DOI: 10.51984/SUCP.V3I3.3812

المؤتمر السادس للعلوم الهندسية والتقنية
The Sixth Conference for Engineering Sciences and Technology (CEST-6)
Conference Proceeding homepage: https://cest.org.ly

دراسة مرجعية: أنواع المعالجة وتأثيرها على الخواص الميكانيكية للأسمنت المنشط قلويا المعتمد على خبث الأفران العالية.

هناء فرحات محمد حمد

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة عمر المختار، البيضاء، ليبيا

الملخص

تهدف الدراسات الحديثة إلى تقليل نسبة الاسمنت في الخرسانة والمونة الإسمنتية واستبداله بمواد أخرى، وذلك لغرض التوجه إلى التنمية المستدامة وتقليل تأثيره السيئ على البيئة. من طرق الاستبدال المستخدمة في يومنا هذا هي استعمال خبث الأفران العالي التي أبدت فعاليتها ونتائجها الجيدة في هذا المجال. ولزيادة النتائج المرجوة يتم إضافة المنشطات القلوية إلى هذه الخلطات. على الرغم من الأداء المتفوق للخرسانة المنشطة بالقلويات، فإن الأداء يحكمه بشكل أساسي ظروف المعالجة التي تلعب دور كبير وهام بالسلب والإيجاب على الخواص الميكانيكية لأسمنت الخبث المنشط. قامت العديد من الدراسات في المقام الأول حول خصائص المقاومة والمتانة للمواد الرابطة المنشطة بالقلويات؛ ومع ذلك، فإن المراجعة المنهجية لتأثير طرق المعالجة المختلفة على خصائص المواد الرابطة المنشطة بالقلويات محدودة للغاية. لذلك، تهدف هذه الدراسة المرجعية إلى تقييم تأثير واستمرارية أنواع المعالجات المختلفة كتأثير المعالجة بالحرارة والماء و المعالجة المغلقة و غيرها على أداء الإسمنت المنشط بالقلويات القائم على الخبث. أشارت نتائج الدراسات أن طريقة المعالجة تؤثر بشكل كبير على القوة والمسامية وامتصاص الماء والانكماش، حيث يؤدي اختيار نوع المعالجة الغير ملائم إلى تقليل الخصائص الميكانيكية، وتشكيل شقوق على السطح الخارجي للخرسانة وتسريع الكربنة وبالتالي تقليل المتانة والمقاومة.

الكلمات المفتاحية:

المنشطات القلوية
أنواع المعالجة
خبث الأفران

A review: Curing Types and Their Effect on Mechanical Properties of Alkali-Activated Cement Based on Blast Furnace Slag

Hana F. M. Hamad

Civil Engineering Department, Omar Almukhtar University, Albeida, Libya

ABSTRACT

Recent studies aim to reduce the proportion of cement in concrete and cement mortar and replace it with other materials, to move towards sustainable development and reduce its negative effect on the environment. One of the replacement methods used today is blast furnace slag, which has shown its effectiveness and good results in this field. To increase the effectiveness of these results; alkaline activators are used with these mixtures. Despite the improved efficiency of alkali-activated concrete, the mechanical properties of slag-activated cement are significantly influenced by the curing conditions, in both positive and negative ways. Many studies have been conducted primarily on the resistance and durability properties of alkali-activated binders. However, there is insufficient systematic review of how various curing techniques affect the characteristics of alkali-activated binders. Therefore, this review study aims to evaluate the efficacy and durability of various curing types on the performance of slag-based alkali-activated cement including thermal, water, and microwave curing, etc. The results of the studies indicated that strength, porosity, water absorption, and shrinkage are all significantly impacted by the curing process. As a result, selecting the incorrect curing method reduces the concrete's mechanical properties, causes surface fractures, and speeds up carbonization, which leads to decreased resistance and durability.

Keywords:

Alkaline Activators
Blast furnace slag
Curing types

1. المقدمة

تسلط الدراسات الحديثة الضوء على استعمال خبث الأفران المنشط قلويا كبديل جزئي من الأسمنت البورتولاندي الاعتيادي، وذلك لإنتاج خرسانة

*Corresponding author:
E-mail addresses: hana.hamad@omu.edu.ly
Article History : Received 30 March 2024 - Received in revised form 12 August 2024 - Accepted 21 October 2024

تؤدي إلى تقليل انبعاث ثاني أكسيد الكربون بنسبة تصل إلى 75% مقارنة بالإسمنت البورتولاندي العادي [1]. خبث الأفران هو منتج ثانوي مشتق من صناعة الحديد والصلب، يتكون من زجاج ألومينوسيليكات الكالسيوم والمغنيسيوم ويستخدم كبديل جزئي للأسمنت بمستويات تصل إلى 65%؛ لتقليل استهلاك الأسمنت وتحسين مقاومة الخرسانة خاصة عند تعرضها للأحماض، و ساهم بشكل كبير في التنمية المستدامة في قطاع البناء [2، 3].

