

A Review of Geopolymer Concrete's Resistance to High Temperatures

Gholamreza Havaei

Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Geopolymer is recognized as an alternative to ordinary Portland cement (OPC) due to its lower carbon emissions during production, higher strength, and good durability. Its inorganic framework determines its resistance to high temperatures. This paper presents a physico-chemical transformation of geopolymer under elevated temperatures, focusing on processes such as hydration, dehydroxylation, phase changes, pore structure alterations, and thermal shrinkage. These transformations explain its better resistance to high temperatures compared to ordinary Portland cement. Changes in the mechanical strength of geopolymer concrete and the mechanisms behind its increased/decreased resistance at high temperatures are summarized. Internal factors influencing the resistance to high temperatures in geopolymer concrete are comprehensively reviewed, including the choice of precursors, type of alkali cations, Si/Al ratio in the geopolymer system, and aggregate materials. The addition of certain additives and fibers can enhance the high-temperature performance of geopolymer concrete. Some researchers have investigated the high-temperature performance of geopolymer, and their efforts are reviewed comprehensively here. The insights provided in this paper will be valuable for researchers and engineers aiming to conduct further studies and applications in the field of high-temperature resistance of geopolymer.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 August 2021
Revise Date: 14 November 2021
Accept Date: 06 December 2021

Keywords:

Geopolymer Concrete
Slag
Fly ash
Durability

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525725.3740>

*Corresponding author: Gholamreza Havaei
Email address: Havaei@aut.ac.ir

مروری بر مقاومت بتن ژئوپلیمری در برابر دماهای بالا

غلامرضا هوآئی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

چکیده:

ژئوپلیمر به عنوان یک جایگزین برای سیمان پرتلند معمولی (OPC) شناخته می‌شود، زیرا در فرآیند تولید خود انتشار کربن کمتری دارد، مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهد و دوام خوبی دارد. چارچوب غیرآلی آن ویژگی‌های مقاومت در برابر دماهای بالا را تعیین می‌کند. این مقاله تحولی فیزیکوشیمیایی ژئوپلیمر را در برابر افزایش دما از نظر فرآیندهای آبدارشدگی و دی‌هیدروکسیلاسیون، تغییر فاز، تغییر ساختار منافذ و انقباض حرارتی نشان می‌دهد، که توضیحی برای مقاومت بهتر آن در برابر دماهای بالا در مقایسه با تغییرات سیمان پرتلند معمولی تحت دماهای بالا ارائه می‌دهد. تغییرات مقاومت مکانیکی بتن ژئوپلیمر و مکانیسم‌های مربوط به افزایش/کاهش مقاومت آن تحت دماهای بالا نیز بر این اساس جمع‌بندی شده‌اند. عوامل درونی تأثیرگذار بر مقاومت در برابر دماهای بالا در بتن ژئوپلیمر به طور جامع بررسی شده‌اند، از جمله انتخاب پیش‌ماده‌ها، نوع کاتیون‌های قلیایی، نسبت Si/Al در کل سیستم ژئوپلیمری و مصالح سنگی. افزودن برخی افزودنی‌ها و الیاف می‌تواند به بهبود عملکرد بتن ژئوپلیمر در برابر دماهای بالا کمک کند. برخی از محققان به کاربرد مقاومت در برابر دماهای بالای ژئوپلیمر پرداخته‌اند و تلاش‌های آن‌ها به طور جامع در اینجا بررسی نشده است. درک‌هایی که توسط این مقاله ارائه می‌شود، برای محققان و مهندسانی که قصد دارند مطالعات و کاربردهای بیشتر در زمینه مقاومت در برابر دماهای بالای ژئوپلیمر انجام دهند، ارزشمند خواهد بود.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمر، سرباره، خاکستر بادی، دوام

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|----------------|---|--------------|---------------|--|------------|------------|
| doi: | https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525725.3740 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | 10.22065/jsce.2025.525725.3740 | ۱۴۰۱/۰۳/۳۱ | ۱۴۰۰/۰۹/۱۵ | ۱۴۰۰/۰۹/۱۵ | ۱۴۰۰/۰۸/۲۳ | ۱۴۰۰/۰۶/۰۸ |
| | | | | *نویسنده مسئول: | | |
| | | | | پست الکترونیکی: | | |
| | | | | غلامرضا هوآئی | | |
| | | | | havaei@aut.ac.ir | | |

۱- مقدمه

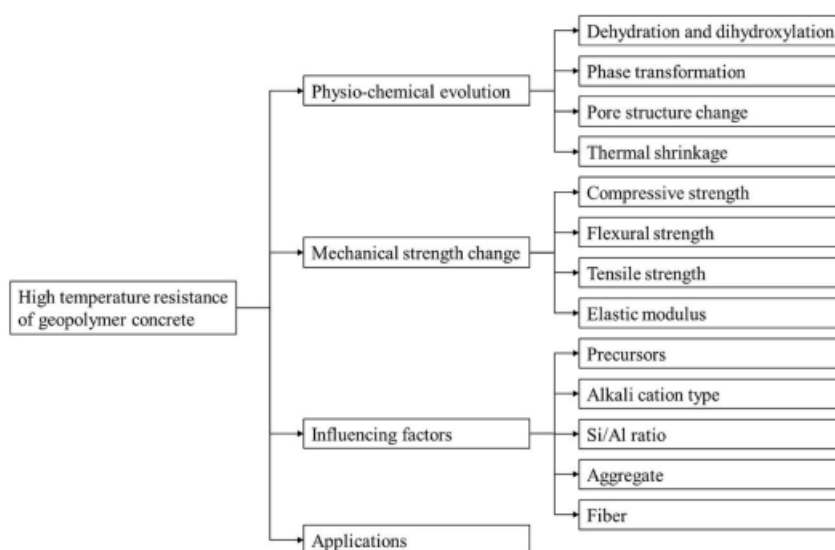
تحقیقات در زمینه توسعه پایدار مهندسی عمران، علاقه‌مندی به مصالح ساختمانی دوستدار محیط‌زیست را در سطح جهانی افزایش داده است. بازیافت پسماندهای صنعتی یا کشاورزی از طریق روش‌های فنی معقول می‌تواند منابع طبیعی را صرفه‌جویی کرده و آلودگی محیط‌زیست را کاهش دهد. برخی از پسماندهای صنعتی یا کشاورزی می‌توانند به مواد ساختمانی نوآورانه تبدیل شوند تا تحولی در استفاده از پسماندها به ثروت‌ها ایجاد شود [۱-۴]. فرآیند ژئوپلیمریزاسیون یکی از فناوری‌هایی است که برای استفاده از محصولات جانبی و پسماندهای صنعتی یا کشاورزی به کار می‌رود. ژئوپلیمر، محصول فرآیند ژئوپلیمریزاسیون است که از واکنش مواد آلومینوسیلیکاتی با فعال‌کننده‌های قلیایی تولید می‌شود. در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی (OPC)، که از طریق کلسینه‌سازی با دمای بالا از سنگ آهک تولید می‌شود و هر ساله هزاران تن دی‌اکسید کربن به جو می‌فرستد، تولید ژئوپلیمر از پسماندهای جامد به‌عنوان پیش‌ماده‌های خود استفاده می‌کند و می‌تواند انتشار CO₂ را به میزان ۴۰ تا ۶۵ درصد کاهش دهد [۵-۷]. علاوه بر مزایای زیست‌محیطی آن، بتن ژئوپلیمر همچنین می‌تواند مقاومت مکانیکی بالا، دوام خوب و محافظت کافی برای میلگردهای فولادی فراهم کند [۸]. بنابراین، بتن ژئوپلیمر یک نوع جدید از مواد سیمانی است که به‌عنوان جایگزین دوستدار محیط‌زیست برای بتن‌های بر پایه سیمان پرتلند در قرن ۲۱ مطرح می‌شود [۹].

مکانیسم سخت شدن ژئوپلیمرها اساساً شامل واکنش پلیمریزاسیون پیش‌ماده‌های ژئوپلیمری، معمولاً اکسیدهای آلومینوسیلیکاتی، با پلی‌سیلیکات‌های قلیایی است که یک چارچوب پلیمری سیلیکون-اکسیژن-آلومینیوم تولید می‌کند [۱۰]. به‌دلیل چارچوب غیرآلی آنها، ژئوپلیمرها به‌طور ذاتی مقاوم در برابر آتش هستند و نشان داده شده است که دارای ثبات حرارتی عالی هستند و تا دمای ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً هیچ تخریب ساختاری در ژل مشاهده نمی‌شود. درک مقاومت در برابر دماهای بالا در بتن ژئوپلیمر در دماهای بالاتر، از جمله رفتارهای آن در دماهای بالا و عوامل تأثیرگذار، می‌تواند ادغام بتن ژئوپلیمر را در کاربردهای زیرساختی تسریع کند. این امر به مالکان و پیمانکاران سیستم‌های زیرساخت، مهندسان و عموم مردم این امکان را می‌دهد که از ویژگی‌های برتر سیستم‌های چسبنده ژئوپلیمر استفاده کنند.

پست ژئوپلیمر بر پایه ساختار آلومینوسیلیکاتی است که در حالی که سیمان پرتلند معمولی عمدتاً از فازهای هیدراته سیلیکات کلسیم تشکیل شده است. فرآیندهای سخت شدن و محصولات مختلف آنها، رفتار متفاوتی را در هنگام گرم شدن تعیین می‌کنند. اگرچه بتن OPC به‌عنوان ماده‌ای غیرقابل اشتعال شناخته می‌شود، اما در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد یک افت ناگهانی در مقاومت آن مشاهده می‌شود و تقریباً در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تمام مقاومت خود را از دست می‌دهد [۱۱]. علاوه بر این، بتن‌های با مقاومت بالا یا بتن‌های فوق‌العاده با عملکرد بالا معمولی OPC در دماهای نسبتاً بالا مستعد ترک خوردن هستند [۱۲-۱۴]، به‌ویژه در آغاز یک سناریوی واقعی آتش‌سوزی که دما به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. این پدیده باعث شکست زود هنگام سازه‌های بتن مسلح و از دست دادن زندگی اضافی تحت شرایط آتش‌سوزی می‌شود. گزارش‌ها حاکی از آن است که ژئوپلیمر نسبت به OPC مقاومت بهتری در برابر آتش دارد، اما یک خلاصه سیستماتیک از تفاوت‌های تکامل آنها در طول گرم شدن وجود ندارد. استفاده از بتن ژئوپلیمر در عمل همچنین نیازمند درک عمیق‌تر و گسترده‌تر از تکامل آن تحت دماهای بالا است.

ژئوپلیمر یک ماده سیمانی پیچیده است که از یک سری مواد اولیه شروع می‌شود. از نظر نوع پیش‌ماده، خاکستر بادی، متاکائولن و سرباره رایج‌ترین پیش‌ماده‌ها در سنتز ژئوپلیمر هستند. محتوای کلسیم موجود در اجزای واکنش‌دهنده معمولاً پایین است تا اجازه دهد یک ساختار شبه زئولیتی تشکیل شود تا زنجیره‌های مشخص از هیدرات‌های سیلیکات کلسیم [۱۵]. مطالعات موجود نشان داده‌اند که عملکرد ژئوپلیمر بتن در دماهای بالا با نسبت‌های مختلف مخلوط متفاوت است. تمام فرمولاسیون‌های ژئوپلیمر عملکرد مناسب در دماهای محیط و دماهای بالای معرض را ندارند. عوامل طراحی مخلوط باید کنترل شوند تا بهترین فرمولاسیون ژئوپلیمر را برای بهترین عملکرد در معرض دماهای بالا بدست آوریم. بنابراین، خلاصه‌ای از عوامل تأثیرگذار در عملکرد دماهای بالا بتن ژئوپلیمر به پیشرفت نسبت مخلوط بتن مرتبط با بهترین عملکرد در دماهای بالا کمک می‌کند.

بر اساس نتایج تحقیقات فعلی، این مقاله یک مرور جامع از وضعیت فعلی مرتبط با تکامل ژئوپلیمر تحت دماهای بالا و تأثیر عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های دماهای بالا بتن ژئوپلیمر ارائه می‌دهد، همان‌طور که در نمودار این مرور در شکل ۱ نشان داده شده است. ابتدا، تکامل فیزیکی‌وشیمیایی ژئوپلیمر در حین گرم شدن از نظر آب‌زدایی و دی‌هیدروکسیلاسیون، تغییر فاز، تغییر ساختار منافذ و انقباض حرارتی به‌طور سیستماتیک بحث شده و با رفتار OPC مقایسه شده است. سپس، مطالعات موجود در مورد تغییر مقاومت مکانیکی پست ژئوپلیمر، ملات و بتن، به‌علاوه مکانیسم پست از دست دادن/افزایش مقاومت آنها تحت دماهای بالا جمع‌بندی شده است. پس از آن، عوامل درونی تأثیرگذار بر عملکرد دماهای بالا بتن ژئوپلیمر به‌طور جامع تحلیل شده است، از جمله انتخاب پیش‌ماده‌ها، نوع کاتیون قلیایی، نسبت Si/Al در کل سیستم ژئوپلیمر، مصالح سنگی و الیاف. در نهایت، تحقیقات موجود در مورد کاربردهای احتمالی ویژگی‌های دماهای بالای بتن ژئوپلیمر به‌طور مختصر معرفی شده است. این مقاله می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای تحقیقات و کاربرد عملی مقاومت در برابر دماهای بالای ژئوپلیمر عمل کند.



