مراجعة لخرسانة الجيوبوليمر كبديل لخرسانة الاسمنت البورتلاندي العادي، المميزات و الصعوبات

م. هاجر البغدادي نصير، د. نوري الباشا

كلية الهندسة جامعة صبراته

الملخص

استمرار انتاج الاسمنت البورتلاندي سبب في زيادة كميات ثاني اكسيد الكربون المنبعثة للغلاف الجوي، وبالتالي تفاقم مشكلة الانحباس الحراري التي لها اثر سلبي علي البيئة. بالاضافة الي ذلك، انتاج الاسمنت البورتلاندي يستهلك كميات كبيرة من الخامات الطبيعية و الطاقة الاحفورية مما يسبب في استنزاف الموارد الطبيعية لكوكب الارض. لذلك وجب اتباع نهج اكثر استدامة ضرورة ملحة في اختيار البديل المستقبلي لخرسانة الاسمنت البورتلاندي.

خرسانة الجيوبوليمر هي بديل واعد لخرسانة الاسمنت البورتلاندي لما اظهرته من خصائص ميكانيكية و فيزيائية مشابهة او افضل من خرسانة الاسمنت البورتلاندي حسب عدة دراسات. تم في هذه الوقة مراجعة المقارنة بين عملية انتاج خرسانة الجيوبوليمر و انتاج خرسانة الاسمنت البورتلاندي من حيث انبعاثات ثاني اكسيد الكربون و استهلاك الطاقة و استغلال المواد المعاد تدويرها. حيث اظهرت الدراسات ان خرسانة الجيوبوليمر تمثل بديل جيد لخرسانة الاسمنت البورتلاندي من ناحية الاثار السلبية علي البيئة و الاستدامة. كما تم في هذه الورقة مراجعة سلوك خرسانة الجيوبوليمر عند درجات حرارة عالية. بشكل عام، اظهرت الابحاث ان خرسانة الجيوبوليمر ذات ثبات حراري افضل من خرسانة الاسمنت البورتلاندي من ناحية الموصولية الحرارية و فقد الوزن و مقاومة الضغط عند درجات الحرارة العالية. بالرغم من المميزات الا انه يوجد بعض الصعوبات كعدم وجود دراسات كافية لفهم السلوك الكيميائي و الميكانيكي و الفيزيائي

للجيوبوليمرات و الاختلافات في التنفيذ و المعالجة بينها و بين الخرسانة الاعتيادية. هذه الصعوبات تعيق استخدام خرسانة الجيوبوليمر في التطبيقات الانشائية المختلفة.

الكلمات الدالة: خرسانة الجيوبوليمر، الخرسانة الخضراء، بدائل خرسانة الاسمنت البورتلاندي، مقاومة الحرارة العالية.

1. المقدمة:

الخرسانة المنتجة بواسطة الاسمنت البورتلاندي تعتبر مادة اساسية لتطور البشرية حيث يتم استخدامها في انشاء المباني و الطرق و الجسور و السدود. الا ان انتاج الاسمنت البورتلاندي يستهلك كميات كبيرة من الموارد الطبيعية و يخلف بصمة كربونية ضخمة نتيجة انبعاث غازات الاحتباس الحراري. حديثا ظهرت الحاجة الي البحث عن بدائل تكون اكثر استدامة و اقل اثرا علي البيئة. خرسانة الجيوبوليمير تعتبر بديل واعد لخرسانة الاسمنت البورتلاندي. يمكن تعريف خرسانة الجيوبوليمر بانها خرسانة تحتوي علي كافة المواد الاساسية للخرسانة ماعدا الاسمنت البورتلاندي. المادة الرابطة لخرسانة الجيوبوليمر تنتج من تفاعل محلول قلوي (خليط من سليكات الصوديوم او البوتاسيوم و هيدروكسيد الصوديوم او البوتاسيم) مع خام غني بالسيليكا و الألومينا ك (ميتاكاولين او الرماد المتطاير او خبث الحديد)، هذا وقد يتم استخدام خام واحد او خامين معا في تصنيع خرسانة الجيوبوليمر. الشكل (1) يوضح كيفية تحضير خرسانة الجيوبوليمر.

تسمية الجيوبوليمر تم ابتكارها من قبل العالم الفرنسي (Davidovits) في 1978 (Davidovits & Davidovics, 1991). منذ بدايتها شكلت خرسانة الجيوبوليمر بديل واعد لخرسانة الاسمنت البورتلاندي حيث تم استخدامها في عدة مجالات انشائية كإنشاء الانفاق و كمرات الجسور سابقة الصب و الطباعة الثلاثية الابعاد و عمليات الصيانة السريعة كصيانة مدارج الطائرات. عدة دراسات اثبتت ان خرسانة الجيوبوليمر تتميز بأداء افضل او مكافئ لأداء الخرسانة الاسمنت البورتلاندي فمثلا مقاومة الضغط لخرسانة الجيوبوليمر تكون مساوية او افضل من مقاومة الضغط للخرسانة الاسمنت البورتلاندي. بينما تتميز خرسانة

الجيوبوليمر بشكل كبير عن خرسانة الاسمنت البورتلاندي بانها صديقة للبيئة و استغلالها للفضلات و النواتج الثانوية للصناعات و انها ذات مقاومة عالية للحرارة. خواص خرسانة الجيوبوليمر تتاثر بشكل كبير بعدة عوامل و منها نسبة السيليكات الي الالومنيا و تركيز محلول هيدروكسيد الصوديوم او البوتاسيوم و ظروف المعالجة و المحتوي الغير المتبلر من السيليكا و الالومنيا. في هذا البحث سيتم مناقشة ابرز نقاط الضعف وسلبيات الخرسانة المنتجة بواسطة الاسمنت البورتلاندي وابرز الخواص التي يمكن ان تتحسن عند استخدام خرسانة الجيوبوليمر. وايضا سيتم سرد الصعوبات التي تواجهها خرسانة الجيوبوليمر لتصبح بديل فعلي و عملي للخرسانة الاعتيادية.