يتم التحكم في الخواص الميكانيكية لخرسانة الخبث من خلال الخواص الفيزيائية والتركيب الكيميائي لنوع الخبث المستخدم ونوع المنشط وجرعته ونوع وطريقة المعالجة [4]. تم تصنيف خبث الأفران كمادة هيدروليكية كامنة لأنها تحتوي على خصائص البوزولان والاسمنت؛ لذلك يجب تحفيز التفاعل الهيدروليكي بواسطة منشطات مناسبة لتكوين مواد إسمنتية [5]. تعد عملية تنشيط الخبث ممكنة وفعالة بسبب التركيب الكيميائي للخبث، الذي يتكون من حوالي 35- 50% من أكسيد الكالسيوم أو الجير الحي CaO، و30-35% من السيليكا SiO2، و8-15% من الألومونيا Al2O3، مع كميات كبيرة من أكسيد الحديد الثنائي FeO وأكسيد المغنيسيوم Mgo [6]. أثبتت أغلب الدراسات أن ما يميز الخبث هو نسبة (CaO/(SiO2+ Al2O3) أو ما يسمى بالمعامل الهيدروليكي حيث تم الحصول على أفضل النتائج مع الخبث الذي يلبي معيار معامل الهيدروليكية أكبر من 1 هذه المعلمة لها تأثير مباشر على التنشيط القلوي لخبث الفرن العالي، كذلك لوحظ أنه إذا كانت نسبة (CaO/SiO2) عالية جدًا بشكل عام فوق 1.50، فإن ذلك يقلل الحاجة إلى التنشيط القلوي [7].

إن نوع المنشط المستخدم يؤثر على الخواص الطازجة والمتصلبة للخرسانة المنتجة حيث يمكن استخدام المنشطات بشكل فردي أو مع منشط واحد أو أكثر، كذلك وجد أن المنشطات المركبة أكثر فائدة من استخدامها بشكل فردي خاصة عندما يكون تحسين الخواص الميكانيكية للخرسانة المنشطة القلوية مرغوبًا [8]. هذه المنشطات قادرة على تحرير مونومرات الألومينات والسيليكات في مادة الألومينوسيليكات، والتي تذوب بشكل أكبر وتشكل هلام ألومينوسيليكات. من هذه المنشطات: هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، وهيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، وسيليكات البوتاسيوم (K2SiO3)، وسيليكات الصوديوم (Na2SiO3). يعتبر هيدروكسيد الصوديوم وسيليكات الصوديوم من أكثر المنشطات القلوية شيوعًا لأنها فعالة في إنتاج هلام الربط، وغير مكلفة نسبيًا، وسهلة التحضير. من الناحية النظرية، كلما ارتفع مستوى القلوية زادت كمية الذوبان. ومع ذلك، فقد تبين أن هيدروكسيد الصوديوم يمكن أن يحرر مونومرات سيليكات وألومينات أكثر من هيدروكسيد البوتاسيوم كذلك وجد أن سيليكات الصوديوم لها تأثير تنشيط أعلى بالمقارنة مع هيدروكسيد الصوديوم وكربونات الصوديوم [5].

أظهرت خرسانة خبث الأفران مقاومة جيدة للهجوم الحمضي والتعرض للحريق والتآكل. كما أظهرت معظم خرسانة الخبث التي تم تنشيطها بواسطة سيليكات الصوديوم أو هيدروكسيد الصوديوم أن لها زمن شك أطول بكثير من خلطات الاسمنت الاعتيادي مقاومة مبكرة و مقاومة انحناء أعلى، لكنها أكثر حساسية لدرجة حرارة المعالجة من الخرسانة الاعتيادية. بالرغم من أن طاقة التنشيط الظاهرة أعلى لكنها تنتج حرارة ترطيب أقل ومعدلات تفاعل أسرع [4، 9].

إن عملية المعالجة المختارة للخليط الأسمنتي لها دور رئيسي في أداء المقاومة والمتانة للمادة. على سبيل المثال من المعروف أن المعالجة بالجير والعلاجات الحرارية لها آثار مفيدة على مقاومة المونة والخرسانة الاعتيادية. ومع ذلك، لا يزال من غير المعروف بالضبط كيف يتداخل الاختلاف في نوع المعالجة مع الخواص الميكانيكية لخرسانة الخبث المنشط قلويا [10]. في هذا السياق، الهدف من هذه الدراسة المرجعية هو تقييم تأثير المعالجة على الخواص الميكانيكية لأسمنت خبث الأفران العالية المنشط قلويا. سيتم تسليط الضوء على أنواع المعالجة المختلفة التي تم إجراؤها من قبل الباحثين.

2. تأثير المعالجة على الخواص الميكانيكية

يجب أن تحتوي على تفاصيل طريقة إجراء البحث والتحاليل الإحصائية والمراجع المستخدمة لهم.

على الرغم من أن الدراسات البحثية السابقة أشارت إلى الأداء المتفوق للخرسانة المنشطة بالقلويات، فإن الأداء يحكمه بشكل أساسي ظروف المعالجة. قامت العديد من الدراسات في المقام الأول حول خصائص المقاومة والمتانة للمواد الرابطة المنشطة بالقلويات؛ ومع ذلك، فإن المراجعة المنهجية لتأثير طرق المعالجة المختلفة على خصائص هذه المواد الرابطة محدودة للغاية. لذلك، تركز المراجعة الحالية بشكل أساسي على تأثير البيئة المحيطة والحرارة والماء وطرق المعالجة الأخرى على أداء المواد الرابطة المنشطة بالقلويات القائمة على الخبث. وعلاوة على ذلك، تم مقارنة تأثير نوع وفترات المعالجة، وتركيز المنشط على الخصائص الميكانيكية والمتانة للخرسانة المنشطة بالقلويات والمعرضة لطرق معالجة مختلفة. وفيما يلي سنتطرق لبعض هذه الدراسات.

