

dr inż. Barbara Słomka-Słupik^{1*)}

ORCID: 0000-0001-6112-4494

dr inż. Tomasz Bury²⁾

ORCID: 0000-0002-1462-5154

The influence of ionizing radiation and neutrons on the hardening of geopolymer samples

Wpływ promieniowania jonizującego i neutronów na twardnienie próbek geopolimerowych

DOI: 10.15199/33.2026.09.02

Abstract: This paper addresses poorly recognized issues related to the hardening of alkali-activated aluminosilicates under the influence of ionizing radiation and neutrons. A literature review and pilot preliminary exploratory studies are presented. After 14 days of setting, the still dense-plastic geopolymer mortar samples were exposed to alpha, beta and gamma radiation, as well as neutrons. After 108 days of exposure, no macroscopic changes in their appearance were observed. The neutron-exposed sample showed an approximately 22% increase in gamma radiometer readings relative to the background. Areas for further research are identified.

Keywords: geopolymer concrete; nuclear radiation; hardening; geopolymerization

Streszczenie: W artykule omówiono słabo rozpoznane zagadnienia związane z procesem twardnienia alkalicznie aktywowanych glinokrzemianów pod wpływem promieniowania jonizującego oraz neutronów. Przedstawiono badania literaturowe oraz pilotażowe badania własne o wstępnym charakterze rozpoznawczym. Po 14 dniach wiązania nadal gęstoplastyczne próbki zaprawy geopolimerowej poddano ekspozycji na promieniowanie alfa, beta, gamma oraz neutrony. Po 108 dniach ekspozycji nie zaobserwowano makroskopowych zmian ich wyglądu. W próbce ekspozowanej na neutrony stwierdzono zwiększenie wskazań radiometru gamma o ok. 22% względem tła. Wskazano obszary dalszych badań.

Słowa kluczowe: beton geopolimerowy; promieniowanie jądrowe; twardnienie, geopolimeryzacja

The development of nuclear power imposes specific requirements on construction materials. They must exhibit high mechanical durability, thermal resistance and structural stability under ionizing radiation. One promising group of materials considered in this context is geopolymers – inorganic aluminosilicate binders with potentially high mechanical, chemical and thermal resistance, as well as many other advantageous properties, while at the same time having a low environmental footprint compared with conventional Portland-cement-based binders. As is well known, Portland clinker production consumes enormous amounts of energy and raw materials and, at the same time, generates CO₂ emissions both from fuel combustion and from the chemical calcination of calcium carbonates [1]. Consequently, cement clinker is partially or completely replaced with non-clinker materials. Complete replacement is associated with the production of alkali-activated binders, commonly referred to as geopolymers, i.e. inorganic polymers. The matrices of these binders are formed by a polycondensation reaction between selected aluminosilicate-containing waste materials (the precursor) and alkalis (the activator). The basic precursor is metakaolin, although combustion by-products are also frequently used, particularly siliceous fly ash.

According to the current state of knowledge, geopolymer-binder concrete containing a suitable non-reactive aggregate resistant to high temperatures could be a better solution

Rozwój energetyki jądrowej stawia szczególne wymagania materiałom budowlanym. Muszą się one charakteryzować dużą trwałością mechaniczną, odpornością termiczną oraz stabilnością strukturalną w warunkach oddziaływania promieniowania jonizującego. Jedną z perspektywicznych grup materiałów rozważanych w tym kontekście są geopolimery – nieorganiczne spoiwa glinokrzemianowe o potencjalnie dużej odporności mechanicznej, chemicznej i termicznej, oraz wielu innych korzystnych właściwościach, a jednocześnie małym śladzie środowiskowym w porównaniu z tradycyjnymi spoiwami na bazie cementu portlandzkiego. Jak wiadomo, produkcja klinkieru portlandzkiego pochłania ogromne ilości energii i surowców, a jednocześnie emituje CO₂, zarówno z procesów spalania paliw, jak i chemicznej kalcynacji węglanów wapnia [1]. W związku z tym klinkier cementowy zastępuje się częściowo lub całkowicie materiałami nieklinkierowymi. Całkowite zastąpienie wiąże się z produkcją alkalicznie aktywowanych spoiw, zwanych potocznie geopolimerami, czyli nieorganicznych polimerów. Matryce tych spoiw powstają w wyniku reakcji polikondensacji niektórych odpadów zawierających glinokrzemian (prekursor) z alkaliami (aktywator). Podstawowym prekursorem jest metakaolin, ale często też uboczne produkty spalania (UPS), a przede wszystkim lotny popiół krzemionkowy.

Zgodnie z obecnym stanem wiedzy, beton na spoiwie geopolimerowym z odpowiednim niereaktywnym i odpornym na wysokie temperatury kruszywem, mógłby być lepszym rozwiązaniem w przypadku obiektów energetyki jądrowej niż beton na bazie cementu, ponieważ ma lepsze właściwości ochronne, szczegól-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

²⁾ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

*) Address for correspondence: barbara.slomka-slupik@polsl.pl

for nuclear facilities than cement-based concrete because it offers better protective properties, particularly at elevated temperatures. Studies of geopolymer concrete have shown [2] that residual compressive strength is a key parameter at high temperature; it increases in the range of 150–350°C but decreases above 400°C because of microcracking. In addition, the tensile strength of geopolymer concrete remains higher up to 300°C, with a substantial decrease above 800°C. Geopolymer concrete can withstand temperatures of up to 1000–1200°C [3], whereas the loss of strength of cement concrete at 1000°C can reach as much as 95%. Cement concrete may also undergo explosive spalling at high temperature [2]. Geopolymer concrete, by contrast, shows excellent resistance to explosive spalling and performs well under fire exposure [3]. The differences in binder degradation during fire are related to the role of water. In a model geopolymer binder, water does not participate substantially in the binding reactions because geopolymer binders do not hydrate. During hardening, a large amount of water evaporates after the constituents have been mixed.

The geopolymerization process involves dissolution and reorganization of the aluminosilicate, followed by condensation and polymerization [1]. Dissolution and reorganization lead to the formation of several types of oligomers, which combine to form geopolymers. When the oligomers combine, water is released from OH^- groups. Hardening usually takes place at elevated temperature (approximately $70^\circ\text{C} \pm 30^\circ\text{C}$, depending on the constituents used). Ultimately, geopolymers consist of repeating units of silicon (SiO_4) and aluminium (AlO_4) tetrahedra linked by oxygen atoms into a three-dimensional network of amorphous N-A-S-H gel [1].

Despite the large number of studies and the demonstrated effectiveness of geopolymer materials, their widespread use in the construction sector is hindered by the lack of detailed standards, regulatory frameworks and certification protocols. Geopolymer concretes are chemically diverse and strongly dependent on the origin of the precursors. Moreover, there are no harmonized reference procedures for their key properties. Progress has been made in implementing these materials in China, Australia and the USA, while in Europe the RILEM TC 247-DTA and CEN technical committees continue to work actively on guidelines and pre-normative documents for alkali-activated materials. However, no international standard (ISO or EN) has yet been devoted entirely to geopolymer materials for structural applications. Standards developed outside Europe generally do not prescribe component composition, as is the case for cement, but instead focus on specified properties of the finished hardened material. The global trend is therefore moving away from a prescriptive approach ('the material must have this composition') towards a performance-based approach ('the material must achieve specified performance'). This approach is favourable to geopolymers and is considered the most likely route towards their standardization [4].