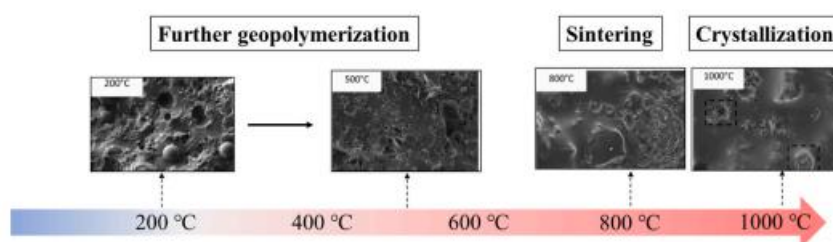
شکل ۱- طرح کلی این مقاله

۲- تکامل فیزیکی‌وشیمیایی ژئوپلیمر در حین گرم شدن

ژئوپلیمر به‌عنوان یک ماده سیمانی در حین گرم شدن، دستخوش تغییرات فیزیکی‌وشیمیایی متعددی می‌شود. وقتی دما بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رود، آب داخلی موجود در ژئوپلیمر شروع به تبخیر می‌کند که منجر به تغییر فاز، ایجاد فشار بخار و افزایش تخلخل همراه با انقباض حرارتی می‌شود. این فرآیندها باعث شروع، گسترش و اتصال تعداد زیادی میکرو-حفره و میکرو-ترک در داخل سیمان سخت شده می‌شود. بنابراین، میکروساختار آن به‌طور تدریجی تخریب می‌شود و با کاهش خواص مکانیکی ماکروسکوپی همراه است، و در نهایت سیمان از کار می‌افتد.

محققان از روش‌ها و تحلیل‌های مختلف برای مطالعه تکامل‌های فیزیکی‌وشیمیایی ژئوپلیمر در حین گرم شدن استفاده کرده‌اند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) می‌تواند تکامل میکروساختاری ژل ژئوپلیمر را به‌طور بصری در حین گرم شدن نشان دهد. ریچارد و همکاران [۱۶] تغییرات میکروساختاری ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی را در دماهای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از SEM بررسی کردند که در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده شد که ذرات خاکستر بادی واکنش‌خورده به‌طور تدریجی ناپدید می‌شوند و میکروساختار ژل به‌طور صاف می‌شود که این فرآیند در دماهای بالا تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دلیل دمای بالاتر که باعث تشویق بیشتر فرآیند ژئوپلیمریزاسیون از مواد آغازین غیر واکنش‌پذیر می‌شود، اتفاق می‌افتد. یک یافته جالب این بود که میکروساختار ژئوپلیمر در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد از میکروساختار آن در دمای محیط متراکم‌تر شد، که این پدیده به‌عنوان سینترینگ شناخته می‌شود که ناشی

از جریان چسبنده آلومینوسیلیکات‌ها از هر دو فاز ژل و اجزای آمورف ذرات خاکستر بادی غیر واکنش‌پذیر است [۱۷]. سینترینگ می‌تواند پیوند بین ذرات را بهبود بخشد و ترک‌ها در ماتریس‌های ژل را جزئی یا کاملاً پر کند و در نتیجه میکروساختاری همگن‌تر و بهتر متصل ایجاد کند. این فرآیند همچنین می‌تواند ذوب موضعی را در هنگام افزایش دما بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تحریک کند. مواد کریستالی که به‌عنوان ذرات میخ‌مانند و زاویه‌دار شناسایی شدند، تقریباً به‌طور انحصاری در داخل ذرات خاکستر بادی غیر واکنش‌پذیر یا در مناطقی که ذرات خاکستر بادی پیش از جریان چسبنده حضور داشتند، مشاهده شدند که این نشان‌دهنده فرآیند بلورین شدن است. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل حرارتی تفاضلی (DTA) نیز وجود یک فاز اندوترمیک در دمای ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را شناسایی کرد [۱۸، ۱۹] که به‌عنوان نتیجه فرآیند سینترینگ چسبنده فازهای ثانویه سیلیکاتی با سیلیس بالا که باعث تراکم شدید به پست ژئوپلیمر شد، در نظر گرفته شده است.

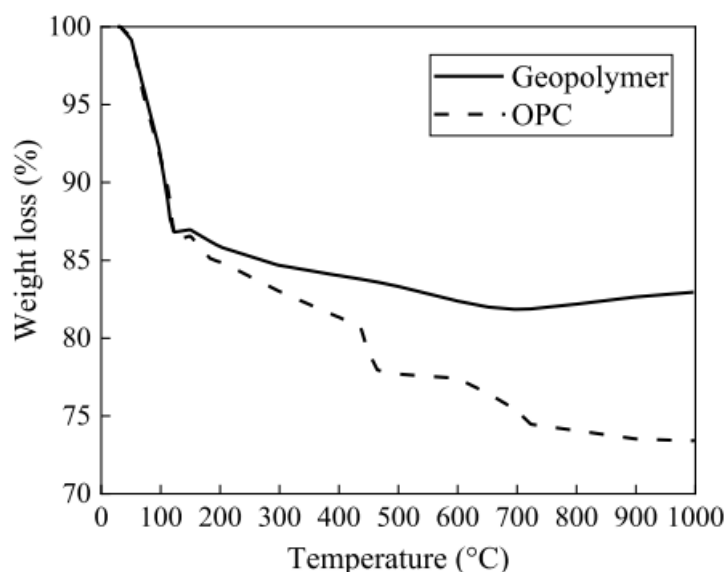


شکل ۲- تحولات میکروسکوپی ژئوپلیمر در طول حرارت‌دهی. [16]

تکامل میکروساختاری نشان داد که ژئوپلیمر رفتار متفاوتی نسبت به سیمان پرتلند معمولی (OPC) در هنگام گرم شدن نشان می‌دهد. سینترینگ و بلورین شدن فرآیندهای فیزیکوشیمیایی منحصر به فردی هستند که در ژئوپلیمر در حین گرم شدن به‌دلیل فرآیند واکنش هیدراتاسیون و محصولات آن اتفاق می‌افتند. در این بخش، تفاوت بین ژئوپلیمر و سیمان پرتلند در فرآیندهای فیزیکوشیمیایی در حین گرم شدن به‌طور جامع مورد بحث و خلاصه قرار گرفته است، از جمله در زمینه آب‌زدایی و دی‌هیدروکسیلاسیون، تغییر فاز، تغییر ساختار منافذ و انقباض حرارتی.

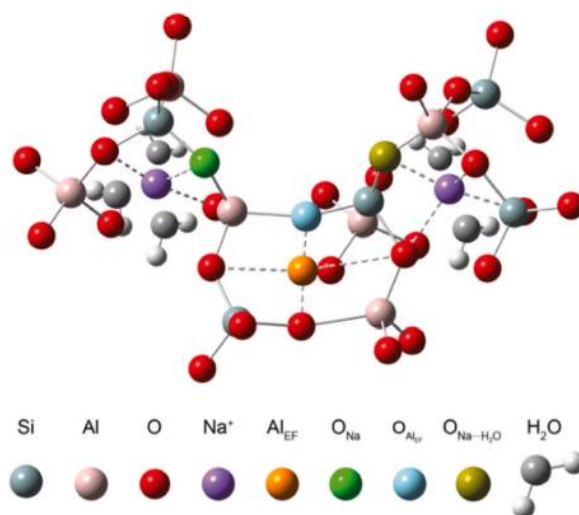
۲-۱ آب‌زدایی و دی‌هیدروکسیلاسیون

سه نوع آب در ژئوپلیمر وجود دارد که شامل آب فیزیکی-باند شده یا آب آزاد، آب شیمیایی-باند شده (که به آن «آب ژئولیتی» گفته می‌شود) و گروه‌های هیدروکسیل OH است که در سطح و لبه‌های هر میسل ژئوپلیمر حضور دارند. معمولاً، آب فیزیکی-باند شده و آب شیمیایی-باند شده عمدتاً در بازه دمایی ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تبخیر می‌شوند و دی‌هیدروکسیلاسیون گروه‌های OH زمانی اتفاق می‌افتد که دما بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد برود. یک فاز اندوترمیک بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد وجود دارد که تبخیر آب فیزیکی-باند شده و آب شیمیایی-باند شده را نشان می‌دهد [۱۹]. شکل ۳ مقایسه‌ای از کاهش جرم ژئوپلیمر و سیمان پرتلند معمولی تحت دماهای بالا از تحقیق کاشانی و همکاران [۲۰] را نشان می‌دهد. کاهش جرم ژئوپلیمر بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از سیمان پرتلند معمولی است، طبق منابع موجود [۲۰-۲۳]. دلیل اصلی این امر به تفاوت فازهای شیمیایی ژئوپلیمر و سیمان پرتلند معمولی برمی‌گردد. به جز آب‌زدایی از آب آزاد، کاهش جرم ژئوپلیمر بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد عمدتاً ناشی از آب‌زدایی N-A-S-H یا N-(C)-A-S-H و دی‌هیدروکسیلاسیون گروه‌های OH است؛ در حالی که کاهش جرم سیمان پرتلند معمولی با آب‌زدایی C-S-H (تقریباً ۷۰ درصد وزنی) بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و جداسازی پورتلاندیت $Ca(OH)_2$ (تقریباً ۲۰ درصد وزنی) در حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد دنبال می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که ژئوپلیمر پس از قرار گرفتن در معرض دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش جرم کمتری نسبت به سیمان پرتلند معمولی با همان مقاومت و نسبت آب به سیمان تجربه کرده است.



شکل ۳- کاهش وزن (%) ژئوپلیمر و OPC با افزایش دما. [20]

فاز اصلی ژل ژئوپلیمر، N-A-S-H، یک شبکه سه‌بعدی از تتراهدرال‌های آلومینات و سیلیکات است که در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۴]. آب بخشی از آن تشکیل نمی‌دهد و بنابراین آب شیمیایی کمتری در ژل ژئوپلیمر وجود دارد [۲۵]. در مقایسه با آن، آب بخشی از C-S-H در سیمان پرتلند معمولی است. علاوه بر این، قابل توجه است که هیچ پیک کاهش جرمی در ژئوپلیمر در حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد وجود ندارد، که نشان می‌دهد ژئوپلیمر پورتلاندیت ندارد [۲۶، ۲۰]. این همچنین به این معنی است که ژئوپلیمر در دوره سرد شدن دوباره هیدراته نمی‌شود، که یک پدیده رایج برای سیمان پرتلند است که اکسید کلسیم ناشی از آب‌زدایی هیدروکسید کلسیم در سیمان پرتلند معمولی در دمای بالا با آب واکنش داده و دوباره هیدروکسید کلسیم تشکیل می‌دهد، که باعث انبساط حجم ماتریس‌ها و آسیب‌های دوم در سیمان پرتلند معمولی در معرض آتش می‌شود. [27]



شکل ۴- نمودار ساختار سه‌بعدی ژل. N-A-S-H [24]

۲-۲ تغییر فاز

در دمای محیط، فاز ژل ژئوپلیمر عمدتاً آمورف است و اجزای بلوری آن از پیش‌سازها تشکیل می‌شود. جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات موجود درباره تغییر فاز ژئوپلیمرها را ارائه می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که ترکیب فازهای ژل ژئوپلیمر در دماهای بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد همچنان آمورف باقی می‌ماند. فاز آمورف ژئوپلیمر در اثر حرارت به فلدسپات‌های سدیم مانند نفهالین، آکرمینیت، گهلنیت، آنافوریت و غیره تبدیل می‌شود، و این فازها می‌توانند مقاومت در برابر دماهای بالا را در ژئوپلیمر به دلیل نقاط ذوب بالای خود افزایش دهند [۲۸]. علاوه بر این، زئولیت‌ها، فاز بلوری یا محصولات نیمه‌بلوری که در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون تشکیل می‌شوند، نیز در حین حرارت‌دهی به آلومینوسیلیکات‌های بدون آب (فلدسپات‌ها و فلدسپات‌ها) بازبلور می‌شوند و ماتریسی پایدار و مقاوم به حرارت می‌سازند [۲۹]. تنها زئولیت‌های خاصی تا ۷۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ساختار خود را حفظ می‌کنند و این بستگی به دمای عمل‌آوری، نسبت Si/Al، کلیاییت اولیه و نوع کاتیون دارد [۲۹]. اگر تشکیل ساختار ژئوپلیمر به‌طور مناسب هدایت شود، محصولات مقاوم به حرارت شبیه زئولیت مانند هیدروکسی سدالیت، آنالکیم، چابازیت و ساختارهای خانواده فایوجازیت در میکروساختار غالب خواهند بود و می‌توان سیمان مقاوم در برابر آتش و حرارت تولید کرد که کاربرد صنعتی وسیعی دارد. در مقایسه، فاز اصلی سیمان پرتلند معمولی، C-S-H، هیدروکسید کلسیم و کلسیت CaCO_3 در برابر آب‌زدایی آسیب‌پذیر است و مستعد تخریب ساختاری ناشی از حرارت است. ژل C-S-H به‌طور کامل ناپدید می‌شود و عمدتاً با فاز نوسیلیسیلیکات جدید در ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد جایگزین می‌شود [۲۷]، و CaCO_3 در ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به CaO تجزیه می‌شود.

جدول ۱- تبدیل فازی که در ژئوپلیمر در هنگام گرم شدن رخ می‌دهد

| References | Precursors | Main findings |
|------------|------------|--|
| [16] | FA | The phase composition remained stable up to 800 °C. Above this temperature, the amorphous content dropped (down to 66 wt% at 1000 °C) and sodium feldspars formed. |
| [30] | FA | A significant amount of crystalline phases took place after firing at 800 °C. |
| [31] | MK | Nepheline and carnegieite form on heating to 900 °C in the geopolymer phase and after exposure to 1000 °C, the mortar samples were transformed into polycrystalline nepheline/quartz ceramics. |
| [32] | MK | Geopolymer retained X-ray-amorphous tetrahedral Al and Si network up to the onset of melting at 1300 °C. |
| [33] | MK | Potassium sialate geopolymers show little sign of melting up to 1400 °C, its amorphous structure being replaced by the crystalline feldspars leucite and kalsilite at 1000 °C. |
| [34] | FA/slag | The binder gel started to crystallize at 600 °C, increasing the porosity and reducing the strength, and this continued to 800 °C. |
| [35] | FA/slag | At temperatures above 900 °C, the activated matrix is densified, and the crystalline phases, such as sodalite, nepheline, albite and akermanite, are identified. |
| [36] | FA/slag | The XRD patterns of paste exposed to 800 °C showed peaks corresponding to the presence of the main phases such as akermanite ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}[\text{AlSiO}_7]$), anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), and minor quantity of nepheline ($\text{Na}_4\text{KAlSi}_3\text{O}_{10}$). |
| [37] | FA, MK | Free alkalis present in the geopolymer matrix lead to the formation of nepheline and albite at temperatures above 900 °C. |

۳-۲ تغییر ساختار منافذ

تخلخل با تبخیر آب شیمیایی-باند شده از ماتریس‌های سیمانی تحت دماهای بالا افزایش می‌یابد. در این زمان، فشار بخار ناشی از بخاری که از آب در شبکه منافذ تشکیل می‌شود، با افزایش دما بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور مداوم افزایش می‌یابد. فشار بخار یکی از دلایل اصلی تخریب میکروساختار سیمان تحت دماهای بالا است. این فشار کمتر احتمال دارد که فرار کند اگر توسط ماتریس‌های متراکم با نفوذپذیری کم احاطه شده باشد، که باعث فروریختگی منافذ و ترک خوردن می‌شود زمانی که فشار کششی از حد مقاومت ماتریس‌های

سیمانی عبور کند. در نتیجه، وقتی در معرض دماهای بالا قرار می‌گیرد، میانگین قطر منافذ افزایش می‌یابد و تعداد منافذ به دلیل اتصال منافذ کوچک‌تر و تبدیل منافذ بسته به حفره‌های بزرگ متصل کاهش می‌یابد.