قام [11] بإجراء دراسة عن إنشاء خرسانة خبث منشطة بالقلويات مع إضافة رقائق البولي إيثيلين تيرفثاليت كبديل جزئي (5٪) للركام الطبيعي. مع استخدام منشط من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) وسيليكات الصوديوم (Na2SiO3) كمنشط قلوي وبنسبة 10 و20٪ بالوزن. تم تطبيق المعالجة المركبة وذلك بدمج المعالجة الحرارية والمعالجة المغلقة في الأكياس البلاستيكية. بعد الصب، تم تغطية القوالب بأغطية بلاستيكية لمنع فقدان الرطوبة النسبية. ثم وضعت في فرن عند درجتي حرارة مختلفتين 40 درجة مئوية و 80 درجة مئوية لمدة 12 ساعة، تم خفض درجة الحرارة تدريجيًا لتجنب الصدمة الحرارية. أخرجت العينات من الفرن عندما وصلت درجة الحرارة إلى 30 درجة مئوية. تركت العينات لمدة ساعة إضافية في القوالب في ظروف المختبر ثم تم إخراجها من القالب. بعد 28 يومًا من المعالجة تم اختبار خصائصها الميكانيكية، وأجري تحليل المجهر الإلكتروني الماسح. تم تحقيق مقاومة ضغط وانحناء تتراوح من 29.3 إلى 68.4 ميجا باسكال ومن 3.5 إلى 6.1 ميجا باسكال على التوالي. أكدت نتائج الاختبار الميكانيكي أن زيادة كمية المنشط تعمل على تحسين الخصائص الميكانيكية. كذلك أدت المعالجة عند 80 درجة مئوية إلى ارتفاع قيم مقاومة الضغط مع المزيد من التشققات الدقيقة على سطح العينات بينما أدت المعالجة عند 40 درجة مئوية إلى قيم مقاومة أقل ولكن بدون تشققات ظاهرة.

أجرى [12] دراسة على مونة الخبث المنشطة بخليط من محلول سيليكات الصوديوم وهيدروكسيد الصوديوم، أجريت المعالجة الحرارية في نطاق درجة حرارة 200-1000 درجة مئوية. حيث تم معالجة المونة في الظروف المحيطة (20 ± 5 °C، 60 ± 5٪ و ظروف الحرارة العالية (80 °C) لمدة 27 يومًا قبل المعالجة الحرارية مع ثلاثة أنظمة تسخين مختلفة: المعالجة في فرن جاف،

والمعالجة في أكياس بلاستيكية محكمة الغلق، وفي بيئة بخارية عند درجة حرارة 80 درجة مئوية. بعد المعالجة، تم اختبار مقاومة الضغط و الانحناء و الشد للمونة. ثم تعرضت العينات لدرجات حرارة عالية تبلغ 200 و400 و600 و800 و1000 درجة مئوية وتم تخزين العينات في الفرن عند درجة الحرارة المستهدفة لمدة ساعتين ثم تركها لتبرد بشكل طبيعي إلى درجة حرارة المختبر. تم استخدام التحليل الوزني الحراري (TGA) والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) المدمج مع مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX) لتقييم تغير البنية الدقيقة للمونة. كشفت النتائج أن طريقة المعالجة أثرت بشكل كبير على المقاومة الميكانيكية لمونة الخبث المنشط. كانت المعالجة الحرارية في عمر متأخر يبلغ 28 يومًا أكثر فائدة لتعزيز مقاومة الضغط في العينات. أظهرت جميع عينات المونة تحولاً ملحوظًا في الهيكل الشبكي في نطاق درجات الحرارة من 800 إلى 1000 درجة مئوية. أدى رفع درجة الحرارة إلى 1000 درجة مئوية إلى غلق الشقوق والمناطق المنفصلة في هيكل المونة بسبب التلبيد أو ما يعرف بعملية التصليد الحراري (Sintering). أدى هذا التغيير في هيكل المونة لجميع أنواع العينات إلى تقليل تدهور مقاومة الضغط بشكل كبير عند 800 درجة مئوية بغض النظر عن طريقة المعالجة. بينما أظهرت عينات المونة مع جميع طرق المعالجة تدهورًا في مقاومة الانحناء والشد عند جميع درجات الحرارة المدروسة (200-1000 °C).

أوضح [13] تأثير المعالجة بالموجات الصغرية أو ما يعرف بالميكروويف (Microwave) على مقاومة الضغط والبنية الدقيقة لمعاجين الخبث المنشطة بخليط من محلول هيدروكسيد الصوديوم وسيليكات الصوديوم مقارنة بأنظمة المعالجة الأخرى؛ الهواء والماء والتسخين التقليدي. كشفت النتائج أن المعالجة بالميكروويف حققت مقاومة مبكرة عالية وبنية دقيقة محسنة على جميع أنظمة المعالجة الأخرى، وعلاوة على ذلك، قلل إشعاع الميكروويف وقت المعالجة بالحرارة بشكل كبير. وجد أن طاقة الميكروويف تزيد من إذابة الخبث في الوسائط القلوية مما أدى إلى تسريع التنشيط بشكل كبير، بحيث يمكن أن يصل إلى حوالي 90٪ من المقاومة لمدة 28 يومًا في الأيام السبعة الأولى. أظهرت التحليلات المجهرية تشكيلات واسعة النطاق من هلاميات الترطيب أدى إلى بناء مصفوفة أكثر كثافة و أقوى ضغطًا مما أدى إلى اكتساب مقاومة ضغط أعلى مقارنة بالمعاجين المعالجة تحت الهواء والماء وأنظمة التسخين التقليدية.