Many studies indicate that hardened geopolymers are resistant to gamma radiation [5]. It is nevertheless worth examining whether additional effects occur during hardening under

nie na wysoką temperaturę. Badając beton geopolimerowy, zaobserwowano [2], że w wysokiej temperaturze kluczowa jest resztkowa wytrzymałość na ściskanie, która zwiększa się do temperatury 150–350°C, ale spada powyżej 400°C z powodu powstawania mikropęknięć. Ponadto, wytrzymałość na rozciąganie betonu geopolimerowego jest większa do temperatury 300°C, ze znacznym spadkiem powyżej 800°C. Beton geopolimerowy może być odporny do 1000–1200°C [3], natomiast utrata wytrzymałości betonu cementowego w temperaturze 1000°C sięga nawet 95%. Beton cementowy może również ulec wybuchowemu odpryskiwaniu z powodu wysokiej temperatury [2]. Z kolei beton geopolimerowy wykazuje znakomitą odporność na odpryskiwanie wybuchowe i dobrze znosi ekspozycję ogniową [3]. Powodem różnic w niszczeniu spoiw podczas pożaru jest rola wody. W modelowym spoiwie geopolimerowym woda nie uczestniczy w reakcjach wiązania w dużym stopniu, ponieważ spoiwo geopolimerowe nie hydratyzuje. Podczas twardnienia woda w dużej ilości odparowuje po zmieszaniu składników.

Proces geopolimeryzacji obejmuje rozpuszczanie i reorganizację glinokrzemianu oraz kondensację i polimeryzację [1]. Rozpuszczanie i reorganizacja prowadzą do powstania kilku rodzajów oligomerów, które łączą się i tworzą geopolimery. W przypadku, gdy oligomery się łączą, wówczas z grup OH^- uwalnia się woda. Ich twardnienie następuje zazwyczaj w podwyższonej temperaturze (ok. $70^\circ\text{C} \pm 30^\circ\text{C}$, w zależności od użytych składników). Ostatecznie, geopolimery są zbudowane z powtarzających się jednostek tetraedrów krzemu (SiO_4) i glinu (AlO_4), połączonych atomami tlenu w trójwymiarową sieć amorficznego żelu N-A-S-H [1].

Pomimo dużej liczby badań i udowodnionej skuteczności materiałów geopolimerowych, ich powszechne zastosowanie w sektorze budownictwa jest utrudnione z powodu braku szczegółowych norm, ram regulacyjnych i protokołów certyfikacyjnych. Betony geopolimerowe są chemicznie zróżnicowane i silnie zależne od pochodzenia prekursorów. Ponadto nie mają ujednoliconych procedur odniesienia dla kluczowych właściwości. Poczyniono postępy we wdrażaniu tych materiałów w Chinach, Australii i USA, a w Europie komitety techniczne RILEM TC 247-DTA i CEN nadal aktywnie pracują nad ustanowieniem wytycznych i dokumentów przednormatywnych dotyczących materiałów aktywowanych alkalicznie. Żadna norma międzynarodowa (ISO ani EN) nie została jednak w pełni poświęcona materiałom geopolimerowym do zastosowania w konstrukcjach. Pozaeuropejskie normy nie narzucają natomiast składu komponentów, jak w przypadku cementu, a raczej skupiają się na określonych właściwościach gotowego utwardzonego materiału. Świat odchodzi zatem od podejścia preskryptywnego („materiał musi mieć taki skład”) na rzecz performance-based („materiał ma osiągnąć określone parametry”). To podejście sprzyja geopolimerom i jest uznawane za najbardziej prawdopodobną drogę ich normalizacji [4].

Wiele badań wskazuje, że utwardzony geopolimer jest odporny na promieniowanie gamma [5], ale warto również sprawdzić, czy podczas utwardzania promieniowaniem występują dodatkowe efekty, ponieważ, jak wiadomo, np. mikrofały w istotny sposób przyspieszają utwardzanie i zmieniają mikrostrukturę matrycy geopolimerowej [6]. Dodatkowo też analogii

irradiation, since microwaves, for example, are known to significantly accelerate hardening and modify the microstructure of the geopolymer matrix [6]. Analogies are also sought in studies on the radiation-induced acceleration of curing in many polymers. This process is referred to as **radiation crosslinking** [7]. The analogy arises from the fact that both polymers and geopolymers are materials with structures composed of repeating units linked into an extended network formed during polymerization.

Worldwide research on the interaction between geopolymer concrete intended for nuclear applications and nuclear radiation can be assigned to three main areas concerned with:

- the effect of radiation on the microstructure of geopolymers [8, 9],
- geopolymer concretes as radiation-shielding materials [10, 11, 12],
- geopolymers for the immobilization of radioactive waste [13, 14].

It should be emphasized that there are far more studies on cement concrete than on geopolymer concrete (examples, with particular attention to durability, are discussed in [15, 16]). In this paper, attention is focused primarily on the geopolymerization of aluminosilicates under the influence of nuclear radiation.

Nuclear radiation is the emission of particles or electromagnetic waves by atomic nuclei. It accompanies natural and artificial radioactive transformations (radioactive decay) as well as nuclear reactions. Nuclear radiation is characterized by high energy and is generally ionizing. There are three main types of radiation. **Alpha (α) radiation** is a stream of positively charged particles (helium nuclei). It has a short range – it can be stopped by a sheet of paper or by the human epidermis. However, it is very dangerous if it enters the body. **Beta (β) radiation**, i.e. a stream of electrons or positrons, has a greater range than alpha radiation and can be stopped, for example, by a layer of aluminium or glass a few millimetres thick. **Gamma (γ) radiation** is an electromagnetic wave of very high frequency and energy. It has very high penetrating power, and thick lead or concrete shielding is required to attenuate it. **Neutron radiation** can additionally be distinguished; it consists of free neutrons and is generated as a result of nuclear fission, nuclear decay and nuclear fusion. Through interactions with matter and associated nuclear processes, neutrons can lead to the formation of ionized particles and, by interacting with atomic nuclei, to the production of new radioactive isotopes that subsequently emit further quanta of ionizing radiation during decay [17].

Effect of ionizing radiation on geopolymerization

Ionizing radiation can interact with geopolymer materials both indirectly and directly. In porous materials, pore-water radiolysis may play an important role, leading to the formation of radicals, hydrogen peroxide, molecular hydrogen and other radiolytic products. The significance of this mechanism depends on the water content, pore distribution, degree of sample sealing, exposure atmosphere, and radiation dose and dose rate [18, 19].

szuka się w badaniach nad przyspieszeniem twardnienia wielu polimerów wskutek promieniowania jonizującego. Proces ten nazywa się **radiacyjnym sieciowaniem** [7]. Analogie wynikają z tego, że zarówno polimery, jak i geopolimery są materiałami o strukturze zbudowanej z powtarzających się jednostek połączonych w rozległą sieć, powstającą w procesie polimerizacji.