الشكل 1 كيفية تحضير خرسانة الجيوبوليمر

2. بعض اوجه القصور في الخرسانة المنتجة بواسطة الاسمنت البوتلاندي

- **التاثير السلبي علي البيئة و استهلاك الطاقة**

تصنيع الخرسانة كمادة تعتبر ذات تأثير بسيط علي البيئة مقارنة بتصنيع الفولاذ للبناء. ولكن بسبب الكمية الكبيرة المستخدمة في اغلب التطبيقات الانشائية فانها تعتبر ثاني اكثر مادة مستخدمة في العالم بعد الماء، فأنها تتسبب في حوالي 5% من كل الانبعاثات المتسبب بها الانسان (Worrell et al., 2001) .

خلال انتاج الاسمنت البورتلاندي ينبعث الي الهواء كمية كبيرة من ثاني اكسيد الكربون (CO_2) و الذي هو احد الاسباب الرئيسية للانحباس الحراري. اثبتت الدراسات انه لكل طن منتج من الاسمنت البورتلاندي ينبعث 0.9 طن من ثاني اكسيد الكربون الي الغلاف الجوي (Davidovits, 2002). حيث ان جزء بسيط من انبعاثات ثاني اكسيد الكربون (CO_2) في الخرسانة ينتج عن عملية نقل الخرسانة الي الموقع. بينما الجزء الاكبر من الانبعاثات تنتج عن عملية تصنيع الاسمنت. اغلب هذه الانبعاثات تنتج عن تحول اكسيد كربونات الكالسيوم حجر الكلس ($CaCO_3$) الي اوكسيد الكالسيوم (CaO) و ثاني اكسيد الكربون (CO_2). و الجزء المتبقي ينبعث من حرق الوقود وذلك لرفع درجة حرارة التفاعل الي 1250 درجة مؤوية.

$$Ca\,CO3 + Heat \xrightarrow{1250°C} Ca\,O + CO2\uparrow$$

من ناحية اخري، الطاقة المستهلكة في عمليات انتاج الاسمنت من حرق للحجر الكلسي و استخراج للخامات و طحن الكلنكر (Clinker) تمثل حوالي 5% من الطاقة المستهلكة في العالم في مجال الصناعات (Worrell et al., 2001).

- **استغلال الفضلات و النواتج الثانوية لعمليات التصنيع**

اثناء عمليات التصنيع ينتج نواتج ثانوية غير مرغوب بها تسبب في اثر سلبي علي البيئة. من اهم النواتج الثانوية هي الرماد المتطاير الذي يعتبر احدي النواتج الثانوية لعمليات حرق وقود الفحم في محطات توليد الطاقة الكهربائية و خبث الحديد الذي يعتبر احد النواتج الثانوية لمصانع الحديد الصلب. هذه النواتج

الصناعية تتراكم في اكوام ضخمة جدا و تحتاج لمساحات كبيرة للتخزين. فطبقا لمصنع مصراته للمواد الصلب فانه في عام 2016م وصل التراكمي السنوي لخبث الحديد الي حوالي 56 الف طن (مجلة الصلب الليبي، 2017).

من ناحية اخري هدم المباني لغرض زيادة السعة السكانية و الاضرار الناتجة بالمنشآت نتيجة الصراعات المسلحة تخلف كميات كبيرة من مخلفات مواد البناء. حيث ان عدة احصاءات اثبتت ان مخلفات مواد البناء تمثل من 20% الي 30% من المواد الملقاة في اماكن الطمر الصحي (Bossink & Brouwers, 1996). وبسبب الاثر البيئي السلبي لهذه المخلفات وجب علي الباحثين ايجاد حلول لإعادة تدوير هذه المخلفات.

استغلال النواتج الثانوية للصناعات و مخلفات مواد البناء المعاد تدويرها يعتبر بسيط جدا في صناعة الاسمنت البورتلاندي. وهذا و قد يتم استبدال جزء من الاسمنت البورتلاندي بالرماد المتطاير او خبث الحديد او معا اثناء خلط الخرسانة. الا ان نسب الاستبدال تكون في حدود 30% علي اقصي تقدير للحصول علي مواصفات جيدة للخلطة الجديدة. يجب البحث عن مواد اكثر استدامة و استخدام المواد المعاد تدويرها علي نطاق اوسع لأنه في المستقبل قد تصبح المواد الخام لصناعة الخرسانة نادرة او صعب الحصول عليها.

- **تأثير الحرارة علي الخرسانة المصنعة بالإسمنت البورتلاندي**

بشكل عام الخرسانة كمادة تعتبر ذات مقاومة جيدة للحرارة لاستعمالها في التطبيقات التقليدية (Hussin et al., 2014)، وذلك نظرا لموصليتها الضعيفة للحرارة و التغلغل البطيء للحرارة داخلها (Kodur, 2014). ولكن عند درجات حرارة عالية الخرسانة تقل مقاومتها للحرارة بشكل كبير. المونة الاسمنتية الرابطة بين الركام

وجد انها تتحلل مع زيادة درجة الحرارة وتصبح غير مستقرة كيميائيا. فالماء يتبخر من جل هيدرات الكالسيوم و السيليكا (C–S–H) عند 105 درجة مئوية و الذي يعتبر ناتج اساسي لعملية الإيماءة للإسمنت. وعند درجة حرارة من 400 الي 500 درجة مئوية تحدث عملية تحلل لمركب هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$) (Luhar et al., 2021). و بالتالي الخصائص الميكانيكية و صلابة الخرسانة تقل بشكل كبير عند تعرضها لدرجات حرارة عالية بسبب التغير في البنية الفيزيائية و الكيميائية (Luhar et al., 2021). هذه التغيرات تودي الي فقد في الخواص الميكانيكية كمقاومة الضغط.