بحث [14] في تأثير محتوى القلويات ووقت المعالجة على مقاومة الانحناء و مقاومة الضغط والانكماش الجفافي و وقت المعالجة ومقاومة اختراق الكلوريد لخبث القلويات المنشط. تم اعتماد محتوى قلوي يتراوح من 2٪ إلى 6٪ ووقت معالجة 7 و28 و90 و180 يومًا في الاختبار. أظهرت نتائج الاختبار أن المحتوى القلوي العالي يقصر فترة المعالجة ويسرع من تطوير مقاومة الضغط، ولكنه يسبب انكماشًا جفافيا كبيرًا وتدهورًا في مقاومة الانحناء ومقاومة اختراق الكلوريد لخبث القلويات المنشط. يمكن أن تؤدي المعالجة المستمرة بعد 28 يومًا إلى تحسين مقاومة الانحناء و مقاومة الضغط ومقاومة اختراق الكلوريد بشكل كبير في المونة مع محتوى قلوي يتراوح من 2 إلى 3%.

أجرى [15] دراسة لتقييم تأثير اختلاف المعالجة على الخصائص الميكانيكية لأسمنت الخبث القلوي المنشط بهيدروكسيد الصوديوم بتركيزات مختلفة (2.5-15٪). تم إجراء المعالجة في درجة حرارة الغرفة، والمعالجة الحرارية عند 65 درجة مئوية، والمعالجة بالماء المقطر، والجير المائي وهيدروكسيد الصوديوم، والمعالجة المركبة. أظهرت نتائج مقاومة الضغط عند 7 و28 يومًا أن الأسمنت القلوي المنشط يقدم سلوكًا متفوقًا على الأسمنت البورتلاندي. فيما يتعلق بطرق المعالجة، كانت المعالجة الحرارية أفضل الطرق تأثيرا والتي عززت طاقة حرارية أكبر، تليها المعالجة في محلول الصوديوم، لأنها منعت فقدان الأيونات القلوية من الأسمنت القلوي المنشط. أشارت نتائج XRD و FTIR و TDG في هذه الأنواع من المعالجة إلى تكوين كميات أكبر من توبرموريت وهيدروتالسيت مع زيادة نسب التنشيط القلوي. أما في حالات المعالجة غير الفعالة، مثل المعالجة المشبعة والجير، تشكل الإترنجيت والتزهر (Efflorescence)، مما يضعف الخصائص الميكانيكية للمادة.

في دراسة أجراها [16] عن خرسانة خبث الأفران السويدي ذات المحتوى العالي من أكسيد المغنيسيوم لتحديد تأثيرات ظروف المعالجة على تطور انكماش الخرسانة المنشطة بالقلويات وتحديد أوقات التصلد والبنية الدقيقة والتركيب الكيميائي و مقاومة الضغط. تضمنت ظروف المعالجة أربع معالجات مختلفة وهي المعالجة الحرارية عند 65° C والغير الحرارية مع الظروف المغلقة (الختم في أكياس بلاستيكية) وغير المغلقة. أكدت النتائج أن نوع المعالجة يؤثر على جميع المعلمات التي تمت دراستها. أظهرت جميع العينات غير المعالجة حرارياً وغير المغلقة انكماشًا أعلى، في حين أدى تطبيق المعالجة الحرارية المدمجة والمعالجة المغلقة إلى تقليل هذه القيم بنسبة 30-50٪. أظهرت العينات المعالجة حرارياً بنية مجهرية أقل تشققًا وأكثر خشونة. أدت المعالجة المغلقة إلى إعاقة تطور الانكماش الجاف وأنتجت مصفوفة رابطة قوية وكثيفة قادرة على مقاومة التغيرات الحجمية دون تشققات مجهرية واسعة النطاق مما أدى إلى زيادة مقاومة الشد لمصفوفة المادة الرابطة وقللت من كربنتها. أما في العينات غير المعالجة بالحرارة لوحظت تشكل ظاهرة التزهر أو مايعرف بالتمليح أثناء إزالة القالب.

تطرق [17] إلى دراسة أنواع المعالجة المختلفة لمدة 28 يومًا، بما في ذلك الهواء، والمعالجة المتقطعة بالماء (7 أيام في الماء تليها 21 يومًا في الهواء)، والمعالجة المستمرة بالماء لمدة 28 يومًا وذلك لتقييم تأثير المعالجة على أداء خرسانة الخبث المنشطة بالقلويات. المنشط القلوي المستخدم لتنشيط الخبث يتكون من سيليكات الصوديوم وهيدروكسيد الصوديوم. تم تغيير نسبة محلول المنشط القلوي إلى الخبث مع ثبات المكونات الجافة. تم إجراء الاختبارات لتقييم الخصائص الميكانيكية والمتانة قصيرة المدى. أشارت النتائج إلى أن نظام المعالجة يؤثر على أداء خرسانة الخبث المنشطة بالقلويات بشكل أكبر من تصميم الخلطة. أيضا أوضحت النتائج أن المعالجة بالهواء والماء المتقطع هي الأقل والأكثر فعالية حيث تم تسجيل مقاومة ضغط تزيد عن 70 ميجا باسكال بعد 28 يومًا، مع تحقيق 70 و 95٪ منها خلال يوم واحد و 7 أيام على التوالي. بينما في حالة تقنيات المعالجة بالماء المتقطعة والمستمرة فأن مقاومة الضغط لم تختلف بشكل كبير بين الحالتين لكن الأولى أنتجت خرسانة أكثر متانة ذات مقاومة أعلى وامتصاص أقل.