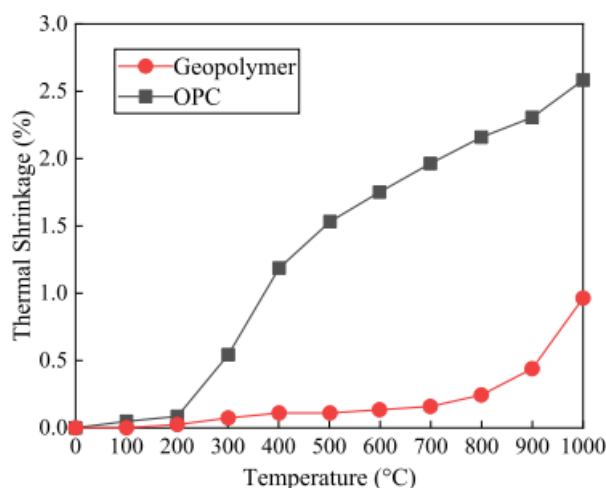
جدول ۲ تغییر ساختار منافذ ژئوپلیمر و سیمان پرتلند معمولی را پس از قرار گرفتن در معرض ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد از نتایج آزمایش‌های کاشانی و همکاران [۲۰] مقایسه می‌کند. این نشان می‌دهد که چه در دمای محیط و چه پس از قرار گرفتن در معرض ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، تخلخل و تعداد منافذ ژئوپلیمر بالاتر از سیمان پرتلند معمولی با همان نسبت آب به سیمان است. ژئوپلیمر تغییرات کمی در میانگین قطر منافذ تجربه کرد در حالی که افزایش قابل توجهی در قطر منافذ سیمان پرتلند معمولی مشاهده شد. میانگین قطر منافذ در سیمان پرتلند معمولی از ۴.۷ میکرومتر به ۱۱ میکرومتر پس از قرار گرفتن در معرض افزایش یافت و تعداد منافذ بیش از ۹۰ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده آسیب بیشتر میکروساختار سیمان پرتلند معمولی تحت دماهای بالا است. همچنین گزارش شده است که بتن ژئوپلیمر دارای ضریب جذب بالاتری است، یعنی منافذ بیشتر متصل نسبت به بتن سیمان پرتلند معمولی [۳۸،۳۹]. اتصال منافذ در ماتریس سیمان نقش مهم‌تری در کاهش آسیب حرارتی نسبت به تخلخل آن دارد، زیرا بخار آب می‌تواند از شبکه منافذ متصل سریع‌تر فرار کند و منجر به فشار داخلی کمتر در ماتریس سیمانی شود. این همچنین دلیل این است که بتن ژئوپلیمر در آتش نسبت به بتن سیمان پرتلند معمولی مقاومت بیشتری در برابر ترک خوردگی دارد. علاوه بر این، وقوع سینترینگ و بلورین شدن زمانی که دمای قرارگیری بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است نیز بر ساختار منافذ ژئوپلیمر تأثیر می‌گذارد. تراکم ماتریس‌ها به دلیل فرآیند سینترینگ می‌تواند منجر به کاهش تخلخل در بازه دمایی ۷۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد شود [۳۵]، در حالی که بلورین شدن می‌تواند تخلخل را افزایش دهد زیرا محصولات بلورین شده مانند آنافوریت) از C-(N)-A-S-H) و نفهالین) از N-A-S-H) که پس از قرار گرفتن در معرض ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند، ساختاری به شدت متخلخل دارند. [30,34,36]

جدول ۲- پارامترهای منافذ ژئوپلیمر و OPC قبل و بعد از قرارگیری در معرض دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد

| | OPC | OPC-HT | Geopolymer | Geopolymer-HT |
|---|-----|--------|------------|---------------|
| Porosity (%) | 0.6 | 0.6 | 3.7 | 10.5 |
| Mean diameter (μm) | 4.7 | 11.0 | 5.6 | 6.3 |
| Total number of pores ($\times 1000$) | 134 | 17 | 5373 | 5623 |
| Volume fraction of pores under $50 \mu\text{m}$ (%) | 4 | 6 | 61 | 21 |

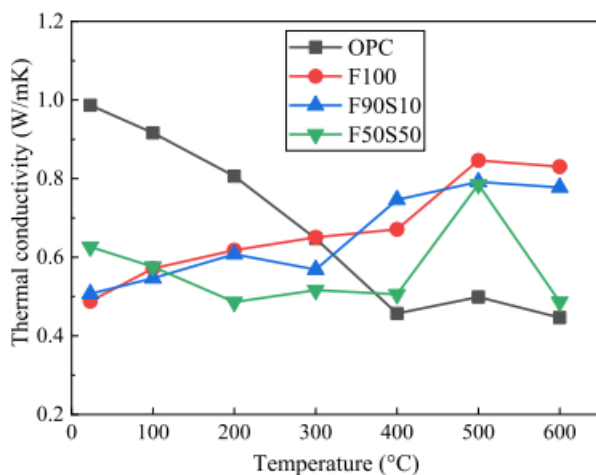
۲-۴ انقباض حرارتی

تبخیر آب و فشار بخار معمولاً باعث انقباض حرارتی در سیمان در طول حرارت‌دهی می‌شود. در ژئوپلیمر، دو ناحیه متفاوت از انقباض حرارتی در هنگام حرارت‌دهی وجود دارد [۴۰،۴۱]. یکی مربوط به تنش‌های مویی ناشی از آب‌زدایی در محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است که با کاهش قابل توجه جرم در این دوره همراه است، و دیگری انقباض حرارتی سریع مربوط به تراکم ساختاری ناشی از سینترینگ ویسکوز در دماهای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد [۴۲-۴۴]. گزارش شده است که انقباض حرارتی ژئوپلیمر کمتر از سیمان پرتلند معمولی (OPC) است [۴۵،۴۶]. شکل ۵ مقایسه‌ای از انقباض حرارتی ژئوپلیمر و سیمان پرتلند معمولی از دوان و همکاران [۴۵] نشان می‌دهد. آن‌ها دریافتند که انقباض حرارتی ژئوپلیمر بیش از سه برابر کمتر از انقباض سیمان پرتلند معمولی است. انقباض ناشی از آب‌زدایی عمدتاً به آب‌زدایی ۴۰ درصد باقی‌مانده از آب شیمیایی-باند شده نسبت داده می‌شود [۴۷]. انقباض در ژئوپلیمر در بازه دمایی ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مشهود نیست به دلیل محتوای پایین آب شیمیایی-باند شده در ژئوپلیمر، همان‌طور که در بخش ۲.۱ ذکر شد. فرآیند سینترینگ و تراکم در دماهای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به پروفایل انقباض ژئوپلیمر غالب می‌شود، در حالی که انقباض برای سیمان پرتلند معمولی به‌ویژه مشهود است جایی که فاز C-S-H شروع به آب‌زدایی در دماهای بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌کند. تبدیل $\text{Ca}(\text{OH})_2$ به CaO در بین ۴۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد همچنین می‌تواند منجر به انقباض ۳۳ درصدی در حجم شود [۴۸]. انقباض ژئوپلیمر تحت تأثیر ترکیب آن است، مانند نوع کاتیون قلبیایی و نسبت Si/Al نامی، و این اثرات ترکیب بر تغییر شکل حرارتی ژئوپلیمر در بخش ۴ به‌طور مفصل بحث خواهد شد.



شکل ۵- انقباض حرارتی ژئوپلیمر و OPC با افزایش دما. [45]

در طول حرارت‌دهی، حرارت از سطح نمونه‌ها به قسمت‌های داخلی آن‌ها منتقل می‌شود و بنابراین دمای بخش‌های خارجی بالاتر از بخش داخلی خواهد بود. تفاوت‌های تنش حرارتی ناشی از این گرادیان دما نیز به ناسازگاری تغییر شکل حرارتی در نمونه‌ها کمک می‌کند و منجر به وقوع ترک‌ها می‌شود. مطالعات موجود گزارش کرده‌اند که هدایت حرارتی ژئوپلیمر کمتر از سیمان پرتلند معمولی است [۲۲،۴۹]. پان و همکاران [۲۲] ویژگی‌های حرارتی ژئوپلیمر تهیه‌شده با نسبت‌های مختلف خاکستر بادی/سرباره را در دماهای بین ۲۳ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری کردند. نتایج اندازه‌گیری آن‌ها از هدایت حرارتی در شکل ۶ نشان داده شده است. ویژگی‌های منافذ در ماتریس‌ها تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت مؤثر دارند [۵۰]. در نتیجه، تخلخل بالاتر ژئوپلیمر دلیل اصلی هدایت حرارتی پایین‌تر آن در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی است [۲۲]. ویژگی‌های پایین هدایت حرارتی ژئوپلیمر می‌تواند به جلوگیری از انتشار حرارت کمک کند و منجر به ناسازگاری حرارتی کمتری شود.

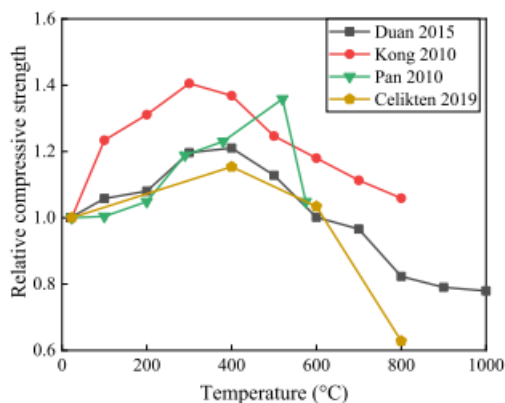


شکل ۶- هدایت حرارتی ژئوپلیمر و OPC با افزایش دما (F100): ژئوپلیمر ساخته‌شده با ۱۰۰٪ خاکستر بادی، F90S10: ژئوپلیمر ساخته‌شده با ۹۰٪ وزنی خاکستر بادی و ۱۰٪ وزنی سرباره، F50S50: ژئوپلیمر ساخته‌شده با ۵۰٪ وزنی خاکستر بادی و ۵۰٪ وزنی سرباره. [22]

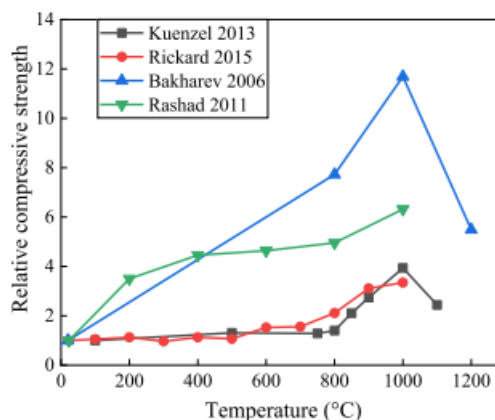
۳- تغییرات مقاومت مکانیکی بتن ژئوپلیمر در حین حرارت‌دهی

تغییرات مقاومت مکانیکی خمیر ژئوپلیمر، ملات و بتن توسط بسیاری از محققان با توجه به آزمایش‌های مقاومت باقی‌مانده پس از قرار گرفتن در معرض دماهای مختلف، شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته، مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌طور که در بخش قبلی بحث شد، از دست دادن مقاومت ژئوپلیمر تحت دماهای بالا غیرقابل جلوگیری است به دلیل آسیب‌های میکروسکوپی که توسط دماهای بالا به ساختار آن وارد می‌شود. طبق خلاصه نتایج آزمایش‌های موجود از مقاومت فشاری باقی‌مانده ژئوپلیمر که در شکل ۷ نمایش داده شده است، دو افزایش عمده در مقاومت در حین حرارت‌دهی در

ژئوپلیمر مشاهده می‌شود. اولین افزایش قابل توجه مقاومت از دمای محیط تا حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد که به دلیل ادامه ژئوپلیمریزاسیون مواد اولیه‌ی غیر واکنش داده است [۴۵,۵۱,۵۲] (همانطور که در شکل ۷ (a) نشان داده شده است). سیمان پرتلند نیز این فرآیند افزایش مقاومت را در حین حرارت‌دهی به دلیل واکنش بیشتر سیمان غیر واکنش داده اولیه تجربه کرد. از سوی دیگر، یک فرآیند دیگر افزایش مقاومت در برخی از ژئوپلیمرها به دلیل فرآیند تراکم ناشی از سینترینگ ویسکوز زمانی که دمای حرارت‌دهی بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بود، رخ می‌دهد [۱۶,۵۳,۵۴] (همانطور که در شکل ۷ (b) نشان داده شده است). در برخی موارد، این افزایش می‌تواند بیش از پنج برابر مقاومت قبل از قرارگیری در معرض حرارت باشد [۳۰,۵۴]. برخی از ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی حتی پس از قرارگیری در معرض ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز افزایش مقاومت را تجربه کردند. [16,28,54,55]