Światowe badania nad interakcją betonu geopolimerowego do zastosowań jądrowych i promieniowania jądrowego, można przyporządkować trzem głównym obszarom zajmującym się:

- wpływem promieniowania na mikrostrukturę geopolimerów [8, 9],
- betonami geopolimerowymi, jako osłonami przed promieniowaniem [10, 11, 12],
- geopolimerami do immobilizacji odpadów promieniotwórczych [13, 14].

Należy podkreślić, że badań dotyczących betonów cementowych jest o wiele więcej niż betonów geopolimerowych (przykładowe, ze zwróceniem uwagi na ich trwałość, omówiono w pracach [15, 16]). W artykule uwaga zostanie skierowana przede wszystkim na proces geopolimerizacji glinokrzemianów pod wpływem promieniowania jądrowego.

Promieniowanie jądrowe to emisja cząstek lub fal elektromagnetycznych przez jądra atomów. Towarzyszy ono naturalnym i sztucznym przemianom promieniotwórczym (rozpadom radioaktywnym) oraz reakcjom jądrowym. Promieniowanie jądrowe charakteryzuje się dużą energią i zazwyczaj ma charakter jonizujący. Istnieją trzy główne typy promieniowania. **Promieniowanie alfa (α)** to strumień dodatnio naładowanych cząstek (jąder helu). Ma ono niewielki zasięg – zatrzymuje je kartka lub naskórek człowieka. Jest jednak bardzo niebezpieczne w przypadku проникnięcia do wnętrza organizmu. **Promieniowanie beta (β)**, czyli strumień elektronów lub pozytonów, charakteryzuje się większym zasięgiem niż alfa (α), zatrzymuje je np. kilkumilimetrowa warstwa aluminium czy szkła. **Promieniowanie gamma (γ)** to fala elektromagnetyczna o bardzo dużej częstotliwości i energii. Cechuje się ogromną zdolnością przenikania. Do jego zatrzymania potrzebne są grube osłony z ołowiu lub betonu. Dodatkowo można wskazać na **promieniowanie neutronowe**, które składa się z wolnych neutronów i powstaje w wyniku rozszczepienia i rozpadu jądra oraz syntezy jądrowej. Neutrony promieniowania, w wyniku reakcji z materią oraz rozpadu, wytwarzają zjonizowane cząsteczki, które oddziałując z jądrami atomów, powodują powstawanie nowych izotopów promieniotwórczych, emitujących podczas rozpadu kolejne kwanty promieniowania jonizującego [17].

Wpływ promieniowania jonizującego na geopolimerizację

Promieniowanie jonizujące może oddziaływać z materiałami geopolimerowymi pośrednio i bezpośrednio. W materiałach porowatych istotną rolę może odgrywać radioliza wody porowej, prowadząca do powstawania rodników, nadtlenu wodoru, wodoru cząsteczkowego oraz innych produktów radiolitycznych. Znaczenie tego mechanizmu zależy od zawartości wody, rozkładu porów, stopnia uszczelnienia próbki, atmosfery ekspozycji oraz dawki i mocy dawki [18, 19].

A second potential mechanism involves changes in the gel phase and pore structure. The literature indicates, however, that geopolymers, and alkali-activated materials more generally, often exhibit considerable radiation resistance. In studies of metakaolin-based geopolymer cements exposed to a gamma-radiation dose of 1 MGy, the main effects observed were the loss of part of the free water and an increase in porosity, with only minimal changes in the principal binding phase [8]. In studies of fly-ash-based geopolymers irradiated with a gamma-radiation dose of 400 kGy, the effect on sample porosity was likewise assessed as minimal [20].

More recent studies also suggest that, within certain dose ranges, gamma radiation may on the one hand promote further reorganization, maturation and crosslinking of the matrix, while on the other hand, at very high doses, it may destabilize the microstructure [21]. From the perspective of simple macroscopic observations, this means that possible changes may not be visually apparent, particularly when the doses are low or the interaction primarily affects the near-surface layer of the sample. In considering the relationships between ionizing radiation and geopolymerization, two research directions are distinguished in the international literature: (1) the effect of radiation on the geopolymerization process and on the structure of an already formed geopolymer; and (2) the use of geopolymers as radiation-shielding materials or for the immobilization of radioactive waste. While the second direction is currently being developed very actively, the first is not. Accordingly, the effects of α , β and γ radiation and neutrons on geopolymer bonds (Si-O-Al), the degree of geopolymerization and the structure of N-A-S-H or C-(A)-S-H gel are presented below, with the respective types of interaction considered separately.

Gamma radiation. Geddes et al. [8] investigated structural and chemical changes in metakaolin-based geopolymers designed with different water contents and exposed to a total accumulated gamma-radiation dose of 1 MGy. A substantial loss of free water associated with irradiation was demonstrated, leading to increased porosity. Analysis of the chemical structure showed minimal changes in the gel phase, indicating high microstructural stability. With increasing porosity and water content, more gel water was removed as a result of radiation exposure. However, the extent of water removal from the gel structure was very small. No breakdown of the aluminosilicate network was found, the Si-O-Al bonds remained stable, and the geopolymers exhibited very high radiation resistance up to 1 MGy, making them a potential alternative for immobilizing problematic intermediate-level waste or for radioactive-waste disposal.

Rubinjon et al. [22] investigated the effect of gamma radiation on the setting time of geopolymer paste. Coal fly ash (FA), ground granulated blast-furnace slag (BFS), and a 1:1 mixture by mass of the two (MIX) were used and activated with water glass having a modulus of 1.5. The fresh paste was placed in moulds and exposed to Co-60 gamma radiation at a dose rate of 9.62–9.53 Gy/h until final setting. Initial and final setting times were determined by measuring Vicat-needle penetration at regular time intervals. The initial setting time was 1 h 3 min for BFS, 1 h 55 min for

Drugim potencjalnym mechanizmem są zmiany w fazie żelowej i w strukturze porów. Literatura wskazuje jednak, że geopolimery i szerzej aktywowane materiały alkalicznie często wykazują znaczną odporność radiacyjną. W badaniach metakaolinowych cementów geopolimerowych po dawce promieniowania gamma 1 MGy obserwowano przede wszystkim utratę części wody swobodnej i zwiększenie porowatości, przy minimalnych zmianach zasadniczej fazy wiążącej [8]. W badaniach popiołowych geopolimerów napromieniowanych promieniowaniem gamma dawką 400 kGy wpływ na porowatość próbek również oceniono jako minimalny [20].

Nowsze prace sugerują ponadto, że przy pewnych zakresach dawki promieniowania gamma może prowadzić z jednej strony do dalszej reorganizacji, dojrzewania i sieciowania matrycy, a z drugiej (przy bardzo dużych dawkach) do destabilizacji mikrostruktury [21]. Z punktu widzenia prostych obserwacji makroskopowych oznacza to, że ewentualne zmiany mogą nie ujawniać się wizualnie, szczególnie gdy dawki są niewielkie lub oddziaływanie dotyczy przede wszystkim przypowierzchniowej warstwy próbki. Rozpoznając zależności pomiędzy promieniowaniem jonizującym a geopolimeryzacją, w literaturze światowej rozróżnia się dwa kierunki badań: 1) wpływ promieniowania na proces geopolimeryzacji i strukturę już utworzonego geopolimeru; 2) wykorzystanie geopolimerów jako materiałów osłonowych przed promieniowaniem lub do immobilizacji odpadów promieniotwórczych. O ile drugi z nich jest obecnie bardzo aktywnie rozwijany, to pierwszy wręcz przeciwnie. W związku z tym przedstawie wpływ promieniowania α , β , γ oraz neutronów na wiązania geopolimerowe (Si-O-Al), stopień geopolimeryzacji i strukturę żelu N-A-S-H lub C-(A)-S-H z podziałem na poszczególne oddziaływania.