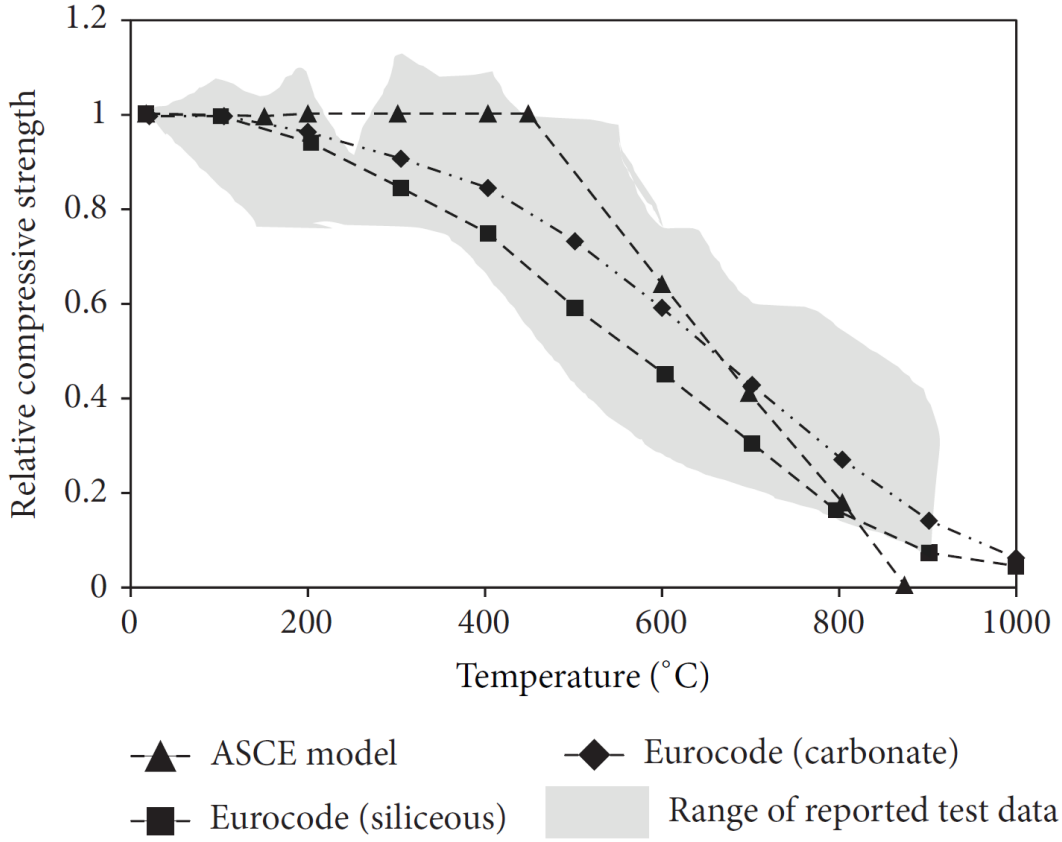
خلال ارتفاع درجة الحرارة في الخرسانة قد يحدث تكسر او تقشر للخرسانة نتيجة للضغط الداخلي الناتج عن تبخر المياه. و الذي يسبب في خطر علي الحياة البشرية اثناء الحريق نتيجة سقوط اجزاء من الكمرات و الأسقف، و ايضا فأنها تتسبب في تقشر الغطاء الخرساني و ظهور حديد التسليح الذي يعتبر ذو مقاومة اقل لدرجات الحرارة العالية. فانه عندما يصل حديد التسليح الي اعلي من 500 درجة مئوية يفقد جزء كبير من مقاومته للخضوع. فمثلا عند تعرض حديد التسليح الي 700 درجة مئوية لمدة ساعة فانه يفقد حوالي 40% من اقصي مقاومة للشد (Ahmed, 2007).

الحريق يتسبب في سريان الحرارة الي المنشأ الخرساني مما يسبب في زيادة الحرارة في عناصر المنشأ و الذي يؤدي الي تمدد حراري و تبخر للمياه داخل الخرسانة و زيادة في ضغط بخار الماء داخل الخرسانة و نقص في الخواص الميكانيكية (FIB Bulletin 38, 2007). خلال الحريق قد تصل درجات الحرارة الي 1100 درجة مئوية في المبني او 1350 درجة مئوية في الانفاق ولفترات قد تمتد الي ساعتين وبمعدل زيادة في الحرارة يصل الي 30 درجة مئوية في الدقيقة للمباني و 240 درجة مئوية في الدقيقة للإنفاق (FIB Bulletin 38, 2007). لذلك فان مقاومة الحريق هي احد اهم العوامل التي يجب اخذها في الاعتبار عند التصميم الانشائي للمباني. يمكن تعريفها بانها قدرة مكونات المبني علي اداء وظيفتها المصممة من اجلها

خلال التعرض لحريق معين و لمدة معينة. اختيار المواد المناسبة ذات الاداء الجيد اثناء الحريق مهم جدا لتقليل الضرر للمبني و حماية حياة مستعملي المبني (Novak & Kohoutkova, 2018).

تصرف الخرسانة عند درجات حرارة عالية يتأثر بعدة عوامل ومنها معدل زيادة الحرارة و نوع الركام و نسبة الماء الي الاسمنت. ارتفاع درجة الحرارة في الخرسانة قد يتسبب في شقوق داخلية بالخرسانة او انفجار جزء من الخرسانة نتيجة للصدمة الحرارية، و التمدد في الركام قد يتسبب بإجهادات داخلية في الخرسانة. يمتد تأثير درجات الحرارة العالية علي الخرسانة الي تقليل اغلب الخصائص الفزيائية و الميكانيكية، علي سبيل المثال زيادة درجة حرارة الخرسانة يقلل التوصيل الحراري للخرسانة و الوزن و مقاومة الضغط و مقاومة الشد و معامل المرونة (Kodur, 2014).