درس [18] تأثير معالجة ثاني أكسيد الكربون على عجينة الخبث المنشطة بمحلول من هيدروكسيد الصوديوم وسيليكات الصوديوم. تمت معالجة العينات بعد فك القوالب في ثلاث بيئات مختلفة، أولا: غرفة بيئية بالحفاظ على رطوبة نسبية 85٪ و25 درجة مئوية؛ ثانيا: وعاء ضغط ثاني أكسيد الكربون 3 بار؛ وثالثا: غرفة ثاني أكسيد الكربون بالحفاظ على تركيز ثاني أكسيد الكربون 20٪ ورطوبة نسبية 70٪ و25 درجة مئوية. تم فحص مقاومة الضغط وتحليل حيود الأشعة السينية والقياس الحراري الوزني.

أثبتت جميع ظروف المعالجة المستخدمة فائدتها في تطوير مقاومة الضغط للعينات. لكن، كانت غرفة ثاني أكسيد الكربون 20٪ هي الأكثر فعالية؛ ويرجع ذلك إلى الإمداد المتزامن للرطوبة وثاني أكسيد الكربون داخل الغرفة. أشارت نتائج حيود الأشعة السينية والقياس الحراري الوزني أن العينات المعالجة في غرفة 20% CO2 تلقت كمية أكبر من هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H)، بينما استهلك الكالسيت المتكون في عمر مبكر مع مرور الوقت. ولذلك تم تكوين C-S-H نتيجة إلى ربط الكالسيت الناتج عن المعالجة بهلام السيليكا المذاب من الخبث المنشط بالقلويات.

أجرى [19] تجارب على مونة الخبث القلوي مع ثلاثة نسب مختلفة من الماء إلى المادة الرابطة . تم التنشيط باستخدام مزيج من هيدروكسيد الصوديوم وسيليكات الصوديوم، مع المعالجة المغلقة في الأكياس البلاستيكية والغمر الكامل في الماء. تم اختبار العينات تحت الضغط في عمر 3 أيام و7 أيام. بالإضافة إلى اختبار الانسياب وزمن الشك والانكماش الطولي. أظهرت النتائج أن منهجية المعالجة أثرت على مقاومة الضغط في كلا الأعمار حيث يسبب الغمر الكامل في الماء تطورًا مبكرًا للمقاومة حيث وصلت إلى مقاومة الضغط النهائية للخليط في عمر 3 أيام دون أي تحسن في المقاومة بعد ذلك. كذلك كانت المعالجة المختومة أو المغلقة أفضل لمقاومة الضغط لمدة 7 أيام.

في دراسة أجراها [20] عن تطور مجموعة الطور المتفاعلة والبنية الجزيئية للخبث القلوي المنشط المعرض للكربنة الطبيعية في الغلاف الجوي. تم التقييم مع استخدام المنشطات المختلفة والمعالجة في ظروف درجات الحرارة (20°C و 80°C). أظهرت النتائج أن الكربنة الطبيعية تؤدي إلى بلمرة سيليكات هيدرات ألومينوسيليكات الكالسيوم (C-A-S-H) وترسيب أشكال متعددة من كربونات الكالسيوم اعتمادا على تركيب المنشط. بينما المعالجة بدرجة الحرارة العالية تميل إلى زيادة مستوى البلورة لـ C-A-S-H، إلا أنها تؤثر بشكل بسيط على مقاومة الكربنة من حيث الطور والاستقرار الجزيئي.

أوضح [21] تأثير تركيز المنشط القلوي وظروف المعالجة (المحيطة، والماء، والمعالجة الحرارية المائية) على خصائص مقاومة الحرارة لمونة خبث الأفران. أظهرت النتائج أنه بغض النظر عن جرعة المنشط القلوي أن المعالجة الحرارية المائية تؤثر بشكل إيجابي على مقاومة الضغط للمونة بعد التعرض لدرجات حرارة عالية مقارنة بظروف المعالجة المحيطة والماء. أما بالنسبة لمقاومة الانحناء، فقد اكتسبت مونة الخبث المعالج بالحرارة المائية مقاومة بعد التعرض لدرجات حرارة عالية و كانت هذه الزيادة أعلى عند مستوى معين من التنشيط القلوي. أظهرت نتائج امتصاص الماء والمسامية والكثافة الظاهرية في نطاق درجة الحرارة من 600 إلى 800 درجة مئوية تقلبا في القيم. حيث كان التقلب أكبر لمونة الخبث التي تحتوي على 6-8٪ من المحلول القلوي. وفقًا لأنماط XRD فإن المعالجة الحرارية المائية تؤدي إلى مراحل أكثر استقرارًا قبل وبعد التعرض لدرجات حرارة عالية عند المقارنة بالمعالجة المحيطة والماء.

3. النتائج والمناقشة

تمت مراجعة العديد من الدراسات بشكل شامل لفهم تأثير طرق المعالجة المختلفة على الخصائص الميكانيكية والمتانة لمعاجين وخرسانة الخبث المنشطة قلويا. تمت مقارنة أهمية ظروف المعالجة مثل المحيط والماء والمعالجة بالحرارة وأنواع المعالجة الأخرى. فيما يلي قائمة بالاستنتاجات المحددة المستخلصة من المراجعة المنهجية:

1.3. المعالجة بالماء:

لا تعتبر طريقة معالجة المواد الرابطة المنشطة بالقلويات في الماء موضع تقدير كبير بسبب استخلاص المنشط. وهذا يظهر في نتائج اختبار مقاومة الانضغاط، فالغمر الكامل في الماء يسبب تطورًا مبكرًا للقوة بحيث تصل إلى مقاومة الانضغاط النهائية للخليط في عمر 3 أيام دون أي تحسن في القوة بعد ذلك. لذلك، لا يفضل استخدامها في حالة التنشيط القلوي؛ لأن العينات تبدأ في فقد الايونات القلوية، وهذا الفقد المتسارع في المياه في الأيام الأولى للمعالجة يقلل من تفاعل التنشيط القلوي داخل العينة. وبذلك تفقد الخلطة الخرسانية قوة التنشيط المضافة لها، كما يتشكل التزهر على سطح العينات وبذلك تفقد الخرسانة مقاومتها ومتانتها في عمر مبكر [14، 15، 17، 19 21]

2.3. المعالجة الحرارية:

تعطي المعالجة الحرارية نتائج مبهرة و مقاومة انضغاط عالية، وتؤدي زيادة درجة حرارة المعالجة إلى اكتساب قوة مبكرة أعلى لكل من المواد الرابطة القائمة على الخبث. أثبتت الدراسات أن المعالجة الحرارية تعطي بنية مجهرية أقل تشققا وأكثر خشونة من العينات الغير معالجة حرارياً. من وجهة نظر أخرى، بالرغم من أن الحرارة العالية تزيد من قوة المقاومة لكنها قد تسبب في ظهور انكماش وتشققات على سطح الخرسانة لذلك يوصى بدرجة حرارة 65°C للمعالجة بدون تشققات على سطح العينات. أيضا يوصى بالمعالجة الحرارية عندما تكون الأعمار المبكرة مهمة للدراسة لأنها تؤدي إلى تعزيز طاقة عالية ومفيدة جدا في الساعات الأولى من المعالجة. علاوة على ذلك، إن المعالجة الحرارية تتأثر بنسبة تركيز المنشط في الخلطة، فعند استخدام هيدروكسيد الصوديوم كمنشط أعطى أفضل النتائج بسبب تشكيل الكمية المثالية من التوبرموريت المتكون من سلاسل الدريركيتن (Dreierketten) دون المساس بالتوازن الكهربائي للمادة. ولكن، عند زيادة نسبة المنشط في الخلطة عن 10% لوحظ عدم تكوين هذه سلاسل في العينات بالرغم من نتائج المقاومة الجيدة. أيضا أثبتت الدراسات أن المعالجة بدرجة الحرارة العالية تميل إلى زيادة مستوى البلورة لـ C-A-S-H، إلا أنها تؤثر بشكل بسيط على مقاومة الكربنة من حيث الطور والاستقرار الجزيئي [12، 11، 15، 16،20 و21].

2.3. المعالجة المركبة:

في المعالجة المركبة يتم دمج نوعين من المعالجة مع بعضهما، كالمعالجة بالماء مع المعالجة الحرارية بالتناوب أو المعالجة الحرارية مع الأكياس البلاستيكية وغيرها. تعتبر المعالجة المركبة من الطرق التي أثبتت فعاليتها في المعالجة لأنها تؤثر بشكل جيد على الخصائص الميكانيكية لخرسانة الخبث. حيث أن المعالجة المركبة تزيد من قوة المقاومة وكذلك تؤدي إلى تقليل الانكماش الناتج عن المعالجة الاعتيادية بنسبة 30-50٪. وتختلف درجة فعاليتها حسب نوعي المعالجة التي يتم دمجها [11، 15، 16 و21].

4.3. المعالجة القلوية:

تعتبر من أفضل الطرق المستخدمة بعد المعالجة الحرارية، ففي هذا النوع من المعالجة يتم معالجة العينات في محلول قلوي بنفس تركيز المنشط المستخدم في الخلطة الخرسانية. وبذلك، يتم ضمان الحفاظ على المادة المنشطة بداخل الخلطة الخرسانية وبنفس التركيز وعدم فقد الايونات القلوية من الأسمنت القلوي المنشط مثلما يحدث في المعالجة بالماء. تعتبر هذه الطريقة فعالة جدا

وأعطت نتائج مقاومة عالية وزادت من الخصائص الميكانيكية للخرسانة وصالحة لجميع أنواع المنشطات لأن المعالجة تتم في نفس نوع المنشط وبنفس التركيز [15].

5.3.المعالجة في أكياس بلاستيكية محكمة:

أثبتت هذه الطريقة جدواها حيث تتم المعالجة في أكياس بلاستيكية محكمة الغلق وبذلك يتم ضمان عدم فقدان الرطوبة وفقدان الايونات القلوية المنشطة من العينات التي سيتم معالجتها. تؤدي المعالجة المغلقة إلى زيادة ملحوظة في مقاومة ومتانة الخرسانة خصوصا عند عمر 7 أيام بغض النظر عن نوع المنشط المستخدم. علاوة على ذلك، تؤدي إلى إعاقة تطور الانكماش الجاف وتنتج مصفوفة رابطة قوية وكثيفة قادرة على مقاومة التغيرات الحجمية دون تشققات مجهرية واسعة النطاق والذي يؤدي إلى زيادة مقاومة الشد لمصفوفة المادة الرابطة ويقلل من كربنتها [11، 12، 16 و19].