Promieniowanie gamma. Geddes i in. [8], badali zmiany strukturalne i chemiczne geopolimerów na bazie metakaolinu, zaprojektowanych z różną zawartością wody i wystawionych na łączną skumulowaną dawkę 1 MGy promieniowania gamma. Wykazano znaczną utratę wolnej wody, związaną z procesem napromieniowania, co doprowadziło do zwiększenia porowatości. Analiza struktury chemicznej wykazała minimalne zmiany w fazie żelowej, co świadczy o wysokiej stabilności mikrostrukturalnej. Wraz ze zwiększeniem porowatości i zawartości wody, więcej wody żelowej było usuwane w wyniku ekspozycji na promieniowanie. Stopień usunięcia wody ze struktury żelu był jednak bardzo niewielki. Nie stwierdzono rozpadu sieci glinokrzemianowej, wiązania Si-O-Al pozostały stabilne, geopolimery wykazały bardzo dużą odporność radiacyjną do 1 MGy, co stanowi potencjalnie alternatywę dla immobilizacji problematycznych odpadów średnio aktywnych lub do składowania odpadów radioaktywnych.

Rubinjon et al. [22] zbadali wpływ promieniowania gamma na czas wiązania zaczynu geopolimerowego. Zastosowano popiół lotny węglowy (FA), mielony granulowany żużel wielkopiecowy (BFS) oraz ich mieszanek (1:1 pod względem masy) MIX i zaktivowano szkłem wodnym o module 1,5. Świeży zaczyn umieszczono w formach i poddano działaniu promieniowania gamma Co-60, z mocą dawki 9,62–9,53 Gy/h, aż do ostatecznego wiązania. Początkowy i ostateczny czas wiązania określono, mierząc penetrację igły Vicata w regularnych

MIX and 3 h 28 min for FA, while the final setting time was 1 h 10 min for BFS, 2 h 13 min for MIX and 4 h 1 min for FA. The resulting doses were 8.02 Gy for BFS, 17.54 Gy for MIX and 34.14 Gy for FA. Irradiation with Co-60 gamma rays during setting, at dose rates of approximately 9–10 Gy/h, did not delay setting.

Leay et al. [20] also studied geopolymers intended for the immobilization of radioactive waste, but these were fly-ash-based rather than metakaolin-based materials. They concluded that there were practically no changes in porosity, the effects of water radiolysis were small, and the geopolymer framework was not damaged. Mukiza et al. [5] investigated the effect of gamma radiation on geopolymerization kinetics and early microstructure development in metakaolin-based geopolymers containing simulated Cs and Sr radioactive waste. The results demonstrated the potential of metakaolin-based geopolymers as a low-cost alternative to vitrification for immobilizing waste containing Cs-137 and Sr-90. The authors showed that heat induced by gamma radiation primarily affects the early reaction kinetics without changing the overall degree of reaction after 28 days. No effect of dose rate was observed, whereas a significant difference was found between gamma-radiation sources. Co-60 irradiation did not interfere with the geopolymerization process, whereas exposure to Cs-137 adversely affected geopolymerization and the subsequent formation of N-A-S-H gel. The gel exhibited radiation stability, indicating that gamma ionizing radiation emitted during decay did not affect the immobilization and retention of Cs and Sr radioisotopes.

Alpha radiation. There are no published studies in which geopolymer samples have been irradiated with α particles because their range in solids is on the order of tens of micrometres, and therefore they practically do not penetrate the bulk of the material. There are, however, numerous studies concerning the immobilization of α emitters (e.g. actinides) in geopolymers, but not the effect of α radiation on the material [14].

Beta radiation. There are even fewer publications in this case. Beta radiation appears mainly in the context of the immobilization of β -emitting isotopes, radiation shielding and energy-transport modelling.

The interaction of neutrons with geopolymers must be considered differently from the interaction of alpha, beta and gamma radiation. Neutrons can be scattered, moderated and absorbed by the atomic nuclei of the matrix constituents and pore water. In hydrogen-containing materials, the water content is important because hydrogen effectively slows down neutrons. In the literature, geopolymers are considered, among other applications, as materials for radioactive-waste immobilization and as potential components of radiation shields, including neutron-absorption systems [19, 23, 24].

Studies have examined the neutron attenuation coefficient, neutron removal cross-section and shielding effectiveness, but not chemical changes in the geopolymer [10, 25, 26]. These studies show that geopolymers attenuate neutrons effectively when magnetite, boron or other fillers are added. Changes in Si-O-Al bonds after long-term neutron irradiation have not, however, been investigated.

odstępach czasu. Początkowy czas wiązania wynosił 1 h 3 min w przypadku BFS, 1 h 55 min w przypadku MIX i 3 h 28 min w przypadku FA, a końcowy 1 h 10 min w przypadku BFS, 2 h 13 min w przypadku MIX i 4 h 1 min w przypadku FA. Otrzymane dawki to 8,02 Gy w przypadku BFS, 17,54 Gy w przypadku MIX i 34,14 Gy w przypadku FA. Napromieniowanie promieniami gamma Co-60 podczas wiązania, przy dawkach rzędu 9–10 Gy/h, nie opóźniało wiązania.

Leay i in. [20] badali również geopolimery przeznaczone do immobilizacji odpadów radioaktywnych, ale nie metakaolinowe, lecz popiołowe. Wywnioskowali, że praktycznie nie było zmian porowatości, efekty radiolizy wody były niewielkie, a szkielet geopolimerowy nie uległ zniszczeniu. Mukiza i in. [5] badali wpływ promieniowania gamma na kinetykę geopolimeryzacji i wczesny rozwój mikrostruktury w geopolimerach na bazie metakaolinu, zawierających symulowane odpady radioaktywne Cs i Sr. Wyniki pokazały potencjał geopolimerów na bazie metakaolinu jako niedrogiej alternatywy dla wtrzyfikacji w procesie immobilizacji odpadów zawierających Cs-137 i Sr-90. Autorzy dowiedli, że ciepło indukowane promieniowaniem gamma wpływa przede wszystkim na wczesną kinetykę reakcji, nie zmieniając całkowitego 28-dniowego stopnia przereagowania. Nie zaobserwowano wpływu mocy dawki, podczas gdy istnieje istotna różnica między źródłami promieniowania gamma. Napromieniowanie Co-60 nie zakłóca procesu geopolimeryzacji, ale ekspozycja na Cs-137 negatywnie wpływa na geopolimeryzację i późniejsze tworzenie żelu N-A-S-H. Żel ten wykazał stabilność radiacyjną, co oznacza, że promieniowanie jonizujące gamma, emitowane podczas rozpadu, nie ma wpływu na unieruchomienie i zatrzymanie radioizotopów Cs i Sr.

