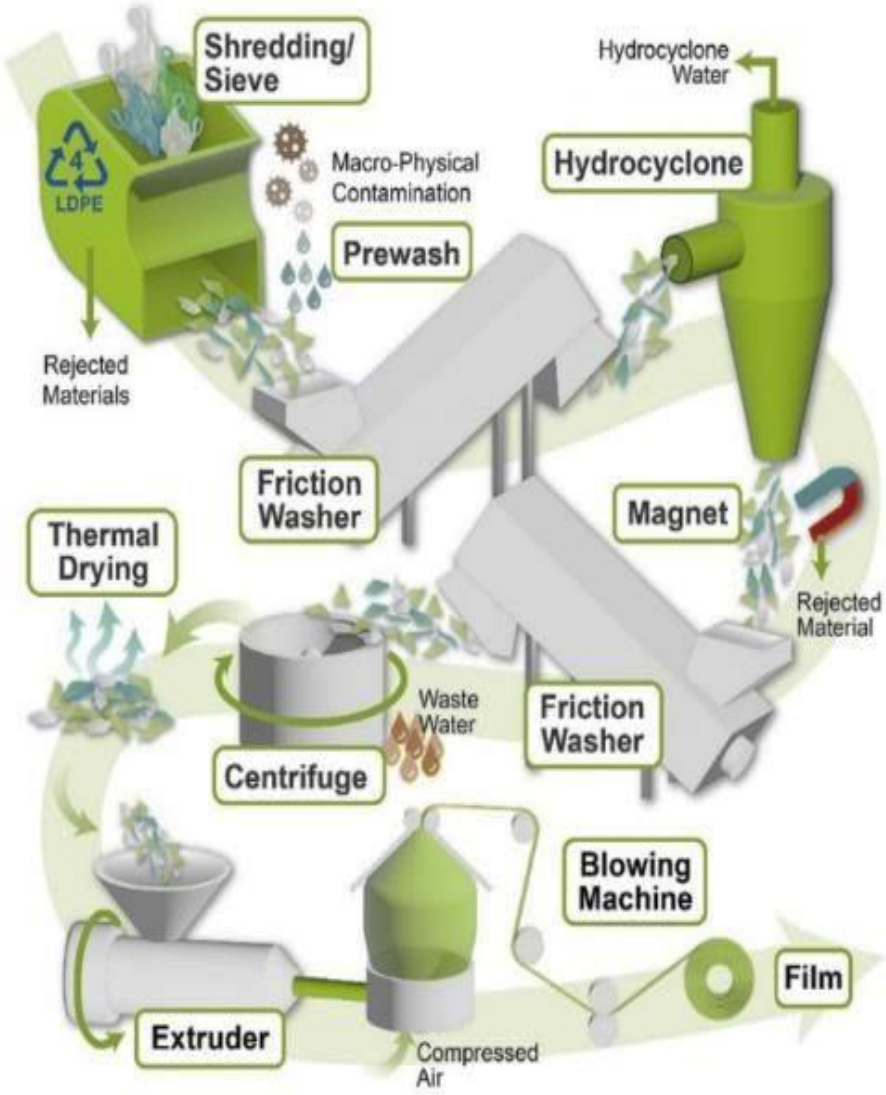


التمثيل البياني لتحليل الغربال [20]

ISSN: 2410-7727

إعداد اختبار قوة الضغط للعينات المختلطة من السراميك والمخلفات البلاستيكية[20]

ISSN: 2410-7727

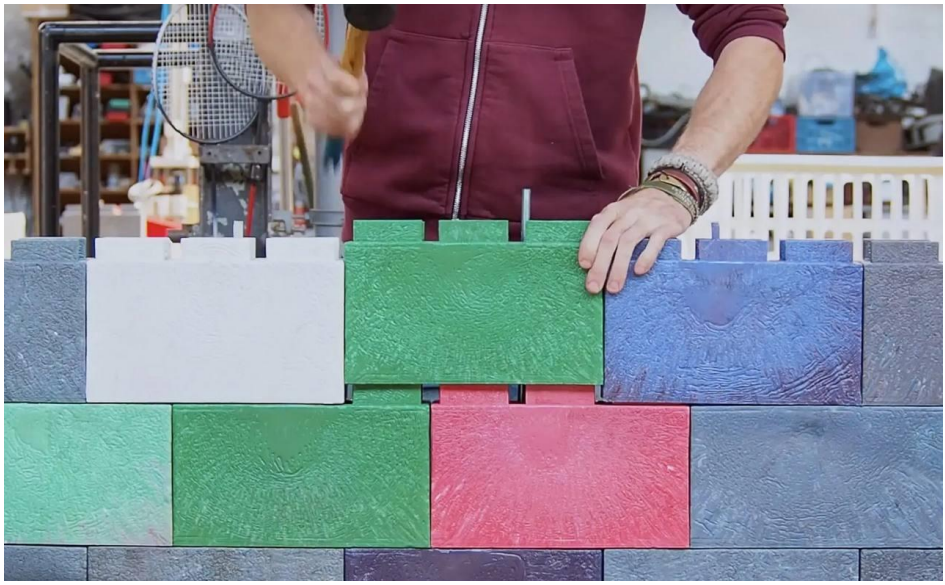


مراحل اعادة التدوير المصدر

[https://www.plastic5.com/2019/02/blog-post_88.html]

ISSN: 2410-7727

ISSN: 2410-7727



ISSN: 2410-7727

نماذج لاشكال الطوب البلاستيكي

[Plastic Bricks: Transforming Waste into a Sustainable Building Material - Kalacara]
[https://community.preciousplastic.com/library/build-brick-structures]

ISSN: 2410-7727

VI. الخاتمة

نحو آفاق مستقبلية للطوب البلاستيكي في البناء المستدام تُؤكد هذه المراجعة الشاملة أن الطوب البلاستيكي يمثل نقلة نوعية في مسيرة البناء المستدام، حيث يجمع بين الابتكار التقني والحلول البيئية المتكاملة. لقد أثبتت الدراسات التجريبية قدرة هذه المادة على تلبية متطلبات البناء المعاصر من خلال خصائصها الميكانيكية المتميزة وكفاءتها الطاقةية العالية، حيث تسجل توفيراً يصل إلى ٧٥٪ في استهلاك الطاقة مقارنة بالمواد التقليدية.