الشكل (2) يلخص اداء مقاومة الضغط للخرسانة الاعتيادية تحت درجات حرارة عالية. حيث استخدم الباحث (Kodur, 2014) الجزء المضلل باللون الرمادي لتمثيل ملخص البيانات السابقة المستخلصة من الدراسات السابقة. يتضح من الشكل وجود فروقات كبيرة و لكن منتظمة للبيانات المتحصل عليها للخرسانة خلال المدي من 20 الي 800 درجة مئوية. هذه الفروقات يمكن تفسيرها بسبب استخدام معدلات زيادة حرارة مختلفة و احجام مختلفة للعينات و طرق مختلفة للمعالجة و ظروف اختبار مختلفة. بالنسبة للخرسانة الاعتيادية، مقاومة الضغط تتأثر بشكل بسيط نتيجة ارتفاع درجة الحرارة حتي 400 درجة مئوية (Kodur, 2014).



شكل 2 العلاقة بين مقاومة الضغط لخرسانة الاعتيادية و درجة الحرارة المعرضة لها طبقا لـ (الكود امريكي و الكود الاوروبي و عدة ابحاث مختلفة) (Kodur, 2014)

نتيجة للفقد في مقاومة الضغط و احتمال التكسر و التقشر نتيجة ضغط بخار الماء عند درجة حرارة اعلي من 400 درجة مئوية، ظهرت الحاجة الي البحث عن مادة بناء ذات مقاومة للحرارة افضل من الخرسانة. الجيوبوليمر يعتبر مادة ذو مقاومة عالية للحرارة و ثبات كيميائي و حراري عالي. فقد لوحظ ان بنية الجل تتحلل بشكل بسيط عند 700 – 800 درجة مئوية (Duxson & Lukey & Van Deventer, 2006).

3. الحلول التي يقدمها الجيوبوليمر

- **الاثر البيئي و استهلاك الطاقة لخرسانة الجيوبوليمر**

الجيوبوليمر يتم انتاجه بطريقة مختلفة عن الاسمنت البورتلاندي. حيث ان انتاج الجيوبوليمر لا يحتاج الي درجات حرارة عالية. الجيوبوليمر يحتاج لدرجات منخفضة لخلط خامات الالمونيا و السيليكا (الرماد المتطاير او الميتاكاولن) والذي يؤدي الي انخفاض كبير في انبعاثات ثاني اكسيد الكربون و استهلاك الطاقة. مرحلة انتاج الجيوبوليمر ينتج عنها استهلاك طاقة اقل بحوالي 60% من عملية انتاج الاسمنت البورتلاندي [13,12] و ينبعث عنها كمية اقل من ثاني اكسيد الكربون بنسبة 80% الي 90% مقارنة بعملية انتاج الاسمنت (Davidovits, 1994). حيث ان انتاج طن من اسمنت الجيوبوليمر يولد 0.184 طن من غاز (CO_2) بالمقارنة مع 0.9 طن من غاز (CO_2) المتولد من انتاج الاسمنت البورتلاندي (Davidovits, 2002). لذلك فان استغلال الجيوبوليمر كبديل للإسمنت في المستقبل سيكون ذو فائدة كبيرة من ناحية حماية البيئة و الحفاظ علي الطاقات علي كوكب الارض.

عدة دول متقدمة تفرض ضريبة علي الشركات المنتجة للإسمنت البورتلاندي مسماه بضريبة انبعاث الكربون و تحفز الصناعات النظيفة بيئيا بإعفائها جزئيا من الضرائب. السويد مثلا احدي اوائل الدول التي تفرض ضريبة علي الصناعات التي تنتج انبعاثات للكربون في عام 1991م. خلال مراجعة اسعار الصناعات المفروض عليها الضريبة لوحظ ارتفاع في اسعارها النهائية للمستهلك (Tax Foundation, 2021). بشكل مشابه تبنت جنوب افريقيا ضريبة انبعاث الكربون علي انتاج الاسمنت البورتلاندي في عام 2019م، حيث لوحظ ارتفاع اسعار الاسمنت البورتلاندي بنسبة من 1.5% الي 2.5% (Globalcement.com, n.d.). من ناحية اخري، صناعة الجيوبوليمر يعتبر من الصناعات ذات الاثر الكربوني البسيط علي البيئة مقارنة بصناعة الاسمنت البورتلاندي. لذا يمكن الاستفادة من الاعفاء من الضريبة عند تصنيع الجيوبوليمر بكميات كبيرة.

- **استغلال فضلات البناء و النواتج الثانوية لعمليات التصنيع لخرسانة الجيوبوليمر**

تحتوي اغلب انواع خرسانة الجيوبوليمر علي عدة مواد معاد تدويرها و نواتج ثانوية للصناعات المختلفة. وتكون هذه المواد عادة بنسب اعلي بشكل كبير من خرسانة الاسمنت البورتلاندي. حيث انه يتم استبدال 100% من كمية الاسمنت الموجود باحدي النواتج الثانوية للصناعات كالرماد المتطائر او خبث الحديد كما تم توضيحه في طريقة صنع خرسانة الجيوبوليمر سابقا. باعتبار هذه المواد خام غني بالسيليكا و الالومنيا المهم لتفاعل البلمرة. و ايضا يمكن استخدام مخلفات البناء في صناعة الجيوبوليمر فالدراسات التالية توضح امكانية استخدام مخلفات البناء من طوب بناء و مخلفات خرسانة و سيراميك و جرانيت و زجاج كمصدر للسليكا و الالومنيا في خرسانة الجيوبوليمر..