Promieniowanie alfa. Nie ma opublikowanych badań, w których próbki geopolimerów napromieniowano cząstkami α , ponieważ mają one w ciałach stałych zasięg rzędu dziesiątek mikrometrów, a więc praktycznie nie penetrują objętości materiału. Istnieją natomiast liczne prace dotyczące immobilizacji emiterów α (np. aktynowców) w geopolimerach, ale nie wpływu promieniowania α na materiał [14].

Promieniowanie beta. W tym przypadku jest jeszcze mniej publikacji. Promieniowanie β pojawia się przede wszystkim w kontekście immobilizacji izotopów β -promieniotwórczych, osłon radiacyjnych, modelowania transportu energii.

Oddziaływanie neutronów z geopolimerami należy rozpatrywać inaczej niż oddziaływanie promieniowania alfa, beta i gamma. Neutrony mogą być rozpraszane, moderowane oraz absorbowane przez jądra atomowe składników matrycy i wody porowej. W materiałach zawierających wodór istotne znaczenie ma zawartość wody, ponieważ wodór efektywnie spowalnia neutrony. W literaturze geopolimery rozważane są m.in., jako materiały do immobilizacji odpadów promieniotwórczych oraz jako potencjalne komponenty osłon radiacyjnych, w tym układów pochłaniania neutronów [19, 23, 24].

Badano: współczynnik osłabienia neutronów, przekrój ich usuwania, skuteczność ekranowania, ale nie zmiany chemiczne geopolimeru [10, 25, 26]. Badania te pokazują, że geopolimery dobrze tłumią neutrony po dodaniu magnetytu, boru lub innych wypełniaczy. Nie analizowano natomiast zmian wiązań Si-O-Al po długotrwałym napromienianiu neutronami.

Experimental study

A stiff-plastic geopolymer mortar mix was subjected to irradiation two weeks after mixing. During this period, the material matured under ambient conditions in a polystyrene mould (Photo 1), but had not yet hardened. It was readily formable, like clay, and flowed under vibration. However, it was not as fluid as on the day of preparation. The mortar was made from siliceous fly ash (450 g), standard sand (1350 g) and a post-process alkaline NaOH solution with a sodium concentration of 14.5%. This solution gave the mortar a darker colour. Five samples measuring $40 \times 40 \times 40$ mm were prepared. One sample served as the reference and hardened in air, while the remaining samples were exposed to alpha, beta and gamma radiation and to neutrons, respectively.

Photo 2 shows the experimental setups used in the study: Photo 2a – measurement of the gamma-radiation dose rate of the sample after neutron exposure using a Colibri radiometer with an STTC probe; Photo 2b – the neutron-exposure setup, with the sample located in a paraffin block above the Pu-Be source; Photos 2c and 2d – the gamma-exposure setup (two views). For alpha and beta exposure, an analogous geometrical arrangement of the sample and source was used. The observation and irradiation exposure period lasted 108 days (Table).

The literature describes the possibility of accelerating geopolymer curing by microwave exposure, which primarily affects volumetric heating and reaction kinetics. It was therefore reasonable to examine whether, under the exposure conditions used in this study, ionizing radiation or neutron exposure could produce macroscopic changes in the hardening process. Four types of exposure were applied: contact/surface exposure to alpha radiation from a Pu-239 surface source; near-surface exposure to beta radiation from an Sr-90/Y-90 source; photon exposure to gamma radiation from a Co-60 source; and neutron exposure using two Pu-Be sources. The beta and gamma sources were discs placed on the surfaces of the samples. The alpha sample rested on the Pu-239 surface source, whereas the neutron sample was positioned 150 mm above the Pu-Be sources on a 15 mm-thick paraffin layer. Detailed physical data for the sources were treated as supplementary information. It was assumed that alpha radiation acts at the surface, beta radiation mainly in the near-surface region, gamma radiation more throughout the sample volume, and that the Pu-Be field is mixed, comprising fast neutrons, neutrons partially moderated by the paraffin, and a gamma component [27–32].

Badania

Badaniu jonizującemu poddano gęstoplastyczną masę zaprawy geopolimerowej po dwóch tygodniach od zarobienia. W tym czasie masa dojrzewała w warunkach pokojowych w formie styropianowej (fotografia 1), ale nie została utwardzona. Była łatwo formowalna, jak glina i rozplýwała się wskutek wibracji. Nie była jednak tak lejna, jak w dniu wytworzenia. Zaprawę wykonano z krzemionkowego popiołu lotnego (450 gramów), piasku normowego (1350 gramów) i cieczy alkalicznej poprocesowej NaOH, o stężeniu sodu 14,5%. Ciecz ta nadawała zaprawie ciemniejsze zabarwienie. Przygotowano pięć próbek o wymiarach $40 \times 40 \times 40$ mm. Jedna próbka pełniła rolę referencyjnej i twardniała w powietrzu, a pozostałe były eksponowane odpowiednio na promieniowanie alfa, beta, gamma oraz neutrony.

Na fotografii 2 przedstawiono stanowiska badawcze wykorzystane w eksperymencie: fotografia 2a – pomiar mocy dawki promieniowania gamma próbki po ekspozycji neutronowej z użyciem radiometru Colibri z sondą STTC; fotografia 2b – stanowisko do ekspozycji neutronowej próbki w bloku parafinowym ponad źródłem Pu-Be; fotografiach 2c i 2d – stanowisko do ekspozycji gamma (dwa ujęcia). W przypadku ekspozycji alfa i beta stosowano analogiczny układ geometryczny próbki i źródła. Okres prowadzenia obserwacji i ekspozycji jonizującej trwał 108 dni (tabela).

W literaturze opisano możliwość przyspieszania dojrzewania geopolimerów z wykorzystaniem oddziaływań mikrofalowych, które wpływają przede wszystkim na nagrzewanie objętościowe i kinetykę reakcji. Z tego względu zasadne było sprawdzenie, czy w zastosowanych warunkach ekspozycja na promieniowanie jonizujące lub neutrony może prowadzić do zmian makroskopowych w procesie twardnienia. Zastosowano cztery typy ekspozycji: kontaktową na promieniowanie alfa ze źródła powierzchniowego Pu-239; przypowierzchniową na promieniowanie beta ze źródła Sr-90/Y-90; fotonową na promieniowanie gamma ze źródła Co-60 oraz neutronową z wykorzystaniem dwóch źródeł Pu-Be. Źródła beta i gamma miały postać dysków ułożonych na powierzchni próbek. Próbkę alfa leżała na źródle powierzchniowym Pu-239, a próbka neutronowa znajdowała się 150 mm powyżej źródeł Pu-Be, na warstwie parafiny o grubości 15 mm. Szczegółowe dane fizyczne źródeł traktowano jako informacje pomocnicze. Przyjęto, że promieniowanie alfa oddziałuje powierzchniowo, beta głównie przypowierzchniowo, gamma bardziej ob-



Photo 1. Geopolymer mortar before exposure, 2 weeks after preparation

Fot. 1. Zaprawa geopolimerowa przed ekspozycją, po dwóch tygodniach od wykonania

Photo: authors

Fot. autorzy

The most direct measurable effect of neutron exposure was a small increase in the gamma radiometer reading. Before neutron exposure, the sample was measured for 15 minutes using a Colibri radiometer with an external STTC probe. The mean reading was $0.09 \mu\text{Sv/h}$, corresponding to the level of natural background radiation measured in this setup. After exposure, using the



Photo 2. Research stations used in the experiment, description in the text *Photo: authors*
Fot. 2. Stanowiska badawcze wykorzystane w eksperymencie, opis w tekście *Fot.: autorzy*

jętościowo, a pole Pu-Be ma charakter mieszany, obejmujący neutrony prędkie, neutrony częściowo moderowane przez parafinę oraz składową gamma [27–32].