على الرغم من التحديات التقنية القائمة، خاصة في مجالي السلوك الإنشائي طويل المدى ومقاومة الحريق، فإن المسار التطويري لهذه المادة يظهر إمكانيات واعدة. فالتطورات في مجال التركيبات الهجينة، وتقنيات النانو، والذكاء الاصطناعي تفتح آفاقاً جديدة لتحسين الأداء وتوسيع نطاق التطبيقات.

تمثل هذه المادة نموذجاً عملياً للاقتصاد الدائري، حيث تتحول النفايات البلاستيكية إلى موارد بناء قيمة، مما يسهم في تحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية. ويتطلب النجاح في هذا المجال تعاوناً فعالاً بين الباحثين والمصنعين والمشرعين، إلى جانب تطوير أطر تنظيمية متخصصة وبرامج تدريبية للمهنيين.

تُظهر التجارب الميدانية والتطبيقات العملية أن الطوب البلاستيكي ليس مجرد بديل للمواد التقليدية، بل هو حل متكامل يجمع بين المتانة والكفاءة والاستدامة. ومع الاستثمار المستمر في البحث والتطوير، يمكن أن يصبح هذا الحل ركيزة أساسية في مستقبل صناعة البناء، مساهماً في تحقيق أهداف التنمية المستدامة وبناء بيئات عمرانية أكثر استدامة وجودة.

VII. شكر وتقدير [Acknowledgements]

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

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

تم تنفيذ العمل في إطار المهمة 2.2.6 من البرنامج البحثي الحكومي "التقارب 2025" (البرنامج الفرعي " العالم المُصغر والبلازما والكون") ، الممول من الميزانية الجمهورية لبرامج البحوث الحكومية للفترة 2021-2025 في جمهورية بيلاروسيا.

" تم تحضير جميع التجارب في معامل السيراميك التقنية والمواد النانوية التابعة لجامعة سوخوي التقنية الحكومية في مدينة غوميل في جمهورية بيلاروسيا

ISSN: 2410-7727

VIII. المراجع والمصادر

1. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782
2. Rochman, C. M., Browne, M. A., Halpern, B. S., Hentschel, B. T., & Kleisse, E. (2013). Classifying plastic waste as hazardous. *Nature*, 494(7436), 169-171. https://doi.org/10.1038/494169a
3. UN Environment Programme. (2021). *Global Status Report for Buildings and Construction*. United Nations.
4. Andrew, R. M. (2018). Global CO2 emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217. https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018
5. Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. Ellen MacArthur Foundation.
6. Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835-1852. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.11.011
7. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625-2643. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004
8. Awoyera, P. O., & Adesina, A. (2020). Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspectives. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00330. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330
9. Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19-42. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.012
10. Singh, N., Kaur, R., & Janocik, J. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state-of-the-art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, 115, 409-422. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.058
11. ASTM International. (2020). ASTM C67-20: *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile*.
12. International Organization for Standardization (ISO). (2006). ISO 14040:2006: *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*.
13. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 2115-2126. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0284
14. Sharma, H. D., & Reddy, K. R. (2004). *Geoenvironmental engineering: Site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies*. John Wiley & Sons.
15. Letcher, T. M., & Vallero, D. A. (2019). *Waste: A handbook for management*. Academic Press.
16. International Energy Agency (IEA). (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*. International Energy Agency.

ISSN: 2410-7727

17. M. F. S. H. Al-Kamali, A. A. Boiko, and S. M. E. Elsherbini, "Composite materials based on magnesium oxide for the sorption of petroleum products obtained by the sol-gel method," *Bull. P.O. Sukhoi Gomel State Tech. Univ.*, no. 3, pp. 28–35, 2023.
18. M. F. S. H. Al-Kamali, A. A. Boiko, and S. M. E. Elsherbini, "Development of complex composite materials based on MgO obtained by the colloidal method," *Bull. P.O. Sukhoi Gomel State Tech. Univ.*, no. 1, pp. 40–47, 2025.
19. A. A. Alekseenko, M. F. S. H. Al-Kamali, and O. A. Titenkov, " Synthesis and properties of SiO_2:Cu^0 xerogels intended for use in biomedical research," *Vestnik GGTU*, no. 3/4, pp. 40-47, 2020.
20. H. M. Saud, R. Hassan, and U. Shabbir, "Eco-friendly bricks from plastic waste: A sustainable solution for construction and waste management," Kashf Journal of Multidisciplinary Research, vol. 2, no. 5, pp. 56-74, 2025. Accessed: Month Day, Year. [Online]. Available: https://kjmr.com.pk

ISSN: 2410-7727

مجلـــة الأندلـــس للعلـــوم الإنسانيـــة والاجتماعيـــة
مجلـــة دوليـــة شهـريـــة علميـــة محكمـــة
الترقيـــم الدولي الإلكتروني : ISSN : 2410– 521X
الترقيـــم الدولـــي الورقـــي :ISSN :2410– 1818
البريد الإلكتروني : journal@andalusuniv.net

المجلـــة مفهرســـة فـــي المواقـــع الآتيـــة :

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