اشار الباحث (Vásquez et al., 2016) الي امكانية استعمال مسحوق من مخلفات المواد الخرسانية في صناعة خرسانة الجيوبوليمر. ولكن بسبب الطبيعة الشبه البلورية لهذه المخلفات فانه يجب اضافة مصدر الألومينا كـ (الميتاكاولين) و ذلك لغرض الحفاظ علي مقاومة ضغط عالية. في هذه الحالة، نسبة اكسيد الصوديوم (Na_2O) في الخليط يجب ان يتم اعادة تقيمها طبقا للتركيب الكيميائي للمواد المضافة.

اختبر الباحث (Allahverdi & Najafi, 2009) تاثير اضافة مسحوق من مخلفات طوب البناء و مسحوق مخلفات خرسانة عند 5 نسب استبدال مختلفة كمادة خامة للجيوبوليمر علي مقاومة الضغط القصوي. استخدم الباحث ثلاث نسب مختلفة من اكسيد الصوديوم و اربع محتويات مختلفة للماء في الخلط. وتمت معالجة عند درجة حرارة الغرفة و برطوبة نسبية 95% لمدة 24 ساعة. ومن ثم غمر العينات في حمام مائي. استنتج الباحث ان مخلفات طوب البناء تعطي نتائج افضل من مخلفات الخرسانة. ووصلت اقصي مقاومة للضغط عند 28 يوم الي 40 ميجاباسكال لخلطة محتوية علي فضلات طوب بناء و 8% اكسيد الصوديوم بالوزن للخلطة الجافة.

اختبر الباحث (Rapazote & Laginhas & Teixeira-Pinto, 2010) تاثير اضافة انواع مختلفة من مساحيق مخلفات السيراميك و مخلفات الخرسانة كمادة خام للجيوبوليمر علي مقاومة الضغط القصوي و مقاومة الحرارة. تم في الدراسة استخدام نسب مختلفة من مساحيق المخلفات ذات تركيزات (12.5 و 15) مولار من هيدروكسيد الصوديوم و تم الخلط مع سيليكات الصوديوم بنسبة 2:1. بعد الخلط تم معالجة العينات تحت درجة حرارة 65 درجة مئوية مع 98% رطوبة نسبية لمدة 48 ساعة. استنتج الباحث ان خرسانة الجيوبوليمر المستخدم بها مخلفات سيراميك و مخلفات خرسانة افضل من الخرسانة الاعتيادية في مقاومة الحرارة و الخواص الميكانيكية.

درس الباحث (Tchadjié et al., 2015) احتمالية استخدام فضلات الجرانيت كخام للجيوبوليمر. تم استخدام خليط من مسحوق الجرانيت بنسب من 40% الي 100% و مسحوق حبيبات هيدوكسيد الصوديوم بنسب من 0% الي 60%. من ثم تمت المعالجة الحرارية للخليط تحت درجة حرارة 550 درجة مئوية لمدة ساعتين. بعد ان برد الخليط تم سحقه الي مسحوق. عند تحضير الجيوبوليمر تم اضافة الميتاكاولين بنسبة 40% من خليط مسحوق الجرانيت و هيدروكسيد الصوديوم المعالج حراريا. من ثم تم اضافة الرمل و المادة الفعالة (سيليكات الصوديوم). تم معالجة الجيوبوليمر في درجة حرارة الغرفة الي وقت الاختبار مع مراعاة ان تكون مغطاة في اول 24 ساعة للحفاظ علي المحتوي المائي. استنتج الباحث بعد عمل فحص مجهري للعينات ان فضلات الجرانيت يمكن استخدامها كمصدر خام للجيوبوليمر و ان عملية المعالجة الحرارية و اضافة الميتاكاولين تساهم بشكل ايجابي في عملية البلمرة. مقاومة الضغط لعينة خليط الجيوبوليمر كانت من 6.25 الي 40.5 ميجاباسكال.

الدراسات السابقة اظهرت ان عملية البلمرة يمكن ان تحول عدة مخلفات مواد بناء ذات محتوي غني بالسيليكا و الألومينا الي مادة بناء ذات خواص ميكانيكية و فيزيائية ممتازة. هذا و يمكن استنتاج انه عند خلط هذه

المخلفات مع المواد الفعالة يجب التحقق من النسبة المثلي المضافة من المخلفات و التركيز الافضل لهيدروكسيد الصوديوم و احتمالية اضافة مواد معززة للتفاعل و طريقة المعالجة الامثل للحصول علي افضل النتائج الممكنة.

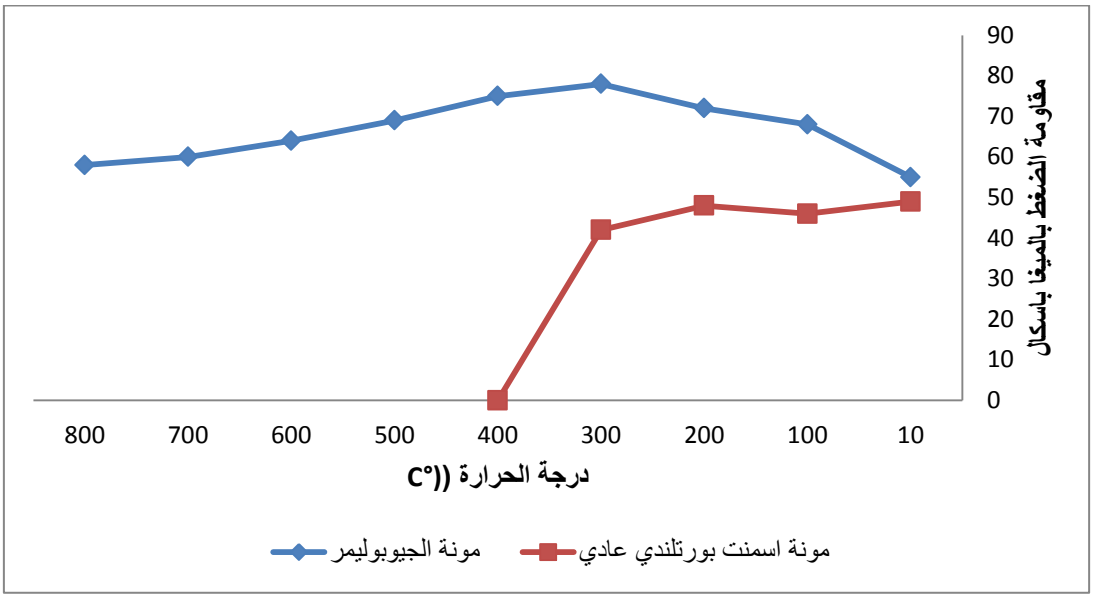
- **تأثير درجات الحرارة العالية علي خرسانة الجيوبوليمر**