Najbardziej bezpośrednim mierzalnym efektem ekspozycji neutronowej był niewielki wzrost wskazań radiometru gamma. Przed ekspozycją neutronową wykonano 15-minutowy pomiar próbki radiometrem Colibri

Conditions and observations of irradiation of geopolymer mortars

Warunki i obserwacje napromienienia zapraw geopolimerowych

Sample/ Próbka	Conditions/ Warunki	Source/type of radiation/ Źródło/rodzaj promieniowania	Observation/ exposure time [days]/ Czas obserwacji/ ekspozycji [dni]	Observations/ Obserwacje
R	reference; ambient conditions/ referencyjna; warunki pokojowe	no exposure/ brak ekspozycji	108	hardened after approx. two weeks; no visual changes/ stwardnienie po ok. dwóch tygodniach; brak zmian wizualnych.
A	contact/surface exposure/ ekspozycja kontaktowa/ powierzchniowa	alfa, Pu-239	108	no detectable differences relative to the reference sample/ brak uchwytynych różnic względem próbki referencyjnej.
B	near-surface exposure/ ekspozycja przypowierzchniowa	beta, Sr-90/Y-90	108	no detectable differences relative to the reference sample/ brak uchwytynych różnic względem próbki referencyjnej.
G	photon exposure/ ekspozycja fotonowa	gamma, Co-60	108	no detectable differences relative to the reference sample/ brak uchwytynych różnic względem próbki referencyjnej.
N	neutron exposure/ ekspozycja neutronowa	neutrons, two Pu-Be sources/ neutrony, dwa źródła Pu-Be	108	no visual differences; gamma radiometer readings approx. 22% above background after Pu-Be exposure./ brak różnic wizualnych; wskazania radiometru gamma ok. 22% powyżej tła po ekspozycji Pu-Be.

same measurement geometry, the mean reading was $0.1098 \mu\text{Sv/h}$, i.e. $0.11 \mu\text{Sv/h}$ when rounded to the resolution of the instrument. The relative increase in the reading was therefore approximately 22% compared with the background level. This result should be regarded as an indication of slight neutron activation rather than as an identification of activation products. Because of the shape of the sample, no spectrometric measurement was performed in a geometry that would allow reliable determination of the radionuclide composition. It is therefore not possible to determine whether the observed increase in the reading was due mainly to constituents of the geopolymer binder, the standard-sand aggregate, or trace elements present in the mortar constituents. For this reason, further studies should include gamma spectrometry after neutron exposure and a comparison of mortars prepared with different types of aggregate.

z zewnętrzną sondą STTC. Średni wynik wyniósł $0,09 \mu\text{Sv/h}$, co odpowiadało zmierzonemu w tym układzie poziomowi naturalnego promieniowania tła. Po ekspozycji, w identycznym układzie pomiarowym, średni wynik wyniósł $0,1098 \mu\text{Sv/h}$, czyli $0,11 \mu\text{Sv/h}$ po zaokrągleniu do dokładności wskazań przyrządu. Względny wzrost wskazań wyniósł zatem ok. 22% względem tła. Wynik ten należy traktować jako sygnał niewielkiej aktywacji neutronowej, a nie jako identyfikację produktów aktywacji. Ze względu na kształt próbki nie wykonano pomiaru spektrometrycznego w geometrii pozwalającej na wiarygodne określenie składu radionuklidowego. Nie można więc rozstrzygnąć, czy za obserwowany wzrost wskazań odpowiadały głównie składniki spoiwa geopolimerowego, kruszywo w postaci piasku normowego, czy pierwiastki śladowe obecne w składnikach zaprawy. Z tego względu w dalszych

Analysis of the results showed that:

- the reference sample hardened in air and reached a macroscopically compact state after approximately two weeks; this process should be attributed to geopolymerization/polycondensation and the loss of free water, rather than to drying alone;
- for samples exposed to alpha, beta and gamma radiation and neutrons for 108 days, no visible differences in the course of hardening were observed compared with the reference sample;
- no macroscopic differences were observed in the structure, colour, cracking or surface condition of the samples after exposure;
- the sample exposed to neutrons from Pu-Be sources showed a small increase in the gamma radiometer reading from 0.09 $\mu\text{Sv/h}$ before exposure to 0.1098 $\mu\text{Sv/h}$ after exposure, corresponding to an increase of approximately 22% relative to the background level. Because no reliable spectrometric measurement was performed in an appropriate geometry, the radionuclide composition of the activation products was not determined; the result should therefore be treated as an indication of activation rather than as a complete radiochemical identification;
- the total observation/exposure period was 108 days (from 20 January 2026 to 8 May 2026);
- the results should be expressed as showing no macroscopically observable effect of radiation under the applied conditions, rather than as evidence of a complete absence of radiation effects on the microstructure or mechanical properties of geopolymers.

Summary

Under the exposure conditions used in this study, encompassing 108 days of observation, no macroscopically observable effect of alpha, beta or gamma radiation, or of neutrons from Pu-Be sources, was found on the hardening process or appearance of the $40 \times 40 \times 40$ mm geopolymer samples. This result is consistent with literature reports indicating the high radiation resistance of geopolymers and alkali-activated materials, particularly of the principal aluminosilicate phase.

The absence of visual differences does not exclude changes in the microstructure, bound-water content or mechanical properties. In the sample exposed to the Pu-Be neutron field, a small increase in the gamma radiometer reading from 0.09 to 0.1098 $\mu\text{Sv/h}$ was observed, corresponding to approximately 22% relative to the background level. This result indicates the possibility of slight neutron activation; however, without spectrometric measurements performed in an appropriate geometry, the activation products cannot be identified.

The hardening of geopolymers should not be interpreted solely as drying of the sample. According to the literature, formation of the geopolymer matrix involves dissolution of aluminosilicate constituents in an alkaline environment, formation of reactive silicate and aluminate species, gelation and polycondensation leading to the formation of a three-dimensional aluminosilicate network. The loss of free water affects the macroscopic stiffness and mass of the sample, but is not the

badaniach zasadne jest wykonanie spektrometrii gamma po ekspozycji neutronowej oraz porównanie zapraw przygotowanych z różnymi rodzajami kruszywa.