2.3. المعالجة بالموجات الصغرية (الميكروويف):

المعالجة بالميكروويف تعتبر من أفضل الطرق حيث حققت مقاومة مبكرة عالية و بنية دقيقة محسنة على جميع أنظمة المعالجة الأخرى. علاوة على ذلك، قلل إشعاع الميكروويف وقت المعالجة بالحرارة بشكل كبير و تسببت طاقة الميكروويف في زيادة إذابة الخبث في الوسائط القلوية مما أدى إلى تسريع التنشيط بشكل كبير. وبذلك، يمكن أن يصل الخبث إلى حوالي 90٪ من مقاومته لمدة 28 يومًا في الأيام السبعة الأولى. كذلك أدت المعالجة إلى بناء مصفوفة أكثر كثافة وضغطًا وأقوى وبالتالي أدت إلى اكتساب مقاومة ضغط أعلى مقارنة بالمعاجين المعالجة تحت الهواء والماء وأنظمة التسخين التقليدية [13].

7.3.المعالجة بثاني أكسيد الكربون:

أثبتت هذه المعالجة فائدتها في تطوير مقاومة الضغط لأسمنت الخبث المنشط. لكن، تكون أكثر فعالية عند المعالجة في غرفة ثاني أكسيد الكربون 20٪؛ ويرجع ذلك إلى الإمداد المتزامن للرطوبة وثاني أكسيد الكربون داخل الغرفة. أيضا تؤدي المعالجة بثاني أكسيد الكربون إلى استهلاك الكالسيت المتكون في عمر مبكر مع مرور الوقت بالإضافة إلى تكوين C-S-H نتيجة إلى ربط الكالسيت الناتج عن المعالجة بهلام السيليكا المذاب من الخبث المنشط بالقلويات [18].

8.3. المعالجة في درجة حرارة الغرفة:

تعتبر هذه المعالجة من الطرق التي لم تثبت فعاليتها ولا تتماشى مع الأسمنت القلوي المنشط. حيث أظهرت ضعف في الخواص الميكانيكية، كذلك لوحظ أن الانكماش يكون فيها أعلى من طرق المعالجة الأخرى بالإضافة إلى تكون التزهر على سطح العينات مما يؤدي إلى تقليل المتانة وقوة المقاومة [15، 16، 17، 20 و21].

9.3.المعالجة بالجير المطفأ:

بالرغم من أن المعالجة بالجير أثبتت فعاليتها في الخرسانة الاعتيادية لكنها أظهرت ضعف كبير في الخصائص الميكانيكية للخرسانة المنشطة قلويا وذلك لتكون ظاهرة التزهر على سطح العينات بشكل كبير. لذلك تعتبر هذه المعالجة غير ملائمة لأسمنت الخبث المنشط بالقلويات [12].

4. **الخاتمة والتوصيات**

إن اختيار نظام المعالجة يؤثر على أداء خرسانة الخبث المنشطة بالقلويات بشكل أكبر من تصميم الخلطة. فللمعالجة تأثير كبير على خصائص مقاومة المادة الرابطة المنشطة بالقلويات ومساميتها وامتصاصها للماء وانكماشها الجاف. ومن خلال الدراسات السابقة يمكن تلخيص الأتي:

- منهجيات المعالجة التقليدية بالماء والجير لا يمكن استعمالها في هذا النوع من الخلطات.
- المعالجة بالموجات القصرية (الميكروويف) من أفضل أنواع المعالجات لأنها تقصر من وقت المعالجة وتسرع من عملية التنشيط وتحقق المقاومة العالية المبكرة والبنية الدقيقة المحسنة بدون تشققات.
- المعالجة الحرارية تعتبر من المعالجات الجيدة والمفضلة ولكن اختيار الحرارة العالية يتسبب في حدوث تشققات مما يؤثر على مقاومة الانحناء والشد بشكل سلبي، يمكن تقليل هذا التأثير بتعريض العينات لعملية التصليد الحراري. كذلك أثبتت الدراسات أن درجة حرارة 65°C درجة معالجة مثالية لأنها تقلل هذه التشققات بنسبة 30-50%.
- المعالجة القلوية تعتبر من المعالجات الجيدة التي أعطت مقاومة عالية وذلك لأن تركيز المنشط في الخلطة نفس تركيز محلول المعالجة وبالتالي تمنع هجرة الأيونات القلوية من الخلطة إلى الماء كما حدث في المعالجة المائية والمعالجة بالجير.
- المعالجة المركبة تعطي نتائج متفاوتة حسب طريقة تركيب المعالجة فبعضها حقق نتائج مقاومة عالية جدا. فمثلا، المعالجة الحرارية المائية تؤثر بشكل إيجابي على مقاومة الضغط بغض النظر عن جرعة المنشط القلوي لكن بالنسبة لمقاومة الانحناء فإنها تكتسب مقاومة عند مستوى معين من التنشيط.
- المعالجة المغلقة يمكن استخدامها مع منشط سيليكات الكالسيوم لأن له تأثير تنشيط عالي ولا يحتاج إلى درجات حرارة عالية للتنشيط. أما في حالة استخدام هيدروكسيد وكربونات الصوديوم كمنشط لا ينصح بهذا النوع من المعالجة لأن هذا النوع من المنشطات يحتاج إلى درجات حرارة عالية لحدوث التفاعل.

كذلك عند اختيار نوع المعالجة يجب الأخذ في الاعتبار ما يلي:

- نوع التنشيط القلوي: المنشطات المركبة أكثر فائدة من استخدامها بشكل فردي. بعض المنشطات لها تأثير تنشيط أعلى من المنشطات الأخرى وبالتالي لا تحتاج إلى تطبيق المعالجة الحرارية لإتمام التفاعل على عكس المنشطات الأخرى.
- نسبة تركيز المنشط القلوي: زيادة كمية المنشط القلوي وتركيزه يحسن الخواص الميكانيكية إلى حد ما ويقصر وقت المعالجة ويسرع من تطوير مقاومة الضغط. لكن، يسبب أيضا في حدوث الانكماش الجاف وتقليل مقاومة الانحناء ويؤثر على امتصاص الماء والمسامية والكثافة الظاهرية.
- استمرارية المعالجة: المعالجة المستمرة بعد 28 يوما تحسن من مقاومة الانحناء ومقاومة الضغط ومقاومة اختراق الكلوريد بشكل كبير في المونة.