خرسانة الجيوبوليمر بشكل عام تتصرف بشكل افضل من خرسانة الاسمنت البورتلاندي عند درجات الحرارة المرتفعة. يرجع ذلك الي خواصها الشبيهة بالسيراميك مما يجعلها مادة ذات مقاومة عالية للحرارة (Kong & Sanjayan, 2010). الانواع المختلفة لخرسانة الجيوبوليمر تعتبر ذات ثبات حراري عالي مقارنة بخرسانة الاسمنت البورتلاندي. فالموصلية الحرارية لخرسانة الجيوبوليمر افضل من خرسانة الاسمنت البورتلاندي. حيث ان الموصولية الحرارية للخرسانة عند درجة حرارة الغرفة (1.4 الي 3.6) واط \ متر كلفن (Kodur, 2014)، بينما الموصولية الحرارية للجيوبوليمر تتراوح بين (0.24 الي 0.3)واط \ متر كلفن (Li & Zhang, 2004).

و فقدان الوزن للجيوبولميرات نتيجة درجات الحرارة العالية اقل من خرسانة الاسمنت البورتلاندي. فمثلا، فقدان الحرارة لجيوبوليمر محتوي علي الميتاكاولين هو حوالي 13% عند 600 درجة مؤوية (Chen et al., 2013). بينما فقد الوزن لعجينة اسمنتية بورتلاندية يكون حوالي 27% عند تسخينها لـ 600 درجة مؤوية (Alarcon-Ruiz et al., 2005). الجيوبوليمر المحتوي علي الرماد المتطاير اظهر ايضا نتائج مشابهة بحوالي 6% فقد في الوزن عند 600 درجة موؤية (Ranjbar et al., 2014). و الجيوبولميرات ايضا تمتاز انها لا تصدر مواد سامة او روائح كريهة اثناء الحرق (Lyon et al., 1997).

اداء مقاومة الضغط للجيوبوليمر بالمقارنة مع العجينة الاسمنتية تحت درجات حرارة مختلفة يمكن تلخيصه في الشكل (3). مقاومة الضغط للخرسانة البورتلاندية العادية تقل بشكل كبير عند تخطي درجة الحرارة لـ

400 درجة مئوية (Xiao & König, 2004). بينما خرسانة الجيوبوليمر يمكن ان تصل الي 800 درجة مئوية بدون حدوث انخفاض كبير في مقاومة الضغط.



الشكل 3 مقاومة الضغط للجيوبوليمر (Kong & Sanjayan, 2010) و عجينة بورتلاندية إسمنتية (Medes, 2007) عند درجات حرارة مختلفة

يمكن ملاحظة ان مقاومة الضغط عند درجات حرارة عالية تعتمد علي مكونات المواد الخام و المواد الفعالة المستخدمة في تصنيعه. فالباحث (Kong & Sanjayan, 2008) درس سلوك الجيوبوليمر و خرسانة الجيوبوليمر عند تعرضه لـ 800 درجة مئوية. اكد الباحث ان للجيوبوليمر المحتوي علي رماد متطاير نوع (F) اظهر زيادة في مقاومة الضغط تصل الي 53%. تم اختبار عدة عوامل في الدراسة مثل نسبة الرماد المتطاير الي المحلول الفعال (KOH) و مدة المعالجة و نسبة سيليكات الصوديوم الي هيدروكسيد البوتاسيوم. وجد الباحث ان نسبة الرماد المتطاير الي المحلول الفعال تؤثر بشكل كبير علي مقاومة الحرارة العالية (Kong & Sanjayan, 2008).

و اختبر الباحث (Kong & Sanjayan, 2010) تأثير حجم الركام علي تصرف الخرسانة الجيبوبوليمر المحتوية علي رماد متطاير نوع (F) و سيليكات الصوديوم و اكسيد البوتاسيوم تحت درجات حرارة عالية ووجد ان الركام صغير الحجم اقل من 10مم ممكن ان يتسبب في تفتت و تشقق في خرسانة الجيوبوليمر ولكن وجد الركام ذو الحجم اكبر من 10مم اكثر استقرارا. ووجد ايضا ان تمدد الركام نتيجة زيادة الحرارة يتحكم ايضا في اداء خرسانة الجيوبوليمر.

و لاحظ الباحث (Bakharev, 2006) ان الجيوبوليمر المحتوي علي الرماد المتطاير و مادة فعالة تحتوي علي الصوديوم شهدت تدهور سريع في مقاومة الضغط عند 800 درجة مؤوية بسبب الزيادة الكبيرة في متوسط حجم المسام. بينما في الجيوبوليمر المحتوي علي الرماد المتطاير و سيليكات البوتاسيم كمادة فعالة، مقاومة الضغط تزداد مع زيادة الحرارة و التدهور يبدا عند 1000 درجة مئوية.