Analizując otrzymane wyniki, stwierdzono, że:

- próbka referencyjna twardniała w powietrzu i osiągnęła stan makroskopowo zwarty po ok. dwóch tygodniach; proces ten należy wiązać z geopolimeryzacją/polikondensacją oraz utratą wody swobodnej, a nie wyłącznie z wysychaniem;
- w przypadku próbek ekspozycyjnych na promieniowanie alfa, beta, gamma i neutrony przez 108 dni nie stwierdzono widocznych różnic w przebiegu twardnienia w porównaniu z próbką referencyjną;
- nie zaobserwowano makroskopowych różnic w strukturze, barwie, spękaniach ani stanie powierzchni próbek po ekspozycji;
- próbka ekspozycyjna na neutrony ze źródeł Pu-Be wykazała niewielki wzrost wskazań radiometru gamma z 0,09 $\mu\text{Sv/h}$ przed ekspozycją do 0,1098 $\mu\text{Sv/h}$ po ekspozycji, co odpowiada ok. 22% względem tła. Ze względu na brak wiarygodnego pomiaru spektrometrycznego w odpowiedniej geometrii nie ustalono składu radionuklidowego produktów aktywacji; wynik należy traktować jako sygnał aktywacji, a nie pełną identyfikację radiochemiczną.
- całkowity czas obserwacji/ekspozycji wynosił 108 dni (od 20 stycznia 2026 r. do 8 maja 2026 r.)
- wyniki powinny być formułowane jako brak makroskopowo obserwowalnego wpływu promieniowania w zastosowanych warunkach, a nie jako dowód całkowitego braku wpływu promieniowania na mikrostrukturę lub właściwości mechaniczne geopolimerów.

Podsumowanie

W zastosowanych warunkach ekspozycji, obejmujących 108 dni obserwacji, nie stwierdzono makroskopowo obserwowalnego wpływu promieniowania alfa, beta, gamma ani neutronów ze źródeł Pu-Be na przebieg twardnienia i wygląd próbek geopolimerowych o wymiarach $40 \times 40 \times 40$ mm. Wynik ten jest spójny z doniesieniami literaturowymi, wskazującymi na dużą odporność geopolimerów i materiałów alkalicznie aktywowanych na działanie promieniowania jonizującego, szczególnie zasadniczej fazy glinokrzemianowej. Brak różnic wizualnych nie wyklucza zmian: mikrostrukturalnych; zawartości wody związanej oraz właściwości mechanicznych. W przypadku próbki ekspozycyjnej na pole neutronowe Pu-Be zaobserwowano niewielki wzrost wskazań radiometru gamma z 0,09 do 0,1098 $\mu\text{Sv/h}$, czyli o ok. 22% względem tła. Wynik ten wskazuje na możliwość słabej aktywacji neutronowej, lecz bez badań spektrometrycznych, wykonanych w odpowiedniej geometrii, nie pozwala na identyfikację produktów aktywacji.

Twardnienie geopolimerów nie powinno być interpretowane wyłącznie jako wysychanie próbek. W literaturze proces formowania matrycy geopolimerowej obejmuje rozpuszczanie składników glinokrzemianowych w środowisku alkalicznym, powstawanie reaktywnych form krzemianowych i glinianowych, żelowanie oraz polikondensację prowadzącą do utworzenia trójwymiarowej sieci glinokrzemianowej. Utrata wody

only mechanism responsible for the development of the material properties [33, 34]. In samples left under ambient air conditions, the hardening observed after approximately two weeks can therefore be regarded as the combined result of progressive geopolymerization and polycondensation, together with the gradual loss of free water.

The results presented are from a pilot study. The planned continuation of the study includes:

- estimating the absorbed dose for alpha, beta and gamma radiation and the neutron fluence, taking into account the geometry of the sources, shielding and paraffin;
- performing gamma spectrometric measurements of the neutron-exposed sample immediately after exposure and after a cooling period, preferably including an activity-decay curve;
- recording sample mass as a function of time in order to separate the effect of water loss during setting, together with microstructural observations using SEM/EDS, XRD, FT-IR and TGA/DSC methods;
- measuring compressive strength after completion of the exposure;
- introducing at least several replicate samples in each group in order to distinguish the effect of radiation from the natural variability of the geopolymerization process;
- examining mechanisms that may degrade the developing microstructure, particularly the behaviour of quartz under neutron irradiation;
- preparing mortars with specially selected aggregates and additionally exposing them to high temperature.

The rationale for this research lies in the potential use of geopolymers as protective, repair or sealing materials in nuclear facilities. Further studies should focus on simulating conditions more closely resembling potential accident scenarios.

swobodnej wpływa na makroskopową sztywność i masę próbek, ale nie jest jedynym mechanizmem odpowiedzialnym za rozwój właściwości materiału [33, 34]. W przypadku próbek pozostawionych w warunkach powietrznych można zatem uznać, że obserwowane utwardzenie po ok. dwóch tygodniach było wynikiem nakładania się postępującej geopolimeryzacji i polikondensacji (stopniowej utraty wody swobodnej).

Przedstawione wyniki mają charakter badań pilotażowych. Planowane jest uzupełnienie badań o:

- oszacowanie dawki pochłoniętej w przypadku promieniowania alfa, beta i gamma oraz fluencji neutronów z uwzględnieniem geometrii źródeł, osłon i parafiny;
- pomiar spektrometryczny próbek neutronowej bezpośrednio po ekspozycji i po czasie schładzania, najlepiej z krzywą zaniku aktywności;
- rejestrację masy próbek w funkcji czasu w celu oddzielenia efektu utraty wody w wyniku wiązania, wraz z obserwacją mikrostruktury, wykorzystując metody SEM/EDS, XRD, FT-IR oraz TGA/DSC;
- pomiar wytrzymałości na ściskanie po zakończeniu ekspozycji;
- wprowadzenie co najmniej kilku powtórzeń próbek w każdej grupie, aby odróżnić efekt promieniowania od naturalnej zmienności procesu geopolimeryzacji;
- sprawdzenie mechanizmów degradujących tworzącą się mikrostrukturę, a przede wszystkim zachowanie kwarcu pod wpływem neutronów;
- przygotowanie zapraw z dedykowanym kruszywem i podanie ich dodatkowo wpływowi wysokiej temperatury.

Celowość zaprezentowanych badań wynika z możliwości zastosowania geopolimerów jako materiałów ochronnych, naprawczych lub doszczelniających w obiektach jądrowych. Dalsze badania powinny skoncentrować się na symulowaniu warunków bardziej zbliżonych do potencjalnych scenariuszy awaryjnych.

Received: 13.07.2026

Revised: 12.08.2026

Published: 23.09.2026

Artykuł wpłynął do redakcji: 13.07.2026 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 12.08.2026 r.

Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

- [1] Singh NB, Middendorf B. „Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview”, *Construction and Building Materials*, vol. 237, Art. no. 117455, 2020, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117455.
- [2] Manzoor T, Bhat JA, Shah AH. “Performance of geopolymer concrete at elevated temperature – A critical review”, *Construction and Building Materials*, vol. 420, 2024, 135578, ISSN 0950–0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135578>.
- [3] Zhang HY, Qiu GH, Kodur V, Yuan ZS. “Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 106, 2020, 103483, ISSN 0958–9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103483>.
- [4] ISO, ISO 19338:2025 Performance Requirements for Standards on Concrete Structures, 4th ed. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2025.
- [5] Mukiza E, Phung QT, Seetharam S, Frederickx L, Verguts K, Weetjens E, Yu Z, de Oliveira-Silva R, Sakellariou D, De Schutter G. “Effect of gamma

radiation on geopolymerization and microstructure development of metakaolin-based geopolymer for cesium and strontium waste immobilization”, *Journal of Nuclear Materials*, vol. 620, Art. no. 156325, 2026, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2025.156325.