أيضا من المهم التحقيق في منهجيات المعالجة الجديدة التي ستكون أكثر فعالية في الموقع، وأكثر قابلية للتطبيق. كذلك البحث في أنواع المعالجة المركبة والتركيز على تحسين مقاومة الانحناء والشد فمعظم أنواع المعالجات تحسن بشكل كبير من مقاومة الضغط ولكن تقلل من مقاومة الانحناء والشد.

5. قائمة المراجع

[1]- K. Yang, J. Song, K. S.-J. of C. Production, and undefined 2013, "Assessment of CO2 reduction of alkali-activated concrete _ Elsevier Enhanced Reader.pdf," *Elsevier*, vol. 39, 2013.

[2]- D. Shen, Y. Jiao, Y. Gao, S. Zhu, and G. Jiang, "Influence of ground granulated blast furnace slag on cracking potential of high performance concrete at early age," *Construction and Building Materials*, vol. 241, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117839.

[3]- A. Qi, X. Liu, Z. Wang, and Z. Chen, "Mechanical properties of the concrete containing ferronickel slag and blast furnace slag powder," *Construction and Building Materials*, vol. 231, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117120.

[4]- M. Criado, B. Walkley, X. Ke, J. L. Provis, and S. A. Bernal, "Slag and activator chemistry control the reaction kinetics of sodium metasilicate-activated slag cements," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 12, 2018, doi: 10.3390/su10124709.

[5]- C. Li, H. Sun, and L. Li, "A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 9. 2010. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.

[6]- X. Zhu, M. Zhang, K. Yang, L. Yu, and C. Yang, "Setting behaviours and early-age microstructures of alkali-activated ground granulated blast furnace slag (GGBS) from different regions in China," *Cement and Concrete Composites*, vol. 114, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103782.

[7]- R. Tänzer, A. Buchwald, and D. Stephan, "Effect of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 48, no. 3, 2014, doi: 10.1617/s11527-014-0461-x.

[8]- Y. Ding, J. G. Dai, and C. J. Shi, "Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review," *Construction and Building Materials*, vol. 127, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.121.

[9]- S. Mundra *et al.*, "Steel corrosion in reinforced alkali-activated materials," *RILEM Technical Letters*, vol. 2, 2017, doi: 10.21809/rilemtechlett.2017.39.

[10]-X. Wei, D. Li, F. Ming, C. Yang, L. Chen, and Y. Liu, "Influence of low-temperature curing on the mechanical strength, hydration process, and microstructure of alkali-activated fly ash and ground granulated blast furnace slag mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 269, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121811.

[11]-A. Kocot, A. Ćwirzeń, T. Ponikiewski, and J. Katzer, "Strength characteristics of alkali-activated slag mortars with the addition of pet flakes," *Materials*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/ma14216274.

[12]-T. T. Tran, H. Kang, and H. M. Kwon, "Effect of heat curing method on the mechanical strength of alkali-activated slag mortar after high-temperature exposure," *Materials*, vol. 12, no. 11, 2019, doi: 10.3390/ma12111789.

[13]-M. S. El-Feky, M. Kohail, A. M. El-Tair, and M. I. Serag, "Effect of microwave curing as compared with conventional regimes on the performance of alkali activated slag pastes," *Construction and Building Materials*, vol. 233, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117268.

[14]-S. Fang, E. S. S. Lam, B. Li, and B. Wu, "Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag," *Construction and Building Materials*, vol. 249, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118799.

[15]-M. T. Marvila, A. R. Garcez de Azevedo, J. A. Tostes Linhares Júnior, and C. M. Fontes Vieira, "Activated alkali cement based on blast furnace slag: effect of curing type and concentration of Na20," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.02.088.

[16]-A. M. Humad, J. L. Provis, and A. Cwirzen, "Effects of Curing Conditions on Shrinkage of Alkali-Activated High-MgO Swedish Slag Concrete," *Frontiers in Materials*, vol. 6, 2019, doi: 10.3389/fmats.2019.00287.

[17]-H. El-Hassan, E. Shehab, and A. Al-Sallamin, "Effect of curing regime on the performance and microstructure characteristics of alkali-activated slag-fly ash blended concrete," *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 10, no. 5, 2021, doi: 10.1080/21650373.2021.1883145.

[18]-Y. Jun, S. H. Han, T. Y. Shin, and J. H. Kim, "Effects of CO2 curing on Alkali-activated slag paste cured in different curing conditions," *Materials*, vol. 12, no. 21, 2019, doi: 10.3390/ma12213513.

[19]-I. Zidan, M. A. Khalaf, and A. I. I. Helmy, "Properties of alkali-activated slag mortar and prediction of its compressive strength," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 11, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102536.

[20]-H. Ye, R. Cai, and Z. Tian, "Natural carbonation-induced phase and molecular evolution of alkali-activated slag: Effect of activator composition and curing temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 248, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118726.

[21]-D. Nasr, A. H. Pakshir, and H. Ghayour, "The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag (AAS) mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 190, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.099.