(a) Strength increase between 23-400 °C

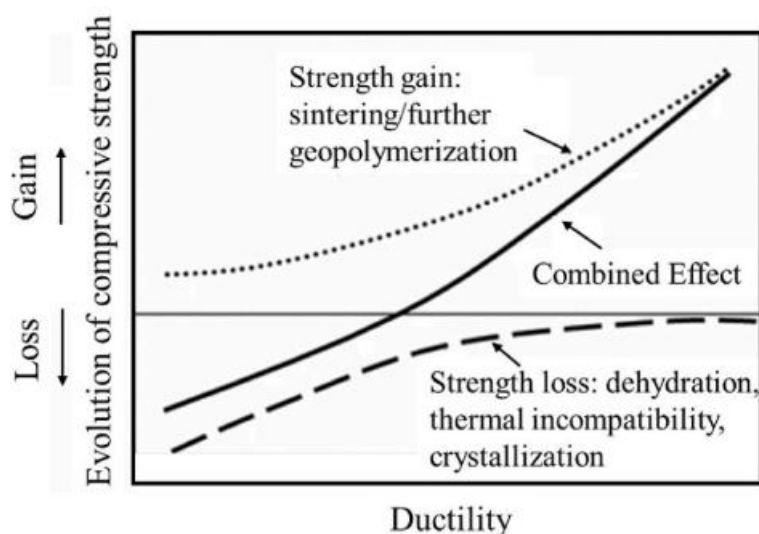


(b) Strength increase above 600 °C

شکل ۷- تکامل مقاومت فشاری ژئوپلیمر با دما از نتایج آزمایشات موجود [16]، 30، 31، 45، 51، 52، 54، 56]

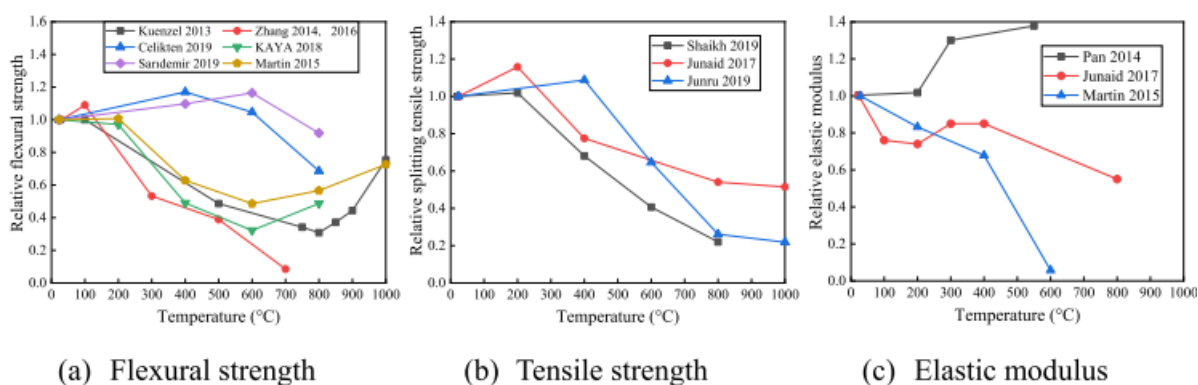
برخلاف خمیر سیمان که با افزایش دما کاهش قابل توجهی در انقباض تجربه می‌کند، از آنجا که مصالح سنگی معمولاً ۷۵-۸۰ درصد از حجم ملات و بتن را اشغال می‌کنند، انبساط حرارتی مصالح سنگی معمولاً بر انقباض ماتریس سیمانی در این ترکیبات غالب است [۵۱]. ناسازگاری حرارتی در ملات یا بتن به دلیل حرکات متضاد بین ماتریس و مصالح سنگی منجر به شروع و گسترش ترک‌ها و کاهش مقاومت تحت دماهای بالا می‌شود. نتایج آزمایش از پان و همکاران [۵۷] نشان می‌دهد که مقاومت باقی‌مانده خمیر ژئوپلیمر افزایش یافت، در حالی که بتن ژئوپلیمر پس از همان قرارگیری در معرض حرارت به دلیل ناسازگاری حرارتی ناشی از عدم تطابق در ضرایب انبساط حرارتی مصالح سنگی و ماتریس سیمانی، از دست دادن مقاومت را نشان داد. تحقیقات موجود نشان داد که خمیر ژئوپلیمر، ملات و بتن پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا، کاهش کمتری در مقاومت فشاری نسبت به همتای سیمان پرتلند معمولی (OPC) خود داشتند [۲۰,۳۵,۴۵,۵۱,۵۸]. والنسیا و همکاران [۳۵] دریافتند که بتن ژئوپلیمر پس از قرارگیری در معرض ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومتی معادل ۱۵ مگاپاسکال نشان داد، در حالی که بتن سیمان پرتلند معمولی مقاومت خود را پس از قرارگیری در معرض ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد از دست داد. حفظ مقاومت بیشتر در ترکیبات ژئوپلیمر در مقایسه با همتایان سیمان پرتلند معمولی در دماهای بالا به دلیل افزایش مقاومت منحصر به فرد ناشی از فرآیند سینترینگ و تراکم، و همچنین مقاومت بالای بتن ژئوپلیمر در برابر ترک است. [38,39,59]

برای جمع‌بندی، دو فرآیند موازی در بتن ژئوپلیمر با افزایش دما رخ می‌دهد. یکی از فرآیندها ادامه ژئوپلیمریزاسیون مواد اولیه غیر واکنش داده و فرآیند سینترینگ است که به افزایش مقاومت منجر می‌شود، و فرآیند دیگر آسیب‌هایی است که ناشی از آب‌زدایی، بلوریزاسیون و ناسازگاری حرارتی است. افزایش یا کاهش نهایی مقاومت بتن ژئوپلیمر پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا به ترکیب اثر این دو فرآیند موازی بستگی دارد، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است [۶۰,۶۱]. پان و همکاران [۶۰] پیشنهاد کردند که قابلیت انعطاف‌پذیری ملات ژئوپلیمر سطح دو فرآیند و توسعه مقاومت بعدی ژئوپلیمر ملات در حین حرارت‌دهی را تعیین می‌کند. نمونه‌های ژئوپلیمر با مقاومت اولیه پایین با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا همراه هستند، بنابراین آن‌ها ظرفیت بیشتری برای افزایش مقاومت بیشتر دارند و می‌توانند تغییرات حجمی و فازی را بهتر تحمل کنند [۶۲,۶۳]. در مقابل، نمونه‌های ژئوپلیمر با مقاومت بالا و چگالی بالاتر و نفوذپذیری ظاهراً کمتر بیشتر مستعد آسیب‌های ناشی از حرارت هستند. علاوه بر این، ژئوپلیمرهای با مقاومت اولیه پایین احتمالاً محتوای بیشتری از مواد اولیه غیر واکنش داده را حفظ می‌کنند که منجر به اندازه‌گیری بیشتر ژئوپلیمریزاسیون تحت دماهای بالا می‌شود. در نتیجه، ژئوپلیمر با مقاومت اولیه نسبتاً پایین پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا، کاهش کمتری در مقاومت نسبت به نمونه‌های با مقاومت اولیه بالا نشان می‌دهد. این مکانیزم برای سیمان پرتلند معمولی نیز مناسب است. [64]



شکل ۸- مکانیسم‌های پشت تکامل مقاومت بتن ژئوپلیمر در دماهای بالا [60].

نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن ژئوپلیمر جمع‌آوری شده و در شکل‌های ۹ (a)، (b) و (c) به ترتیب ارائه شده است. همانطور که در شکل ۹ (a) نشان داده شده است، مشابه به روند تغییرات مقاومت فشاری با افزایش دما، افزایش مقاومت خمشی ملات ژئوپلیمر در دماهای بالا تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که به دلیل فعال‌سازی تأخیری ذرات غیر واکنش‌داده خاکستر بادی (FA) بود [۶۵،۶۶]، همچنین بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل فرآیند سینترینگ [۳۱،۶۷]. همانطور که در شکل ۹ (b) نشان داده شده است، مقاومت کششی باقی‌مانده بتن ژئوپلیمر نیز تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد کمی افزایش یافت که ناشی از ادامه ژئوپلیمریزاسیون بود و با افزایش دما کاهش پیدا کرد [۶۸-۷۰]. برخی محققان دریافتند که نسبت نگهداری مقاومت خمشی ملات ژئوپلیمر در دماهای بالا بیشتر یا معادل مخلوط‌های سیمان پرتلند معمولی (OPC) است [۷۱،۷۲]. با این حال، ژانگ و همکاران [۱۹] گزارش دادند که ملات ژئوپلیمر تخریب بیشتری از نظر دما در مقاومت خمشی و کششی نسبت به ملات سیمان پرتلند معمولی نشان می‌دهد، اما تخریب کمتری در مقاومت فشاری دارد. مقاومت خمشی و کششی حساس‌تر به توسعه نقص‌های میکروسکوپی داخلی مانند گسترش ترک‌ها و تکامل منافذ در دماهای بالا هستند [۱۹]. همانطور که در بخش ۲.۳ بحث شد، ژئوپلیمرها ساختار منافذ متصل‌تری نسبت به سیمان پرتلند معمولی دارند، که می‌تواند منجر به حساسیت بیشتر به تخریب حرارتی در مقاومت خمشی یا کششی آن‌ها شود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود قبل از استفاده از ژئوپلیمر در اجزای خمشی برای مقاومت در برابر آتش بیشتر ملاحظه شود، اما همچنان نیاز به مطالعات بیشتری برای تأیید این یافته وجود دارد به دلیل نتایج تجربی محدود موجود. همانطور که در شکل ۹ (c) نشان داده شده است، مدول الاستیسیته ژئوپلیمر نیز در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است که به دلیل تشکیل ژل بیشتر ژئوپلیمر است [۷۳،۵۷]. همچنین گزارش شده است که مدول الاستیسیته ژئوپلیمر در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش کمتری پیدا کرده است. [57,71]



شکل ۹- تکامل سایر مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمر با دما از نتایج آزمایشات موجود: (الف) مقاومت خمشی [۳۱-۵۸،۶۵-۶۷،۷۱،۷۲]؛ (ب) مقاومت کششی شکاف [۶۸-۷۰]؛ (ج) مدول الاستیک [57,71].

پیشنهاد مدل‌های ریاضی یکپارچه برای تکامل مقاومت مکانیکی بتن ژئوپلیمر با دما برای کاربردهای مهندسی و تجاری، مشابه فرمول‌های تجربی برای بتن سیمان پرتلند در استانداردهای موجود [۷۴] دشوار است. از یک سو، آزمایش‌های آتش‌سوزی در مناطق مختلف جهان یکسان نیستند. پارامترهای آزمایشی مانند نرخ

حرارت‌دهی، اندازه نمونه‌ها، شرایط باقی‌مانده یا در محل و غیره تأثیر زیادی بر نتایج آزمایش مقاومت در دماهای بالا دارند؛ از سوی دیگر، مواد اولیه مختلف ژئوپلیمر شامل ترکیب شیمیایی پیش‌ماده‌ها، نوع کاتیون قلیایی و میزان فعال‌کننده نیز محصولات مختلف ژئوپلیمریزاسیون نهایی با عملکردهای متفاوت در دماهای بالا ایجاد می‌کنند. بنابراین، عملکرد دمای بالا ژئوپلیمر باید بر اساس نسبت‌های اختلاط و رژیم‌های آزمایش آتش اتخاذ شده تعیین شود. در بخش بعدی، تأثیر عوامل درونی مختلف بر عملکرد دمای بالا ژئوپلیمرها بررسی خواهد شد.

۴- عوامل مؤثر بر مقاومت دمایی بتن ژئوپلیمر

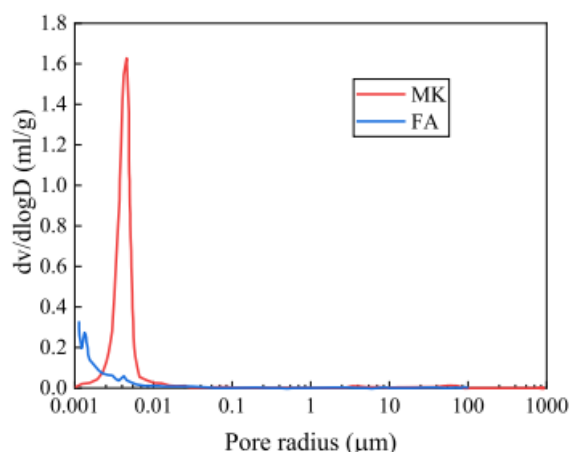
اگرچه ژئوپلیمر به دلیل ویژگی‌های دمایی بهتر از سیمان پرتلند معمولی (OPC) شناخته شده است، اما ذکر این نکته ضروری است که همه ژئوپلیمرها در معرض دماهای بالا عملکرد مناسبی ندارند. عملکرد ژئوپلیمر تحت دماهای بالا تحت تأثیر چندین عامل درونی، از جمله پیش‌ماده‌ها و فعال‌کننده‌ها، و aggregate (ماسه یا پرکننده) برای بتن ژئوپلیمر قرار دارد.

۴-۱ ماده پایه

۴-۱-۱ سیستم ماده پایه واحد

خاکستر بادی با کلسیم پایین (FA) و متاکائولین (MK) پرکاربردترین پیش‌ماده‌ها در سنتز ژئوپلیمر هستند. فعالیت پایین و سینتیک واکنش کند خاکستر بادی باعث می‌شود که ژئوپلیمریزاسیون بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی به طور ناقص انجام شود و به همین دلیل مقاومت مکانیکی ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولین نسبت به ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی در دمای محیط بیشتر است [۵۸]. با این حال، ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی مقاومت بسیار بیشتری نسبت به ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولین حفظ کرد. هم کنگ و همکاران [۷۵] و رووانیک و همکاران [۳۷] مشاهده کردند که مقاومت ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی افزایش یافت در حالی که مقاومت ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولین پس از گرمایش به دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. اگرچه ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولین از ثبات شیمیایی عالی برخوردار است [۳۱-۳۳]، گزارش شده است که پس از گرمایش دچار جمع شدگی حرارتی زیاد، آسیب میکروسکوپی به ساختار و بروز ترک‌های قابل مشاهده می‌شود [۲۳، ۵۸، ۶۳، ۷۶]، که این نیز دلیل اصلی از دست دادن شدید مقاومت آن است. این موضوع ممکن است استفاده از ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولین را برای مقاومت در برابر آتش ساختاری محدود کند.