بينما بحث الباحث (Rovnanik & Šafránková, 2016) حول اداء الجيبوليمر المحتوي علي الميتاكاولين كمادة خام و قارنه بأداء الجيوبوليمر المحتوي علي الرماد المتطاير كمادة خام و لاحظ ان مقاومة الضغط للجيوبوليمر المحتوي علي الميتاكاولين تقل بشكل كبير عند تعرضه لدرجات حرارة عالية بالمقارنة بالجيوبوليمر المحتوي علي الرماد المتطاير. علل الباحث الاختلاف الي الاختلاف في التركيبة الجزيئية بين نوعي الجيوبوليمر. حيث انه مع زيادة درجة الحرارة فان الماء داخل الجيوبوليمر يبدا بالتبخر. ولان الجيوبوليمر المحتوي علي الميتاكاولين يكون ذو كثافة عالية فان البخار يكون اجهادات داخلية. وعند وصول هذه الاجهادات الي قيم عالية فإنها تسبب في تكون تشققات و من ثم انهيار البنية الجزيئية للجيبوليمر. بينما الجيوبوليمر المحتوي علي الرماد المتطاير يكون به مسام تعمل علي تخفيف ضغط البخار. مما يجعل الجيوبوليمر المحتوي علي الرماد المتطاير اقل تأثرا بدرجات الحرارة العالية.

عدة دراسات اظهرت ان الجيوبوليمرات مستقرة حراريا بشكل جيد عند درجات الحرارة العالية. فقد الكتلة و نسبة التمدد و الموصولية الحرارية للجيوبوليمر المتعرض لدرجات حرارة عالية اقل بكثير من خرسانة الاسمنت البورتلاندي. الخصائص الحرارية للجيوبوليمر ترتبط بشكل كبير بمكونات الجيوبوليميرات من مادة قلوية فاعلة و مادة خام للسيليكا و الألومينا.

4. الصعوبات التي تواجه خرسانة الجيوبوليمر كبديل لخرسانة الاسمنت البورتلاندي

يوجد عدة صعوبات تواجه استخدام خرسانة الجيوبوليمر علي نطاق شاسع. من اهم هذه الصعوبات:

1. نقص في الابحاث حول خصائص خرسانة الجيوبوليمر، خصوصا خاصية الديمومة.
2. الدراسات حول تأكل حديد التسليح داخل خرسانة الجيوبوليمر و التماسك بين حديد التسليح و خرسانة الجيوبوليمر لا تزال غير كافية حتي تكتسب خرسانة الجيوبوليمر قبول في مجال صناعة الانشاءات.
3. لا يوجد معايير لتصميم و تنفيذ خرسانة الجيوبوليمر مما يعيق تطبيقها في الانشاءات.
4. بعض انواع الجيوبوليمر تحتاج الي المعالجة في درجة حرارة عالية تصل الي 600 درجة مئوية حتي تكتسب بعض الخصائص. لذلك يجب تشجيع الابحاث المتعلقة بدراسة خصائص الجيوبوليمر المعالج عند درجات حرارة الغرفة.
5. هناك صعوبات في عملية صب خرسانة الجيوبوليمر حيث انها تحتاج الي تدريب العمالة علي الاجراءات المختلفة لتنفيذ خرسانة الجيوبوليمر و تحتاج الي استثمار مبدئي كبير مطلوب من اجل اعتماد المواد الخام.

5. الاستنتاجات

من خلال الدراسات المرجعية حول خرسانة الجيوبوليمر كبديل لخرسانة الاسمنت البورتلاندي يمكن استنتاج الاتي:

1. خرسانة الجيوبوليمر لديها امكانية كبيرة لتكون البديل لخرسانة الاسمنت البورتلاندي. مقاومة درجات الحرارة العالية و استغلالها لمخلفات مواد البناء و مخلفات بعض الصناعات هي بعض الميزات التي تتميز بها بعض انواع خرسانة الجيوبوليمر بالمقارنة مع خرسانة الاسمنت البورتلاندي. بالرغم من هذا فانه يوجد عدة معوقات يجب ان يتم حلها قبل ان يتم قبول خرسانة الجيوبوليمر من قبل صناعة الانشاءات.
2. خرسانة الجيوبوليمر تتميز بانها صديقة للبيئة و اقل استهلاكا للطاقة و اكثر استغلالا للفضلات في صناعتها بالمقارنة مع خرسانة الاسمنت البورتلاندي. و بالتالي يمكن اعتبارها احد المواد التي ستمكن البشرية من بناء مستقبل مستدام من حيث استغلال اعادة تدوير النفايات و التقليل من فاتورة الطاقة المستهلكة في الانشاء و تقليل اثر الصناعة علي البيئة.
3. خرسانة الجيوبوليمر تعتبر ذات ثبات حراري عالي بالمقارنة بخرسانة الاسمنت البورتلاندي. فالموصولية الحرارية و فقد الوزن و اداء مقاومة الضغط لخرسانة الجيوبوليمر عند درجات حرارة عالية افضل من خرسانة الاسمنت البورتلاندي.
4. نسبة السيليكات الي الالومونيا و نوع مواد المحلول الفعال و تركيز المحلول الفعال و ظروف المعالجة و المحتوي الغير متبلر من السيليكا و الامونيا ونوع الركام و المقاس الاعتباري له هي بعض العوامل التي توثر علي خصائص المنتج النهائي لخرسانة الجيوبوليمر.