[6] Graytea A, Sanjayan JG, Nazari A. “Development of a high-strength fly ash-based geopolymer in short time by using microwave curing”, *Ceramics International*, vol. 44, no. 7, pp. 8216–8222, 2018.

[7] Głuszewski W. “Radiacyjna obróbka polimerów – światowe osiągnięcia ICHTJ”, *Postępy Techniki Jądrowej*, vol. 68, no. 3, pp. 57–62, 2025.

[8] Geddes DA, Walkley B, Galliard CL, Hayes M, Bernal SA, Provis JL. „Effect of exposure of metakaolin-based geopolymer cements to gamma radiation”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 107, pp. 4621–4630, 2024, DOI: 10.1111/jace.19747.

[9] Kwon S, Lee Y, Oh Y. *et al.*, “Combined effects of alkaline groundwater and gamma irradiation on the durability of geopolymer waste forms”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2026, DOI: 10.1007/s11814–025–00638–3.

- [10] Öz A, Bayrak B, Kavaz E, Kaplan G, Çelebi O, Alcan HG, Aydın AC. "The radiation shielding and microstructure properties of quartzic and metakolin based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 342, pt. B, Art. no. 127923, 2022, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127923.
- [11] Ouda AS. "A preliminary investigation on gamma-ray attenuation of alkali-activated concrete waste based-geopolymer modified with pozzocrete-fly ash," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 134, Art. no. 103681, 2021, DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103681.
- [12] Bui TK, Dat TT, Huy LG, Minh DQ. "Material and processing design strategies for enhancing gamma-radiation shielding of geopolymer concrete as an emerging shielding material: A review," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 246, Art. no. 113937, 2026, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2026.113937.
- [13] Ashraf W, Khan M, Yusan S, Qasim M, Jie N. "Geopolymers as emerging materials for immobilization of toxic radionuclides," *Nuclear Technology*, vol. 212, no. 2, pp. 383–394, 2026, DOI: 10.1080/00295450.2025.2464426.
- [14] Liu J, Xu Y, Zhang W, Ye J, Wang R. "Solidification performance and mechanism of typical radioactive nuclear waste by geopolymers and geopolymer ceramics: A review," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 169, Art. no. 105106, 2024, DOI: 10.1016/j.pnucene.2024.105106.
- [15] Reches Y. "A multi-scale review of the effects of gamma radiation on concrete," *Results in Materials*, vol. 2, Art. no. 100039, 2019, DOI: 10.1016/j.rinma.2019.100039.
- [16] Słomka-Słupik B, Bury T. "Dekalkyfikacja betonu zagrożeniem zniszczenia wybranych obiektów elektrowni jądrowych," *Ochrona przed Korozją*, vol. 60, no. 5, pp. 157–161, 2017, DOI: 10.15199/40.2017.5.6.
- [17] Wikipedia: Wolna encyklopedia, „Promieniowanie jądrowe” [Online]. Dostępne: https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_j%C4%85drowe. [Dostęp: 8 lipca 2026].
- [18] Chupin F, Dannoux-Papin A, Ngono-Ravache Y, d'Espinose de Lacaillerie JB. "Water content and porosity effect on hydrogen radiolytic yields of geopolymers," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 494, pp. 138–146, 2017, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.07.034.
- [19] Cantarel V, Motooka T, Yamagishi I. *Geopolymers and Their Potential Applications in the Nuclear Waste Management Field – A Bibliographical Study*, JAEA-Review 2017–014. Ibaraki, Japan: Japan Atomic Energy Agency, 2017.
- [20] Leay L, Potts A, Donocli T. "Geopolymers from fly ash and their gamma irradiation," *Materials Letters*, vol. 227, pp. 240–242, 2018, DOI: 10.1016/j.matlet.2018.05.088.
- [21] Yeoh MLY, Ukritnukun S, Rawal A, Davies JB, Kang BJ, Burrough K, Aly Z, Dayal P, Vance ER, Gregg DJ, Koshy P, Sorrell CC. "Mechanistic impacts of long-term gamma irradiation on physicochemical, structural, and mechanical stabilities of radiation-responsive geopolymer pastes," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 407, Art. no. 124805, 2021, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124805.
- [22] Rubinjoni L, Stanković S, Janićijević A. "Setting time of alkali-activated binders exposed to Co-60 gamma radiation," *Minerals*, vol. 15, Art. no. 25, 2025, DOI: 10.3390/min15010025.
- [23] Mast B, Clavier K, Schreurs S. "The use of alkali activated materials in nuclear industry," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2020, DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11629-7.
- [24] Alomayrah N *et al.*, "Gamma and neutron attenuation of ASM geopolymers for radiation shielding applications: Theoretical study," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 17, Issue 2, Art. no. 100876, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687850724000608>.
- [25] Gashti MF, Mousavinejad SHG, Khaleghi SJ. "Evaluation of gamma and neutron radiation shielding properties of the GGBFS based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 367, Art. no. 130308, 2023, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130308.
- [26] Mortazavi SMJ, Mosleh-Shirazi MA, Roshan-Shomal P, Raadpey N, Baradaran-Ghahfarokhi M. "High-performance heavy concrete as a multi-purpose shield," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 142, no. 2–4, pp. 120–124, 2010, DOI: 10.1093/rpd/ncq265.
- [27] National Isotope Development Center, *Plutonium-239 Product Information*. [Online]. Available: <https://isotopes.gov/sites/default/files/2023-07/Pu-239.pdf>. [Accessed: Jul. 8, 2026].
- [28] Eckert & Ziegler, *Reference and Calibration Standards – Beta Particle Standards*. [Online]. Available: https://www.ezag.com/wp-content/uploads/2023/08/Beta_Particle_Standards_BF-Type.pdf. [Accessed: Jul. 8, 2026].
- [29] National Institute of Standards and Technology (NIST), *Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions: ESTAR, PSTAR and ASTAR*, Standard Reference Database 124. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>. [Accessed: Jul. 8, 2026].
- [30] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), *Properties of Co-60 Radiation*. [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt6/fb-62/ag-621/gamma-irradiation-facility/properties-of-co-60-radiation.html>. [Accessed: Jul. 8, 2026].
- [31] U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Basic Health Physics – Neutron Sources, H-122: Neutron Sources*. NRC Technical Training Center, 2010. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11229A704.pdf>. [Accessed: Jul. 8, 2026].
- [32] Anderson ME, Neff RA. "Neutron energy spectra of different size ²³⁹Pu-Be (α , n) sources," *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 99, pp. 231–235, 1972, DOI: 10.1016/0029-554X(72)90781-1.
- [33] Hajdu D, Dian E, Gmeling K, Klinkby E, Cooper-Jensen CP, Osan J, Zagvyai P. "Experimental study of concrete activation compared to MCNP simulations for safety of neutron sources," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 171, Art. no. 109653, 2021, DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.109653.
- [34] Siyal AA, Radin Mohamed RMS, Shamsuddin R, Ridzuan MB. "A comprehensive review of synthesis kinetics and formation mechanism of geopolymers," *RSC Advances*, vol. 14, pp. 446–462, 2024, DOI: 10.1039/D3RA06205H.