عملکرد بهتر ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی به ویژگی‌های ذاتی خاکستر بادی مربوط می‌شود. خاکستر بادی از هم‌گرایی مواد غیر قابل احتراق در گازهای دودکش نیروگاه‌های زغال‌سوز تولید می‌شود که یک ماده پودری است که از دایره‌های شیشه‌ای کوچک تشکیل شده و عمدتاً از سیلیکون، آلومینیوم، آهن و کلسیم اکسیدها تشکیل می‌شود. ذرات خاکستر بادی شکل گوی‌مانند دارند و این پوسته‌ها جزئی در ماتریس ژئوپلیمر حل می‌شوند، ماتریسی با تعداد زیادی منافذ کوچک و پراکنده ایجاد می‌کنند. نتایج MIP که توسط کنگ و همکاران [۵۳] به دست آمده نشان داد که ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی نسبت به ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولین که عمدتاً از میکروپورها تشکیل شده است، درصد بالاتری از میکروپورها دارد، همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



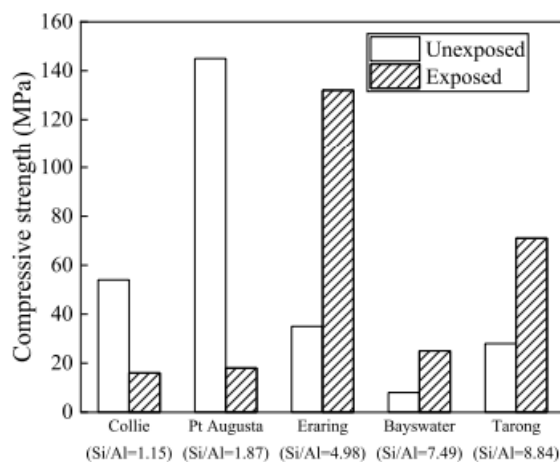
شکل ۱۰- توزیع اندازه حفره‌های ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی و مبتنی بر متاکائولین [53]

در دماهای بالا، از یک سو، ژئوپلیمریزاسیون و واکنش سینترینگ ذرات خاکستر بادی غیر واکنش داده باعث افزایش مقاومت ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی می‌شود؛ از سوی دیگر، حل شدن بیشتر این ذرات گوی‌مانند خاکستر بادی به تسهیل تبدیل منافذ کوچک و پراکنده به منافذ بزرگ در ماتریس ژئوپلیمر کمک می‌کند. این سیستم منافذ ویژه می‌تواند در هنگام گرمایش، مسیرهای خروج بخار را فراهم کند و به انتشار فشار بخار کمک کند، بنابراین آسیب قابل توجهی به ساختار

میکروسکوپی ماتریس ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی وارد نمی‌شود [۲۳،۵۳،۵۸]. علاوه بر این، اشکال گوی‌مانند و ریز بودن ذرات خاکستر بادی به طور قابل توجهی کارایی را افزایش می‌دهد، بنابراین ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی به آب کمتری نیاز دارد، که به کاهش از دست دادن جرم در دماهای بالا نسبت به همتای متاکائولین آن کمک می‌کند و به این ترتیب آسیب ناشی از دست دادن آب در دماهای بالا را به حداقل می‌رساند. [53,58]

ویژگی‌های خاکستر بادی بین نیروگاه‌های مختلف بسیار متغیر است و به شدت به منبع زغال سنگ و شرایط احتراق بستگی دارد. به طور مقایسه‌ای، متاکائولین یک جزء آلومینوسیلیکات خالص تر با خلوص بالاتر و محتوای بالاتری از فازهای دمای بالا است، در حالی که خاکستر بادی ترکیب متغیری مانند اکسیدهای آهن دارد [۲۹]. برخی از ویژگی‌های مهم خاکستر بادی که بر ویژگی‌های مربوطه ژئوپلیمرها تأثیر می‌گذارد شامل اندازه ذرات، محتوای شیشه، نسبت Si:Al در شیشه، محتوای آهن و محتوای کلسیم است. اندازه ذرات ریزتر خاکستر بادی و محتوای کلسیم برای فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و توسعه مقاومت ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی ترجیح داده می‌شود [۵۵،۷۷]. محتوای بالاتر آمورف در ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی می‌تواند عملکرد مقاومت در برابر آتش آن را تقویت کند. [16]

ریچارد و همکاران [۱۶،۲۸،۵۵] خواص حرارتی ژئوپلیمرهای سنتز شده از خاکستر بادی تولید شده در نیروگاه‌های مختلف استرالیا را مطالعه کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که تنها برخی از ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی عملکرد حرارتی خوبی داشتند و تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت آن‌ها افزایش یافت، و این با نسبت Si/Al در جزء آمورف آلومینوسیلیکات‌ها در خاکستر بادی و محتوای آهن آن‌ها مرتبط بود [۲۸،۵۵،۷۸]. شکل ۱۱ تغییرات مقاومت ژئوپلیمرهای سنتز شده از منابع مختلف خاکستر بادی پس از قرار گرفتن در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد [۲۸]. ژئوپلیمرهای سنتز شده از خاکستر بادی با نسبت Si/Al بالای ۵ در شیشه طی حرارت‌دهی مقاومت را افزایش داده و ثبات ابعادی بیشتری از خود نشان دادند. با این حال، ژئوپلیمرهای سنتز شده از خاکستر بادی با نسبت Si/Al کمتر از ۲ در شیشه در معرض دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد دچار کاهش مقاومت و ثبات ابعادی شدند. علاوه بر این، محتوای آهن در خاکستر بادی تأثیر منفی بر عملکرد حرارتی ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی دارد [۵۵،۷۸]. مشاهده شد که ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی پس از آتش‌سوزی تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرمز می‌شود که نشان‌دهنده اکسید شدن آهن در خاکستر بادی است [۳۵،۷۸،۷۹]. اکسید آهن آمورف در ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی پس از گرمایش در هوا تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به هماتیت تبدیل شد. انتقال فاز و واکنش اکسیداسیون آهن با محتوای بالا در خاکستر بادی باعث انبساط حرارتی و در نتیجه ترک و از دست دادن مقاومت در ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی در هنگام حرارت‌دهی می‌شود [۵۵،۷۸]. بنابراین، محدود کردن میزان آهن در خاکستر بادی برای کاربرد مقاومتی در برابر آتش ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی ضروری است.

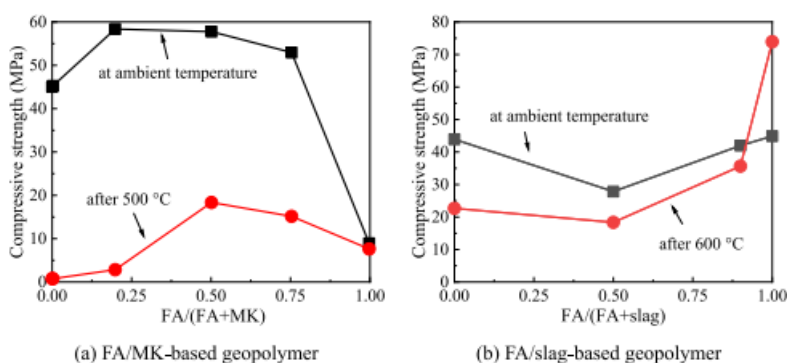


شکل ۱۱- تغییرات مقاومت ژئوپلیمرهای سنتز شده از منابع مختلف خاکستر بادی پس از قرارگیری در دمای ۱۰۰۰°C [28]

۴-۱-۲ سیستم ماده پایه ترکیبی

حل شدن و واکنش خاکستر بادی در محیط قلیایی معمولاً به دمای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارد تا به مقاومت مطلوبی برسد که این موضوع استفاده از ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی را محدود می‌کند مگر در موارد پیش‌ساخته. از آنجا که سرپاره کوره بلند و متاکائولین به عنوان افزودنی‌های پوزولانی مؤثر شناخته می‌شوند که می‌توانند فعالیت در سنین اولیه را افزایش دهند، جایگزینی جزئی خاکستر بادی با متاکائولین یا سرپاره می‌تواند باعث تقویت مقاومت مکانیکی سیستم پیش‌ساخته ترکیبی تحت عمل‌آوری دمای محیطی شود [۷۲،۸۰]، که این امر اجازه می‌دهد سیستم پیش‌ساخته ترکیبی برای ساخت و سازه‌های در محل مناسب باشد. از طرف دیگر، اثر مفید خاکستر بادی بر مقاومت دمایی ژئوپلیمر هنوز می‌تواند در سیستم پیش‌ساخته ترکیبی استفاده شود و درجه این اثر بستگی به نسبت خاکستر بادی در سیستم پیش‌ساخته ترکیبی دارد. شکل ۱۲ (a) و (b) اثر محتوای خاکستر بادی بر مقاومت فشاری پس از حرارت‌دادن ژئوپلیمر مبتنی بر FA/MK و ژئوپلیمر مبتنی بر FA سرپاره را نشان می‌دهند.

همانطور که در شکل ۱۲ (a) نشان داده شده است، چسباننده‌های ژئوپلیمر ساخته شده با ۵۰ درصد متاکائولین و ۵۰ درصد خاکستر بادی مقاومت فشاری بهینه‌ای هم در دمای محیط و هم پس از قرار گرفتن در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه دادند [۷۲]، که قابل مقایسه با مخلوط‌های سیمان پرتلند معمولی است و می‌تواند جایگزین عملی برای سیمان پرتلند در کاربردهای ساخت و ساز عملی باشد. همانطور که در شکل ۱۲ (b) نشان داده شده است، نسبت نگهداری مقاومت فشاری ژئوپلیمر با کمترین میزان سرباره پس از قرار گرفتن در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاترین مقدار را دارد [۸۱]. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که عملکرد حرارتی مخلوط‌های ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی/سرباره با افزایش محتوای خاکستر بادی بهبود می‌یابد [۳۶، ۶۵، ۸۰، ۸۲، ۸۳]. رفتارهای متفاوت چسباننده‌های ژئوپلیمر با نسبت‌های مختلف خاکستر بادی/سرباره عمدتاً به فاز اولیه مختلف آنها و تغییرات فازهای آنها در هنگام حرارت‌دهی مربوط می‌شود [۳۶]. سرباره فعال شده قلیایی یک ژل C-A-S-H نوع آلومینیومی است با ساختار نامنظم شبیه به [84] C-S-H(I) تبدیل هیدرات‌های آلومینیوم کلسیم) به طور عمده (C4AH13) در دمای ۲۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش شدید مقاومت ژئوپلیمر ۱۰۰ درصد مبتنی بر سرباره شد. هم‌زیستی ژل‌های C-S-H و N-A-S-H در ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی/سرباره مشاهده شد. ژانگ و همکاران [۸۵] دریافتند که در ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی/سرباره، ژل‌های N-(C)-A-S-H در اطراف ذرات خاکستر بادی باقی‌مانده و ژل‌های C-(N)-A-S-H در اطراف ذرات سرباره حضور دارند. محتوای نسبی N-(C)-A-S-H و C-(N)-A-S-H توسط نسبت خاکستر بادی و سرباره در ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی/سرباره تعیین می‌شود. محتوای غالب C-(A)-S-H در ژئوپلیمر با محتوای سرباره بالا (بیشتر از ۵۰ درصد) حساس به خشک شدن و بلور شدن است و منجر به کاهش مقاومت آن می‌شود. فاز اصلی چسباننده در ژئوپلیمر با محتوای بالای خاکستر بادی N-(C)-A-S-H است و پایداری حرارتی آن با تعویض Na/Ca کاهش می‌یابد. بنابراین، پان و همکاران [۸۶] استفاده از ژئوپلیمر با ۹۰ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد سرباره را پیشنهاد کردند که می‌تواند مقاومت قابل قبولی تحت عمل‌آوری دمای محیطی به دست آورد و عملکرد حرارتی خوبی داشته باشد و جایگزین بهتری برای سیمان پرتلند در مقاوم‌سازی در برابر آتش ساختاری باشد. کو و همکاران [۸۲] همچنین مقدار بهینه‌ای از سرباره با درصد پایین کمتر از ۲۰ درصد برای ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی/سرباره برای دستیابی به ظرفیت عالی مقاومت در برابر آتش توصیه کردند.