المراجع:

1. Ahmad, Suhaib. (2017). Effect of Sustained Elevated Temperature on Mechanical Behavior of Reinforcing Bar. *Procedia Engineering*. 173. 905-909. 10.1016/j.proeng.2016.12.139.
2. Alarcon-Ruiz, Lucia & Platret, Gerard & Massieu, Etienne & Ehrlacher, Alain. (2005). The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on a Cement Paste. *Cement and Concrete Research*. 35. 609-613. 10.1016/j.cemconres.2004.06.015.
3. Allahverdi, Ali & Najafi, Ebrahim. (2009). Construction Wastes as Raw Materials for Geopolymer Binders. *International Journal of Civil Engineering*. 7. 154-160.
4. Bakharev, T.. (2006). Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. *Cement and Concrete Research*. 36. 1134-1147. 10.1016/j.cemconres.2006.03.022.
5. Bossink, Bart & Brouwers, H.J.H.. (1996). Construction Waste: Quantification and Source Evaluation. *Journal of Construction Engineering and Management*. 122. 1996. 10.1061/(ASCE)0733-9364(1996)122:1(55).
6. Chen, J., Tao, S., Lei, X. and Zhu, X., (2013). The Characteristics of Metakaolinite-Based Geopolymer at Different Temperature. *Applied Mechanics and Materials*, 442, pp.152-155.
7. Davidovits, Joseph & Davidovics, Michel. (1991). Geopolymer: Ultra-High Temperature Tooling Material for the Manufacture of Advanced Composites. *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*. 36. 1939-1949.
8. Davidovits, Joseph. (1994). Properties of Geopolymer Cements. SRIBM, Kiev. 1. 131-149.
9. Davidovits, Joseph. (2002). "Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications". *Geopolymer 2002 Conference*.
10. Duxson, Peter & Lukey, Grant & Van Deventer, Jannie. (2006). Thermal Evolution of Metakaolin Geopolymers: *Part 1 – Physical Evolution. Journal of Non-Crystalline Solids*. 352. 5541–5555. 10.1016/j.jnoncrysol.2006.09.019.
11. Fire design of concrete structures—materials, structures and modelling, FIB Bulletin 38, *The International Federation for Structural Concrete*, Lausanne, Switzerland, 2007.
12. Globalcement.com. (n.d.). Carbon tax. [online] Available at: <https://www.globalcement.com/news/itemlist/tag/Carbon%20tax> [Accessed 18 June 2021].

13. Hussin, M. & Putra Jaya, Ramadhansyah & Mirza, Jahangir & Ariffin, Mohd Azreen & Bhutta, Aamer. (2014). Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures. *Materials and Structures*. 48. 10.1617/s11527-014-0251-5.
14. Kodur, Venkatesh. (2014) Properties of Concrete at Elevated Temperatures, *International Scholarly Research Notices*, vol. 2014, Article ID 468510, 15 pages, 2014. https://doi.org/10.1155/2014/468510
15. Kong, D. and Sanjayan, J., (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(2), pp.334-339.
16. Kong, Daniel & Sanjayan, Jay. (2008). Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement & Concrete Composites - CEMENT CONCRETE COMPOSITES*. 30. 986-991. 10.1016/j.cemconcomp.2008.08.001.
17. Li, Zongjin & Zhang, Yunsheng. (2004). Development of Sustainable Cementitious Materials. Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology.
18. Luhar, Salmabanu & Chaudhary, Sandeep & Luhar, Ismail. (2018). Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*. 19. 10.1016/j.jobe.2018.05.025.
19. Luhar, Salmabanu & Nicolaides, Demetris & Luhar, Ismail. (2021). Fire Resistance Behaviour of Geopolymer Concrete: An Overview. *Buildings* 11, no. 3: 82. https://doi.org/10.3390/buildings11030082
20. Lyon, R., Balaguru, P., Foden, A., Sorathia, U., Davidovits, J. and Davidovics, M., (1997). Fire resistant Aluminosilicate Composites. *Fire and Materials*. 21(2), pp.67-73.
21. Mendes, A., Sanjayan, J. and Collins, F., (2007). Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures. *Materials and Structures*. 41(2), pp.345-350.
22. Novak, J. & Kohoutkova, A., (2018). Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature. *Fire Safety Journal*, 95, pp.66-76.
23. Ranjbar, Navid & Mehrali, Mehdi & Alengaram, U.Johnson & Simon, Hendrik & Metselaar, Hendrik & Mohd, Zamin & Jumaat, Zamin. (2014). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 65. 114-121. 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.064.

24. Rapazote, Joana & Laginhas, Cristóvão & Teixeira-Pinto, Amândio. (2010). Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste (CDW) - Resistance to Acid Attack. *Advances in Science and Technology*. 69. 156-163. 10.4028/www.scientific.net/AST.69.156.
25. Rovnanik, Pavel & Šafránková, Kristýna. (2016). Thermal Behaviour of Metakaolin/Fly Ash Geopolymers with Chamotte Aggregate. *Materials*. 9. 535. 10.3390/ma9070535.
26. Tax Foundation. (2021). Looking Back on 30 Years of Carbon Taxes in Sweden. [online] Available at: <https://taxfoundation.org/sweden-carbon-tax-revenue-greenhouse-gas-emissions/> [Accessed 18 June 2021].
27. Tchadjie, Léonel & Djobo, Jean Noël & Ranjbar, Navid & Tchakoute Kouamo, Herve & Kenne Diffo, Bernadin & Elimbi, A.. (2015). Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. *Ceramics International*. 42.
28. Vásquez, Alexander & Cárdenas, Venus & Robayo-Salazar, Rafael & Mejia, Ruby. (2016). Geopolymer based on concrete demolition waste. *Advanced Powder Technology*. 27. 10.1016/j.apt.2016.03.029.
29. Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. (2001). CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY. Annual Review Of Energy And The Environment, 26(1), 303-329. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303
30. Xiao, Jianzhuang & König, Gert. (2004). Study on concrete at high temperature in China - An overview. *Fire Safety Journal*. 39. 89-103. 10.1016/S0379-7112(03)00093-6.
31. مجلة الصلب الليبي، 2017. المنتجات الثانوية. [online] (4), p.19. Available at: <https://libyansteel.com/index.php/ar/2015-03-29-08-53-34> [Accessed 18 June 2021].