شکل ۱۲- تأثیر محتوای FA بر مقاومت فشاری سیستم پیش‌ماده ترکیبی پس از قرارگیری در دماهای بالا: (الف) ژئوپلیمر مبتنی بر FA/MK [72]؛ (ب) ژئوپلیمر مبتنی بر FA/سرباره [81]

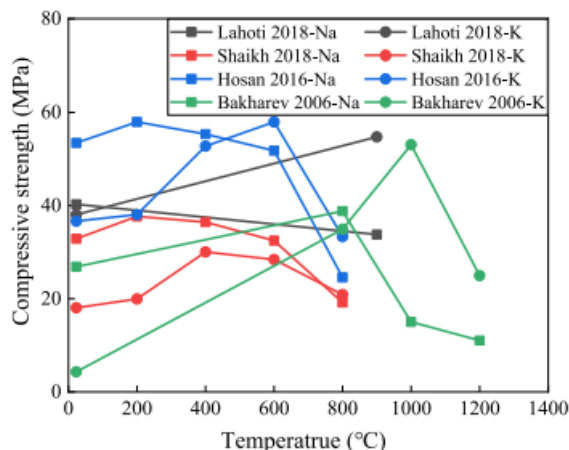
علاوه بر خاکستر بادی، متاکائولین و سرباره به عنوان پیش‌ماده‌های رایج ژئوپلیمر، استفاده از مواد زائد دیگر به عنوان پیش‌ماده‌های کامل یا جزئی دلیل دیگری برای مزایای زیست‌محیطی ژئوپلیمر است. این مواد زائد شامل انواع دیگر سرباره [۸۷-۹۰]، سرامیک زائد [۸۳، ۹۱-۹۴]، شیشه زائد [۹۵]، ضایعات پشم معدنی [۹۶]، و سوزاندن زباله‌های شهری [۹۷، ۹۸] است. اضافه کردن این مواد نشان داده است که اثر مثبت بر عملکرد حرارتی ژئوپلیمرها دارند. افزودن انواع دیگر محصولات سرباره از استخراج فلزات، از جمله سرباره مس [۸۷]، سرباره لادله [۸۸]، سرباره فرورسرمیکا [۸۹] و سرباره با منیزیم بالا [۹۰] در ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی خالص باعث افزایش مقاومت فشاری باقی‌مانده پس از قرارگیری در دمای بالا شد، که به دلیل تشکیل هیدرات آلومینوسیلیکات سدیم است که در آن یون‌های فلزی جایگزین یون‌های سدیم شده و این فازها دارای پایداری حرارتی بالایی هستند. پودر سرامیک زائد [۹۴-۸۳، ۹۱] و شیشه زائد [۹۵] غنی از سیلیس و آلومینا هستند و بنابراین معرفی آنها می‌تواند به بهبود میکروساختار متراکم‌تر، کاهش وقوع ترک‌ها و افزایش مقاومت ژئوپلیمر پس از حرارت‌دهی کمک کند. وارد کردن ضایعات پشم معدنی ریزتر با مساحت سطح خاص بزرگ‌تر به طور بالقوه موجب پیوند قوی با ژل چسباننده در طی سینترینگ ویسکوز و ذوب جزئی می‌شود که منجر به افزایش ۹۸.۵ درصدی مقاومت فشاری پس از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد [۹۶] می‌شود.

۴-۲ نوع کاتیون قلیایی

فعال‌کننده‌های مبتنی بر سدیم به دلیل قیمت پایین‌تر خود بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما در برخی موارد خاص، مانند دماهای بالا، ژئوپلیمرهای مبتنی بر پتاسیم ممکن است نتایج بهتری ارائه دهند. اگرچه مقاومت فشاری غیرمستقیم ژئوپلیمر مبتنی بر پتاسیم نسبت به ژئوپلیمر مبتنی بر سدیم نسبتاً پایین‌تر است [۹۹]، اما گزارش شده است که ژئوپلیمرهای تهیه شده با فعال‌کننده‌های حاوی پتاسیم، مقاومت بهتری در برابر دماهای بالا نشان می‌دهند، با از دست دادن جرم

کمتر، انقباض حرارتی کمتر و در نتیجه مقاومت فشاری باقی مانده بالاتر پس از قرارگیری در دماهای بالا. نتایج آزمایشاتی که محققان [۳۰،۶۱،۹۹،۱۰۰] در مورد تأثیر کاتیون قلیایی بر رفتار ژئوپلیمر انجام داده‌اند، جمع‌آوری و در شکل ۱۳ ارائه شده است.

از شکل ۱۳ می‌توان مشاهده کرد که نمونه‌های ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی که با سیلیکات سدیم سنتز شده‌اند، با افزایش دما، کاهش مقاومت را تجربه کردند، در حالی که مقاومت نمونه‌هایی که با سیلیکات پتاسیم تهیه شده بودند، در دماهای بالاتر افزایش یافت. شایخ و همکاران [۹۹] و حسان و همکاران [۱۰۰] مشاهده کردند که ژئوپلیمر مبتنی بر پتاسیم در دماهای زیر ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش مقاومت تجربه کرد، هرچند که مقاومت ژئوپلیمرهای مبتنی بر سدیم و پتاسیم پس از دماهای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. با این حال، در مطالعات لاهوتی و همکاران [۶۱] و باخارف [۳۰]، مقاومت فشاری ژئوپلیمر تهیه شده با سیلیکات پتاسیم پس از حرارت دیدن به دمای بیش از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به طور قابل توجهی افزایش یافت. ساختار آمورف آنها پس از حرارت‌دهی تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز باقی ماند [۳۰]. لاهوتی و همکاران [۶۱] همچنین تأثیر نسبت‌های مختلف $Na/(Na + K)$ را بر عملکرد دمای بالا ژئوپلیمر بررسی کردند. آنها دریافتند که نسبت باقی مانده مقاومت در ژئوپلیمر مبتنی بر سدیم-پتاسیم با افزایش نسبت $Na/(Na + K)$ کاهش می‌یابد. از نظر تغییر شکل حرارتی در حین حرارت‌دهی، ژئوپلیمر مبتنی بر سدیم انقباض حرارتی قابل توجه‌تری نسبت به ژئوپلیمر مبتنی بر پتاسیم تجربه کرد و سطح انقباض حرارتی ژئوپلیمر مبتنی بر سدیم-پتاسیم در میان ژئوپلیمر مبتنی بر سدیم و ژئوپلیمر مبتنی بر پتاسیم قرار دارد. در ژئوپلیمرهای سنتز شده با فعال کننده پتاسیم، فاز مولایت بیشتری نسبت به ژئوپلیمرهای مبتنی بر سدیم یافت شد که ممکن است یکی از دلایل مقاومت بهتر آنها در برابر دماهای بالا باشد [۹۹]. علاوه بر این، دمای شروع تراکم نیز گزارش شده است که در ژئوپلیمر مبتنی بر پتاسیم نسبت به ژئوپلیمر مبتنی بر سدیم بالاتر است [۱۰۱،۱۰۲] که باعث پایداری حرارتی بالاتر ژئوپلیمر مبتنی بر پتاسیم می‌شود.



شکل ۱۳- مقایسه‌ها بین مقاومت فشاری ژئوپلیمرهای Na-based و K-based پس از قرارگیری در دماهای مختلف [30، 61، 99، 100]

۴-۳ نسبت Si/Al

نسبت Si/Al در ژئوپلیمر یکی از عوامل مهم است که بر ترکیب فازی و رفتار مکانیکی آن تأثیر می‌گذارد، چه در دمای محیط و چه در دماهای بالا [۲۹]. در دمای محیط، با افزایش نسبت Si/Al، مقاومت ژئوپلیمر افزایش می‌یابد [۱۰۳]، زیرا نسبت بالاتر Si/Al به معنای افزایش تعداد پیوندهای Si-O-Si در ژئوپلیمرها است که از پیوندهای Si-O-Al و Al-O-Al قوی‌تر هستند [۱۰۴]. علاوه بر این، با افزایش نسبت Si/Al، ژل‌های ژئوپلیمر بیشتری تشکیل می‌شود که این به یک میکروساختار ژل یکنواخت‌تر با اندازه حفرات کاهش یافته مرتبط است. بنابراین، نسبت Si/Al در سیستم ژئوپلیمر همچنین بر مقاومت آن در برابر دماهای بالا تأثیر می‌گذارد. از آنجا که مواد آلومینوسیلیکات معمولاً در فرآیند اولیه ژئوپلیمریزاسیون به طور کامل واکنش نمی‌دهند، و Si در سیستم نهایی ژئوپلیمر ممکن است از محلول سیلیکات نیز بیاید، پیشنهاد می‌شود که از نسبت Si/Al به دست آمده از تحلیل محصولات نهایی واکنش ژئوپلیمریزاسیون برای ارزیابی استفاده شود، نه مقدار نسبت Si/Al که در حین سنتز محاسبه می‌شود) که معمولاً به آن نسبت Si/Al اسمی گفته می‌شود).

رفتارهای حرارتی ژئوپلیمر با نسبت‌های مختلف Si/Al مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۱۴ نتایج آزمایشات موجود از مقاومت فشاری نسبی ژئوپلیمر پس از قرارگیری در دماهای مختلف را جمع‌آوری و ارائه کرده است [۷۵، ۷۶، ۱۰۵]. می‌توان مشاهده کرد که از دست رفتن مقاومت ژئوپلیمر معمولاً با افزایش نسبت Si/Al پس از قرارگیری در دماهای بالا کاهش می‌یابد. کونگ و همکاران [۷۵] معتقد بودند که دلیل کاهش کم‌تر مقاومت ژئوپلیمرهای با نسبت $Si/Al > 1.5$ به فرآیند سینترینگ و تراکم مرتبط است. اثر سینترینگ باعث افزایش مقاومت با ایجاد پیوندهای قوی‌تر می‌شود و به مقابله با سایر آسیب‌های حرارتی ناشی از دماهای بالا کمک می‌کند. لاهوتی و همکاران [۷۶] همچنین پیشنهاد کردند که مقاومت باقی مانده ژئوپلیمرهای مبتنی بر متاکائولن با نسبت $Si/Al > 1.50$ توسط تراکم ماتریس تسلط دارد، در حالی که تشکیل ترک ناشی از انقباض حرارتی عامل حاکم بر از دست رفتن مقاومت در ژئوپلیمرهایی با نسبت Si/Al مولاری پایین‌تر از ۱.۵۰ است. هنگامی که نسبت Si/Al در یک بازه خاص قرار دارد، مشاهده شد که انقباض حرارتی ژئوپلیمر با افزایش نسبت Si/Al اسمی افزایش می‌یابد. بنابراین، در مطالعه لاهوتی و همکاران [۷۶]، از دست رفتن مقاومت ژئوپلیمرهای نمونه افزایش یافته با نسبت Si/Al پس از قرارگیری در ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در صورتی که نسبت Si/Al کمتر

از ۱.۵ بود، افزایش یافت. از طرف دیگر، آنها همچنین دریافته‌اند که مقدار بالای فاز سیلیکاتی ($Si/Al = 2.0$) ممکن است منجر به انبساط حرارتی شود به دلیل تورم بالای قسمت سیلیکاتی باقی‌مانده غیر واکنش‌داده [۱۶،۱۸،۲۸،۷۶،۱۰۶]. این فرآیند تورم برای میکروساختار و مقاومت ژئوپلیمر مضر است. با این حال، مقاومت فشاری نسبی هنوز افزایش یافت به‌طوری‌که نسبت Si/Al به ۲.۲ رسید در مطالعه توکچوم و همکاران [۱۰۵]. بنابراین، نیاز به مطالعات بیشتری است تا ارزش مرزی این نسبت Si/Al را هنگام وقوع تورم تأیید کنیم.

علاوه بر این، گزارش شده است که نمونه‌های ژئوپلیمر با نسبت Si/Al بالاتر دارای یک شبکه حفره‌ای به‌خوبی توزیع‌شده و اتصالات حفرات بالاتری هستند، در حالی که نمونه‌های ژئوپلیمر با $Si/Al < 1.79$ دارای حجم زیادی از حفرات با قطر بزرگتر و درجه نسبی عدم یکنواختی بیشتری هستند. بنابراین، هدایت حرارتی ژئوپلیمر به‌عنوان یک ماده چسبنده مشاهده شد که با افزایش نسبت Si/Al کاهش می‌یابد، زیرا هدایت حرارتی مواد چسبنده سیمانی به اندازه حفرات وابسته است [۱۰۷،۱۰۸]. این اجازه می‌دهد که یک چسبنده ژئوپلیمر با نسبت Si/Al بالاتر برای کاربردهای عایق‌بندی ممکن باشد.

افزودن سیلیکا تأثیر مثبتی بر تغییر نسبت Si/Al ژئوپلیمرها داشت. بسیاری از محققان سیلیکا یا دیگر مواد غنی از سیلیکا را به مواد اولیه اضافه می‌کنند تا ویژگی‌های ژئوپلیمر را بهبود بخشند. از یک طرف، ذرات سیلیکا اضافه‌شده فضاهای خالی در میکروساختار ژئوپلیمر را پر کرده و ساختار حفراتی را بهینه‌سازی می‌کنند؛ از طرف دیگر، فاز سیلیکاتی می‌تواند در واکنش ژئوپلیمر شرکت کرده و محصولات بیشتری به صورت آمورف تولید کند به دلیل ماهیت آمورف سیلیکا. به این ترتیب، ادغام فازهای سیلیکاتی می‌تواند ماتریس‌های حفره‌ای نهایی را بهینه کرده و منجر به ژل ژئوپلیمر با خواص مکانیکی بهتر شود. باید توجه داشت که مقدار اضافه‌شده سیلیکا باید در سطح خاصی کنترل شود، زیرا سیلیکا بیش از حد می‌تواند به مقاومت آسیب برساند [۱۰۹-۱۱۱] که با عواملی مانند تشکیل توده‌ها و اثر کف‌کردن جزئی/موضعی همراه است [۱۱۲]. استرس بخار بیشتر ناشی از تراکم منجر به از دست دادن مقاومت می‌شود [۱۱۳]. سیواساکتی و همکاران [۱۰۹] مشاهده کردند که اضافه‌کردن میکروسیلیکا در سطح ۱۰٪ آسیب به یکپارچگی نمونه حجمی ملات و بتن مبتنی بر خاکستر بادی را به همراه داشته و منجر به کاهش مقاومت فشاری شد.

دیگر افزودنی‌های غنی از سیلیکا، مانند پودر کوارتز [۱۱۴،۱۱۵]، ماسه زیرمیکرونی [۱۱۶]، بوکسیت [۷۱]، و شیشه بازیافتی [۱۱۷-۱۲۰]، همچنین می‌توانند مانند دود سیلیکا عمل کرده و پایداری حرارتی ژئوپلیمرها را افزایش دهند. رشاد و همکاران [۱۱۴،۱۱۵] دریافته‌اند که مقاومت فشاری باقی‌مانده ژئوپلیمر با افزایش درصد جایگزینی پودر کوارتز از ۰٪ به ۳۰٪ از وزن، افزایش یافت. زوره و همکاران [۱۱۶] مشاهده کردند که ملات ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بدست آمده از خاک رس که حاوی ۲.۵۰٪ وزنی ماسه زیرمیکرونی است، پس از حرارت‌دهی در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، پایداری کمتری داشته و مقاومت فشاری بالای ۸۵ مگاپاسکال را به نمایش گذاشت. مارتین و همکاران [۷۱] گزارش کردند که جایگزینی خاکستر بادی با ۱۵٪ بوکسیت پس از قرارگیری در دماهای بالا مقاومت مکانیکی بیشتری از خود نشان داد. سیلیکا آزاد شده از aggregate شیشه به ماتریس ژئوپلیمر می‌تواند پیوندی تقویت‌شده در ناحیه انتقال بین‌سطحی پس از حرارت‌دهی در دماهای بالا ایجاد کند. ژانگ و همکاران [۱۱۷] مشاهده کردند که مقاومت ژئوپلیمر ملات با انتخاب اندازه خاصی از aggregate شیشه ۲۰٪ افزایش یافته است.



شکل ۱۴- مقاومت فشاری نسبی نمونه‌های ژئوپلیمر با نسبت Si/Al مختلف پس از قرارگیری در دماهای مختلف [75]، 76، 105]

۵- نتیجه‌گیری

به منظور ترویج تحقیقات و کاربردهای بیشتر مقاومت به دماهای بالا در بتن ژئوپلیمر، این مرور به بررسی تحولات بتن ژئوپلیمر در طول حرارت‌دهی، عوامل درونی مؤثر بر مقاومت آن در برابر دماهای بالا، و تحقیقات موجود در خصوص کاربرد آن پرداخته است. نتیجه‌گیری‌های زیر از این مطالعه استخراج شده است:

۱. ویژگی‌های درونی ژئوپلیمر، از جمله آب شیمیایی کم، عدم وجود پورتلندیت، هدایت حرارتی پایین، فازهای پایدار حرارتی، و ساختار حفره‌ای بیشتر متصل، موجب کاهش از دست رفتن جرم و انقباض حرارتی کمتر در مقایسه با سیمان پرتلند (OPC) می‌شود. پایداری فازی، فرآیند سینترینگ منحصر به فرد و مقاومت برتر آن در برابر ریزش در طول حرارت‌دهی نیز کمک می‌کند که بتن ژئوپلیمر آسیب کمتری دیده و در نتیجه از دست دادن مقاومت کمتری پس از قرارگیری در دماهای بالا داشته باشد.
۲. آسیب ناشی از آبدار شدن، ناسازگاری حرارتی و کریستالی شدن منجر به از دست دادن مقاومت ژئوپلیمر می‌شود، در حالی که مقاومت آن‌ها به دلیل واکنش ژئوپلیمریزاسیون بیشتر و فرآیند تراکم سینترینگ افزایش می‌یابد. این دو فرآیند موازی، میزان نهایی افزایش/کاهش مقاومت را پس از قرارگیری در دماهای بالا تعیین می‌کند. به طور کلی، بتن ژئوپلیمر با مقاومت فشاری اولیه پایین‌تر دارای داکتیلیتی بالاتری است و در دماهای بالا عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌هایی با مقاومت بالاتر دارد.
۳. ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی بهترین عملکرد را در میان تمام سیستم‌های پیش‌ماده ژئوپلیمر تک پیش‌ماده نشان داد، زیرا ذوب شدن و واکنش بیشتر خاکستر بادی در دمای نسبتاً بالا به تشکیل ساختار حفره‌ای متصل کمک می‌کند، که آسیب ناشی از فشار حفره را کاهش داده و در عین حال مقاومت ژئوپلیمر را بیشتر می‌کند. ژئوپلیمر دوتایی ساخته‌شده از خاکستر بادی و محتوای جایگزینی مناسب از سایر افزودنی‌های پوزولانی مؤثر مانند سرباره و متاکائولن می‌تواند عملکرد خوبی هم در دمای محیط و هم در دماهای بالا از خود نشان دهد.
۴. در مقایسه با نمونه‌های مبتنی بر سدیم، ژئوپلیمرهایی که از فعال‌کننده‌های مبتنی بر پتاسیم استفاده می‌کنند، مقاومت محیطی کمتری دارند، اما پایداری حرارتی بالاتری دارند، با انقباض حرارتی کمتر و از دست دادن مقاومت کمتر پس از قرارگیری در دماهای بالا.
۵. زمانی که نسبت Si/Al در یک بازه خاص قرار دارد، سیستم ژئوپلیمر با نسبت Si/Al بالاتر نسبت به سیستم‌هایی با نسبت Si/Al پایین‌تر عملکرد بهتری دارد که این به دلیل فرآیند سینترینگ و تراکم است. بنابراین، وارد کردن افزودنی‌های غنی از سیلیکا مانند دود سیلیکا، پودر کوارتز و غیره می‌تواند مقاومت ژئوپلیمرها در برابر دماهای بالا را بهبود بخشد.

مراجع

- [1] Ghanim, A. (2023). Effect of modified nano-titanium and fly ash on ultra-high-performance concrete properties. *Structural Concrete*, Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.202300053> (accessed September 29, 2024).
- [2] Hakeem, I.Y., Amin, M., Agwa, I.S., Rizk, M.S., & Abdelmagied, M.F. (2023). Effect of using sugarcane leaf ash and granite dust as partial replacements for cement on characteristics of ultra-high performance concrete. *CASE STUD CONSTR MAT*, 19, e02266. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02266>.
- [3] Hakeem, I.Y., Amin, M., Agwa, I.S., Abd-Elrahman, M.H., Ibrahim, O.M.O., & Samy, M. (2023). Ultra-high-performance concrete properties containing rice straw ash and nano eggshell powder. *CASE STUD CONSTR MAT*, 19, e02291. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02291>.
- [4] Hakeem, I.Y., Amin, M., Agwa, I.S., Abd-Elrahman, M.H., & Abdelmagied, M.F. (2023). Using a combination of industrial and agricultural wastes to manufacture sustainable ultra-high-performance concrete. *CASE STUD CONSTR MAT*, 19, e02323. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02323>.
- [5] Tempest, B., Sanusi, O., Gergely, J., Ogunro, V., & Weggel, D. (2009). Compressive strength and embodied energy optimization of fly ash based geopolymer concrete. In *World of Coal Ash (WOCA) Conference* (pp. 1–17).
- [6] McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., van Riessen, A., & Corder, G.D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. *J. Clean. Prod.*, 19, 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>.
- [7] Life-cycle analysis of geopolymers. In *Geopolymers*, Woodhead Publishing, 2009, pp. 194–210. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.194>.

- [8] Singh, N.B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview. *Construct. Build. Mater.*, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>.
- [9] Shi, C., Jiménez, A.F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement Concr. Res.*, 41, 750–763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.
- [10] Davidovits, J. (1991). Geopolymers. *J. Therm. Anal.*, 37, 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/bf01912193>.
- [11] Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., & He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature—a review. *Construct. Build. Mater.*, 93, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>.
- [12] Amran, M., Huang, S.-S., Onaizi, A.M., Murali, G., & Abdelgader, H.S. (2022). Fire spalling behavior of high-strength concrete: a critical review. *Construct. Build. Mater.*, 341, 127902. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127902>.
- [13] Liu, J.-C., Tan, K.-H., & Yao, Y. (2018). A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. *Construct. Build. Mater.*, 184, 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204>.
- [14] Shah, S.N.R., Akashah, F.W., & Shafiq, P. (2019). Performance of high strength concrete subjected to elevated temperatures: a review. *Fire Technol.*, 55, 1571–1597. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0791-2>.
- [15] Provis, J.L., & van Deventer, J.S.J. (2014). *Alkali Activated Materials: State-Of-The-Art Report*, RILEM TC 224-AAM. Springer.
- [16] Rickard, W.D.A., Kealley, C.S., & van Riessen, A. (2015). Thermally induced microstructural changes in fly ash geopolymers: experimental results and proposed model. *Journal of the American Ceramic Society*, 98, 929–939. <https://doi.org/10.1111/jace.13370>.
- [17] Tu, W., Fang, G., Dong, B., & Zhang, M. (2023). Multiscale study of microstructural evolution in alkali-activated fly ash-slag paste at elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 143, 105258. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105258>.
- [18] Abdulkareem, O.A., Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., & Saif, A.A. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.047>.
- [19] Zhang, H.Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., & Wang, F. (2016). Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 109, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.043>.
- [20] Kashani, A., Ngo, T.D., Walkley, B., & Mendis, P. (2017). Thermal performance of calcium-rich alkali-activated materials: a microstructural and mechanical study. *Construction and Building Materials*, 153, 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.119>.
- [21] Razak, S.N.A., Shafiq, N., Guillaumat, L., Farhan, S.A., & Lohana, V.K. (2022). Fire-exposed fly-ash-based geopolymer concrete: effects of burning temperature on mechanical and microstructural properties. *Materials*, 15, 1884. <https://doi.org/10.3390/ma15051884>.
- [22] Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y.-F., & Wuhner, R. (2018). Measurement and prediction of thermal properties of alkali-activated fly ash/slag binders at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 51, 108. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1233-9>.
- [23] Rivera, O.G., Long, W.R., Weiss Jr., C.A., Moser, R.D., Williams, B.A., Torres-Cancel, K., Gore, E.R., Allison, P.G., & Williams, P.G. (2016). Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to Portland cement-based binders. *Cement and Concrete Research*, 90, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.09.013>.
- [24] Walkley, B., Rees, G.J., San Nicolas, R., van Deventer, J.S.J., Hanna, J.V., & Provis, J.L. (2018). New structural model of hydrous sodium aluminosilicate gels and the role of charge-balancing extra-framework Al. *Journal of Physical Chemistry C*, 122, 5673–5685. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00259>.
- [25] White, C.E., Provis, J.L., Proffen, T., & van Deventer, J.S.J. (2010). The effects of temperature on the local structure of metakaolin-based geopolymer binder: a neutron pair distribution function investigation. *Journal of the American Ceramic Society*, 93, 3486–3492. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03906.x>.
- [26] Kamarudin, H., Muthusamy, S., & Sani, I.M. (2016). A review on fire performance of geopolymer concrete. *Journal of Construction and Building Materials*, 112, 906–920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.015>.
- [27] Khalafi, M., & Nazari, A. (2021). Thermomechanical properties and fire resistance of alkali-activated fly ash-based geopolymer concrete: a review. *Journal of Building Engineering*, 35, 102050. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102050>.
- [28] Zou, Q., Liu, J., & Gao, F. (2020). Effect of high temperatures on the compressive strength and microstructure of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 252, 119024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119024>.
- [29] Zhang, Z., Xie, Z., Xie, Y., & Zhang, J. (2021). Performance of geopolymer concrete exposed to elevated temperatures: review and perspectives. *Construction and Building Materials*, 281, 122581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122581>.
- [30] Li, Z., & Ding, Y. (2018). Effect of elevated temperature on the mechanical properties of alkali-activated slag/fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 172, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.171>.

- [31] Kovalchuk, V., & Leonova, E. (2020). Geopolymer concrete under fire: behavior and properties of materials under high temperature. *Advanced Materials Science and Engineering*, 2020, 1503784. <https://doi.org/10.1155/2020/1503784>.
- [32] Duxson, P., & van Deventer, J.S.J. (2009). The effects of alkali metal content on the synthesis of aluminosilicate geopolymers. *Journal of Materials Science*, 44(9), 2401–2410. <https://doi.org/10.1007/s11041-008-0167-x>.
- [33] Zhang, F., & Li, X. (2019). High-temperature behavior of alkali-activated fly ash-slag geopolymer concrete. *Cement and Concrete Research*, 122, 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.005>.
- [34] Zhang, P., & Zhou, Y. (2015). High temperature performance of geopolymer concrete: review and perspectives. *Journal of Building Engineering*, 3, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.07.004>.
- [35] Zhang, Z., Li, Z., & Xie, Z. (2018). High temperature performance of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials*, 11(5), 816. <https://doi.org/10.3390/ma11050816>.
- [36] Mollah, M.Y.A., & Al-Ghamdi, A. (2020). Thermomechanical performance of geopolymer concrete under elevated temperature: a review. *Construction and Building Materials*, 259, 119838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119838>.
- [37] Ghosh, S., & Saha, P. (2019). Effects of elevated temperatures on geopolymer concrete: a review. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4247–4254. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.103>.
- [38] Naik, T.R., & Singh, S. (2020). Geopolymer concrete: an environmentally friendly alternative to conventional concrete. *Concrete International*, 42(5), 43–49.
- [39] Kumar, S., & Bhattacharjee, S. (2017). Thermal stability and mechanical properties of geopolymer concrete exposed to elevated temperature: a review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2553–2560. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.169>.
- [40] Torkaman, S., & Shekarchi, M. (2022). The influence of elevated temperatures on the microstructure and properties of geopolymer concrete. *Cement and Concrete Composites*, 131, 104604. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104604>.
- [41] Duxson, P., Lukey, G.C., & van Deventer, J.S.J. (2007). Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000°C. *Journal of Materials Science*, 42, 3044–3054. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0535-4>.
- [42] Vickers, L., Pan, Z., Tao, Z., & van Riessen, A. (2016). In situ elevated temperature testing of fly ash-based geopolymer composites. *Materials*, 9(6), 445. <https://doi.org/10.3390/ma9060445>.
- [43] Rickard, W.D.A., Gluth, G.J.G., & Pistol, K. (2016). In-situ thermo-mechanical testing of fly ash geopolymer concretes made with quartz and expanded clay aggregates. *Cement and Concrete Research*, 80, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.006>.
- [44] van Riessen, A., & Subaer. (2007). Thermo-mechanical and microstructural characterization of sodium-poly(sialate-siloxo) (Na-PSS) geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42, 3117–3123. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0522-9>.
- [45] Duan, P., Yan, C., Zhou, W., Luo, W., & Shen, C. (2015). An investigation of the microstructure and durability of a fluidized bed fly ash–metakaolin geopolymer after heat and acid exposure. *Materials Design*, 74, 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.009>.
- [46] Mohd Ali, A.Z., Sanjayan, J., & Guerrieri, M. (2017). Performance of geopolymer high-strength concrete wall panels and cylinders when exposed to a hydrocarbon fire. *Construction and Building Materials*, 137, 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.099>.
- [47] Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*.
- [48] Yuzer, N., Aköz, F., & Öztürk, L.D. (2004). Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1803–1807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.023>.
- [49] He, R., Dai, N., & Wang, Z. (2020). Thermal and mechanical properties of geopolymers exposed to high temperature: A literature review. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 7532703. <https://doi.org/10.1155/2020/7532703>.
- [50] Jaya, N.A., Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Abdullah, M.M.A.B., & Hussin, K. (2020). Correlation between pore structure, compressive strength, and thermal conductivity of porous metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 247, 118641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118641>.
- [51] Kong, D.L.Y., & Sanjayan, J.G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar, and concrete. *Cement and Concrete Research*, 40, 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.017>.
- [52] Pan, Z., & Sanjayan, J.G. (2010). Stress–strain behavior and abrupt loss of stiffness of geopolymer at elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 657–664. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.010>.
- [53] Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., & Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37, 1583–1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.021>.
- [54] Rashad, A.M., & Zeedan, S.R. (2011). The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. *Construction and Building Materials*, 25, 3098–3107. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.044>.
- [55] Rickard, W.D.A., Williams, R., Temuujin, J., & van Riessen, A. (2011). Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high-temperature applications. *Materials Science and Engineering A*, 528, 3390–3397. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.005>.

- [56] Çelikten, S., Sarıdemir, M., & Deneme, I.Ö. (2019). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag + fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 217, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.055>.
- [57] Pan, Z., Sanjayan, J.G., & Rangan, B.V. (2014). Effect of transient creep on compressive strength of geopolymer concrete for elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Research*, 56, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.014>.
- [58] Zhang, H.Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., & Qi, S.L. (2016). Comparative thermal and mechanical performance of geopolymers derived from metakaolin and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 04015092. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001359](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001359).
- [59] Sarker, P.K., Kelly, S., & Yao, Z. (2014). Effect of fire exposure on cracking, spalling, and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials Design*, 63, 584–592. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.059>.
- [60] Pan, Z., Sanjayan, J.G., & Rangan, B.V. (2009). An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials Science*, 44, 1873–1880. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3243-z>.
- [61] Lahoti, M., Wong, K.K., Tan, K.H., & Yang, E.-H. (2018). Effect of alkali cation type on strength endurance of fly ash geopolymers subject to high temperature exposure. *Materials Design*, 154, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.023>.
- [62] Guerrieri, M., & Sanjayan, J.G. (2009). Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures. *Fire Materials*, 34. <https://doi.org/10.1002/fam.1014>.
- [63] Ali, M.F., & Vijayalakshmi Natrajan, M.M. (2021). A review of geopolymer composite thermal properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 822(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/822/1/012051>.
- [64] Li, M., Qian, C., & Sun, W. (2004). Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*, 34, 1001–1005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.007>.
- [65] Sarıdemir, M., & Çelikten, S. (2023). Effects of Ms modulus, Na concentration, and fly ash content on properties of vapor-cured geopolymer mortars exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 363, 129868. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129868>.
- [66] Çelikten, S., & Sarıdemir, M. (2019). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag + fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 217, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.055>.
- [67] Kaya, M., Uysal, M., Yilmaz, K., & Atis, C.D. (2018). Behaviour of geopolymer mortars after exposure to elevated temperatures. *Materials Science*, 24, 428–436. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.24.4.18829>.
- [68] Shaikh, F.U.A. (2019). Effect of cooling on the residual mechanical properties and cracking of plain and fibrous geopolymer concretes at elevated temperatures. *Structural Concrete*, 20, 1583–1595. <https://doi.org/10.1002/suco.201800267>.
- [69] Junaid, M.T., Khennane, A., & Kayali, O. (2015). Performance of fly ash based geopolymer concrete made using non-pelletized fly ash aggregates after exposure to high temperatures. *Materials and Structures*, 48, 3357–3365. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0404-6>.
- [70] Junru, R., Huiguo, C., Ruixi, D., & Tao, S. (2019). Behavior of combined fly ash/GBFS-based geopolymer concrete after exposure to elevated temperature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 267, 032056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/267/3/032056>.
- [71] Martin, A., Pastor, J.Y., Palomo, A., & Fernández Jiménez, A. (2015). Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers). *Construction and Building Materials*, 93, 1188–1196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.044>.
- [72] Zhang, H.Y., Kodur, V., Qi, S.L., Cao, L., & Wu, B. (2014). Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications. *Construction and Building Materials*, 55, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.040>.
- [73] Junaid, M.T., Kayali, O., & Khennane, A. (2017). Response of alkali activated low calcium fly-ash based geopolymer concrete under compressive load at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 50, 50. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0877-6>.
- [74] European Committee for Standardization (CEN). (2004). *EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design*.
- [75] Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., & Sagoe-Crentsil, K. (2008). Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. *Journal of Materials Science*, 43, 824–831. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2205-6>.
- [76] Lahoti, M., Wong, K.K., Yang, E.-H., & Tan, K.H. (2018). Effects of Si/Al molar ratio on strength endurance and volume stability of metakaolin geopolymers subject to elevated temperature. *Ceramics International*, 44, 5726–5734. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.226>.

- [77] Dombrowski, K., Buchwald, A., & Weil, M. (2007). The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42, 3033–3043. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0532-7>.
- [78] Rickard, W.D.A., van Riessen, A., & Walls, P. (2010). Thermal character of geopolymers synthesized from class F fly ash containing high concentrations of iron and $\hat{I}\pm$ -quartz. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 7, 81–88. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02328.x>.
- [79] Shaikh, F.U.A., & Vimonsatit, V. (2015). Compressive strength of fly-ash-based geopolymer concrete at elevated temperatures. *Fire Materials*, 39, 174–188. <https://doi.org/10.1002/fam.2240>.
- [80] Hager, I., Sitarz, M., & Mroz, K. (2021). Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application – effect of slag addition. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128168>.
- [81] Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y.F., Wuhner, R., & Murphy, T. (2018). Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature. *Cement and Concrete Composites*, 86, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.011>.
- [82] Qu, F., Li, W., Tao, Z., Castel, A., & Wang, K. (2020). High temperature resistance of fly ash/GGBFS-based geopolymer mortar with load-induced damage. *Materials and Structures*, 53. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01544-2>.
- [83] Huseien, G.F., Sam, A.R.M., Mirza, J., Tahir, M.Md, Asaad, M.A., Ismail, M., & Shah, K.W. (2018). Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated temperatures: performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 187, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.226>.
- [84] Myers, R.J., Bernal, S.A., San Nicolas, R., & Provis, J.L. (2013). Generalized structural description of calcium–sodium aluminosilicate hydrate gels: the cross-linked substituted tobermorite model. *Langmuir*, 29, 5294–5306. <https://doi.org/10.1021/la4000473>.
- [85] Zhang, Z., Li, L., Ma, X., & Wang, H. (2016). Compositional, microstructural and mechanical properties of ambient condition cured alkali-activated cement. *Construction and Building Materials*, 113, 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.043>.
- [86] Pan, Z., Sanjayan, J.G., & Rangan, B.V. (2011). Fracture properties of geopolymer paste and concrete. *Magazine of Concrete Research*, 63, 763–771. <https://doi.org/10.1680/macr.2011.63.10.763>.
- [87] Zhang, D.-W., Zhao, K.-F., Peng, S.-Y., Sun, X.-M., Xu, Z.-Y., Wang, L., Li, H. (2022). Improvement of the thermal properties of alkali-activated fly ash after high temperature by the Fe-based solid wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01303. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01303>.
- [88] Luo, Y., Klima, K.M., Brouwers, H.J.H., & Yu, Q. (2022). Effects of ladle slag on Class F fly ash geopolymer: reaction mechanism and high temperature behavior. *Cement and Concrete Composites*, 129, 104468. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104468>.
- [89] Kuri, J.C., Majhi, S., Sarker, P.K., & Mukherjee, A. (2021). Microstructural and non-destructive investigation of the effect of high temperature exposure on ground ferronickel slag blended fly ash geopolymer mortars. *Journal of Building Engineering*, 43, 103099. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103099>.
- [90] Yang, T., Wu, Q., Zhu, H., & Zhang, Z. (2017). Geopolymer with improved thermal stability by incorporating high-magnesium nickel slag. *Construction and Building Materials*, 155, 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.081>.
- [91] Zhang, G.-Y., Bae, S.-C., Lin, R.-S., & Wang, X.-Y. (2021). Effect of waste ceramic powder on the properties of alkali-activated slag and fly ash pastes exposed to high temperature. *Polymers*, 13, 3797. <https://doi.org/10.3390/polym13213797>.
- [92] Giannopoulou, I., Robert, P.M., Petrou, M.F., Nicolaidis, D. (2024). Mechanical behavior of construction and demolition waste-based alkali activated materials exposed to fire conditions. *Construction and Building Materials*, 415, 134994. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134994>.
- [93] Sun, Z., Cui, H., An, H., Tao, D., Xu, Y., Zhai, J., Li, Q. (2013). Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. *Construction and Building Materials*, 49, 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.063>.
- [94] Abd Ellatief, M., Abadel, A.A., Federowicz, K., Elrahman, M.A., (2023). Mechanical properties, high temperature resistance and microstructure of eco-friendly ultrahigh performance geopolymer concrete: role of ceramic waste addition. *Construction and Building Materials*, 401, 132677. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132677>.
- [95] Ziejewska, C., Grella, A., Mierzwinski, D., & Hebda, M. (2023). Influence of waste glass addition on the fire resistance, microstructure and mechanical properties of geopolymer composites. *Materials*, 16, 6011. <https://doi.org/10.3390/ma16176011>.
- [96] Luo, Y., Yu, Q. (2024). Valorization of mineral wool waste in Class F fly ash geopolymer: geopolymerization, macro properties, and high temperature behavior. *Cement and Concrete Composites*, 145, 105318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105318>.
- [97] Zhang, B., Ma, Y., Yang, Y., Zheng, D., Wang, Y., Ji, T. (2023). Improving the high temperature resistance of alkali-activated slag paste using municipal solid waste incineration bottom ash. *Journal of Building Engineering*, 72, 106664. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106664>.

- [98] Chen, B., Perumal, P., Aghabeyk, F., Adediran, A., Illikainen, M., Ye, G. (2024). Advances in using municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as precursor for alkali-activated materials: a critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107516. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107516>.
- [99] Shaikh, F., Haque, S. (2018). Effect of nano silica and fine silica sand on compressive strength of sodium and potassium activators synthesised fly ash geopolymer at elevated temperatures. *Fire Materials*, 42, 324–335. <https://doi.org/10.1002/fam.2496>.
- [100] Hosan, A., Haque, S., Shaikh, F. (2016). Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: a comparative study. *Journal of Building Engineering*, 8, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.10.005>.
- [101] Pan, Z., Sanjayan, J.G. (2012). Factors influencing softening temperature and hot-strength of geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 34, 261–264. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.019>.
- [102] Duxson, P., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. (2007). The thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 2 – phase stability and structural development. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353, 2186–2200. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.02.050>.
- [103] He, P., Wang, M., Fu, S., Jia, D., Yan, S., Yuan, J., Xu, J., Wang, P., Zhou, Y. (2016). Effects of Si/Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer. *Ceramics International*, 42, 14416–14422. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.033>.
- [104] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoate, S.W., Kriven, W.M., van Deventer, J.S.J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269, 47–58.
- [105] Thokchom, S., Mandal, K.K., Ghosh, S. (2012). Effect of Si/Al ratio on performance of fly ash geopolymers at elevated temperature. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37, 977–989. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0230-5>.
- [106] Provis, J.L., Yong, C.Z., Duxson, P., van Deventer, J.S.J. (2009). Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 336, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.11.019>.
- [107] Kamezu, E., Nait-Ali, B., Bignozzi, M.C., Leonelli, C., Rossignol, S., Smith, D.S. (2012). Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements. *Journal of the European Ceramic Society*, 32, 1593–1603. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.12.030>.
- [108] Duxson, P., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. (2006). Thermal conductivity of metakaolin geopolymers used as a first approximation for determining gel interconnectivity. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 7781–7788. <https://doi.org/10.1021/ie060187o>.
- [109] M, S., R, J., Rajamane, N.P., Jose, R. (2018). Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 499, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.027>.
- [110] Li, O.H., Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bayuaji, R., Abdullah, M.M.A.B., Loong, F.K., Jin, T.S., Teng, N.H., Nabiałek, M., Jez, B., Sing, N.Y. (2021). Evaluation of the effect of silica fume on amorphous fly ash geopolymers exposed to elevated temperature. *Magnetochemistry*, 7, 9. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7010009>.
- [111] Cao, B., Li, Y., Li, P. (2024). Synergistic effect of blended precursors and silica fume on strength and high temperature resistance of geopolymer. *Materials*, 17, 2975. <https://doi.org/10.3390/ma17122975>.
- [112] Messina, F., Colangelo, R., Cioffi, R. (2018). Alkali activated waste fly ash as sustainable composite: influence of curing and pozzolanic admixtures on the early-age physico-mechanical properties and residual strength after exposure at elevated temperature. *Composites Part B: Engineering*, 132, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.08.012>.
- [113] Zhang, P., Han, X., Guo, J., Hu, S. (2023). High-temperature behavior of geopolymer mortar containing nano-silica. *Construction and Building Materials*, 364, 129983. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129983>.
- [114] Rashad, A.M., Ouda, A.S. (2016). An investigation on alkali-activated fly ash pastes modified with quartz powder subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 122, 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.068>.
- [115] Rashad, A.M., Hassan, A.A., Zeedan, S.R. (2016). An investigation on alkali-activated Egyptian metakaolin pastes blended with quartz powder subjected to elevated temperatures. *Applied Clay Science*, 132–133, 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.002>.
- [116] Zawrah, M.F., Abo Sawan, S.E. (2023). Hardened and fired geopolymer mortars fabricated from Cyclone's waste clay and submicron sand: a comparative study. *Construction and Building Materials*, 364, 129998. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129998>.
- [117] Zhang, B., He, P., Poon, C.S. (2020). Improving the high temperature mechanical properties of alkali activated cement (AAC) mortars using recycled glass as aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103654. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103654>.