

PROMIENIOTWÓRCZOŚĆ NATURALNA BETONU ZE ZMIENNYM DODATKIEM MIKROKRZEMIONKI ZAGĘSZCZONEJ (SF) I KRZEMIONKOWYCH POPIOŁÓW LOTNYCH (FA)

Damian Marek Gil✉, Grzegorz Ludwik Golewski

Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, Lublin

STRESZCZENIE

Promieniowanie naturalne towarzyszy ludzkości od początku jej istnienia. Jest ono obecne w powietrzu, wodzie, glebie czy skałach, a także w materiałach budowlanych. Człowiek może być narażony w mniejszym bądź większym stopniu na otaczającą go promieniotwórczość. W pracy przedstawiono wyniki badań promieniotwórczości betonu z różną kompozycją dodatku przykładowego krzemionkowego popiołu lotnego oraz mikrokrzemionki zagęszczonej. Udowodniono, że materiał o podwyższonej aktywności radioaktywnej może być w bezpieczny sposób wykorzystywany do produkcji betonu i dodatkowo spełnia restrykcyjne wymagania polskiego rozporządzenia Rady Ministrów czy dyrektywy 2013/59/Euratom w zakresie ochrony przed promieniowaniem aktywnym.

Słowa kluczowe: promieniotwórczość naturalna, radionuklidy, beton, popiół lotny, zagęszczony pył krzemionkowy, bezpieczeństwo radioaktywne

WSTĘP

Promieniowanie jest nieodłącznym elementem życia na Ziemi, a jego źródłem jest promieniowanie kosmiczne oraz część pierwiastków występujących w: skorupie ziemskiej, skałach, glebie, wodzie, powietrzu, organizmach żywych i pożywieniu. Materiały budowlane pochodzenia mineralnego zawierają w swoim składzie naturalne pierwiastki promieniotwórcze. Promieniotwórczości naturalnej nie da się uniknąć i uznaje się, że promieniowanie to jeden ze sposobów wysyłania, przenoszenia energii w postaci np. światła, ciepła, cząstek materii czy fal elektromagnetycznych. Jednym z rodzajów promieniowania jest promieniowanie jonizujące, które przechodząc przez materię, ulega pochłanianiu lub zostaje rozproszone. Źródłem takiego promieniowania są np. substancje,

które generują promieniowanie alfa, beta, gamma (Kuliczkowski, Pluta i Zwierzchowski, 1993).

Ze względu na to, że materiały budowlane, odpady czy surowce stosowane do produkcji materiałów budowlanych również generują promieniowanie, każda osoba przebywająca w przegrodach budowlanych jest narażona na dawkę skuteczną (efektywną) promieniowania jonizującego w ciągu roku 3,55 mSv (GUS, 2017). W tabeli 1 przedstawiono źródła promieniowania w środowisku pochodzenia naturalnego. Wielkości dawek granicznych obowiązujących w Polsce zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów z 2005 roku w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (Dz.U. 2005 nr 20, poz. 168) wynoszą odpowiednio:

– 20 mSv·rok⁻¹ dla osób narażonych zawodowo oraz praktykantów i studentów (uczniów) w wieku

✉d.gil@pollub.pl

18 lat i powyżej (dawka może być w danym roku kalendarzowym przekroczone do wartości 50 mSv pod warunkiem, że w ciągu kolejnych 5 lat kalendarzowych nie przekroczy 100 mSv);

- 6 mSv·rok⁻¹ dla praktykantów i studentów (uczniów) w wieku 16–18 lat;
- 1 mSv·rok⁻¹ dla osób z ogółu ludności oraz praktykantów i studentów (uczniów) w wieku poniżej 16 lat (dawka może być w danym roku kalendarzowym przekroczone pod warunkiem, że w ciągu kolejnych 5 lat kalendarzowych nie przekroczy 5 mSv).

Materiały budowlane generują promieniowanie, ponieważ są wytwarzane z surowców takich jak: piasek, glina, gips, wapno, które ponadto mogą zawierać dodatki w postaci popiołów lotnych czy żużli wielkopieczowych.

Na podstawie analizy danych z tabeli 1 widać wyraźnie, że człowiek najbardziej narażony jest na promieniowanie występujące wewnątrz budynków. Promieniowanie to wynika przede wszystkim z obecności w konstrukcji budynków materiałów budowlanych za-

stosowanych do jego wykonania. Materiały budowlane generują głównie promieniowanie gamma oraz alfa (⁴⁰K – potas, ²³⁸U – uran, izotopy szeregu uranoworadowego: ²²⁶Ra – rad i ²²²Rn – radon oraz ²³²Th – tor wraz z izotopami, tj. ²²⁸Th), które jest niekorzystne dla człowieka po przekroczeniu określonych granic (Kovler, 2011; Zakrzewski, 2015).

W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów stężeń radionuklidów oraz wartości wskaźnika aktywności wybranych materiałów budowlanych, surowców i odpadów przemysłowych (GUS, 2017).

Zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów z 2007 roku w sprawie zawartości promieniotwórczych izotopów w surowcach i materiałach budowlanych (Dz.U. 2007 nr 4, poz. 29) dopuszczalne dawki promieniowania wynoszą: $f_1 \leq 1,2$; $f_2 \leq 240$ Bq·kg⁻¹. Istotne jest więc, aby generować jak najmniej materiałów promieniotwórczych takich jak popioły lotne. Stwierdzono bowiem, że często odpady tego typu emitują dość wysokie stężenie radionuklidów, tym samym mogą przekraczać dopuszczalny wskaźnik f_1 bądź f_2 . W takiej sytuacji najlepszym

Tabela 1. Wartość średnich rocznych dawek skutecznych otrzymywanych przez jednego mieszkańca Polski z naturalnych i ze sztucznych źródeł promieniowania w 2016 roku (GUS, 2017)

Table 1. Values of average annual values of average annual individual effective doses received by inhabitants of Poland from natural and artificial sources of radiation in 2016 (GUS, 2017)

Źródło radioaktywności – Source of radioactivity	Dawka [mSv·rok ⁻¹] Dose [mS·year ⁻¹]
Promieniowanie na zewnątrz budynków Radiation outside of buildings	0,126
Promieniowanie wewnątrz budynków Radiation inside buildings	1,639
Promieniowanie kosmiczne Cosmic radiation	0,390
Radionuklidy inkorporowane (naturalne: radon, toron) Radionuclides incorporated (natural: radon, toron)	0,277
Pochodzenia sztucznego (związane z elektrowniami jądrowymi i opadami promieniotwórczymi) Artificial origin (associated with nuclear power plants and radioactive fallout)	0,008
Źródło promieniowania stosowane w diagnostyce medycznej The radiation source used in medical diagnosis	1,102
Narażenie zawodowe (np. kopalnie węgla kamiennego) Occupational exposure (e.g. coal mines)	0,002
Przedmioty powszechnego użytku Consumer items	0,001
Razem – In total	3,550

Tabela 2. Stężenia radionuklidów naturalnych i wartości wskaźników aktywności f_1 i f_2 w wybranych surowcach oraz materiałach budowlanych pomierzone w latach 2003–2016 (GUS, 2017)

Table 2. Natural radionuclides concentrations and values of f_1 and f_2 activity indices in selected raw materials and construction products in 2003–2016 (GUS, 2017)

Rodzaj surowca lub materiału budowlanego Raw material or construction product	Stężenie radionuklidów Radionuclides concentration [Bq·kg ⁻¹]			Wartość wskaźnika aktywności Values of activity indices [Bq·kg ⁻¹]	
	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Tr	f_1	f_2
Piasek Sand	0–1230 (355)	0–116 (30)	0–88 (26)	0,00–1,09 (0,20)	0–116 (30)
Glina Clay	198–1245 (588)	26–82 (52)	30–64 (48)	0,35–0,85 (0,61)	26–82 (52)
Wapno Lime	10–118 (37)	10–204 (30)	1–85 (10)	0,00–1,09 (0,20)	0–116 (30)
Popioły lotne Fly ash	0–8775 (813)	0–257 (122)	0–148 (113)	0,00–0,190 (1,26)	0–257 (122)
Żużel wielkopiecowy Boiler slag	102–426 (217)	42–138 (81)	30–52 (36)	0,00–0,68 (0,43)	42–138 (81)
Cement Cement	19–7149 (291)	0–111 (40)	6–72 (26)	0,00–2,00 (0,10)	0–111 (40)
Beton komórkowy i lekki Cellular concrete	105–1015 (491)	5–149 (68)	3–106 (55)	0,00–1,00 (0,09)	5–149 (69)
Betony inne Other concrete	48–805 (434)	5–656 (66)	4–383 (47)	0–3 (0,10)	5–656 (65)
Ceramika Construction ceramics	0–1368 (669)	0–214 (52)	0–171 (48)	0–7 (0,04)	0–214 (52)

rozwiązaniem jest utylizacja materiałów takich jak FA, które zawierają naturalne pierwiastki promieniotwórcze (Bem, Wieczorkowski i Budzanowski, 2002; Xinwei, Caifeng, Cancan i Wen, 2012; Mamta i in., 2013). Należy mieć na uwadze, że przebywając w pobliżu składowisk FA, człowiek jest narażony na podwyższoną dawkę skuteczną promieniowania generowanego przez pozostałości po spalonym węglu kamiennym (Lubin i in., 1995; Michalik, 2006; Bojakowska, Lech i Wołkiewicz, 2008; Olkusi, 2008; Olkusi i Stala-Szlugaj, 2009; Pandit, Sahu i Puranik, 2011). Przy stosowaniu FA do betonów wskaźnik radioaktywności tego materiału jest wyższy w porównaniu do wskaźnika betonu bez dodatków, ale nadal znajduje się w granicach bezpiecznych dla człowieka (Golewski, 2015).

Z uwagi na to, że problem promieniotwórczości naturalnej betonów z dodatkiem FA został już rozpoznany (Turhan, Arıkan, Yücel, Varinlioğlu i Köse,

2010; Kovler, 2012; Golewski, 2015), w poniższej pracy przedstawiono wyniki badań radioaktywności betonów wykonanych na spoiwach trójskładnikowych, tzn. z łącznym dodatkiem FA i SF.

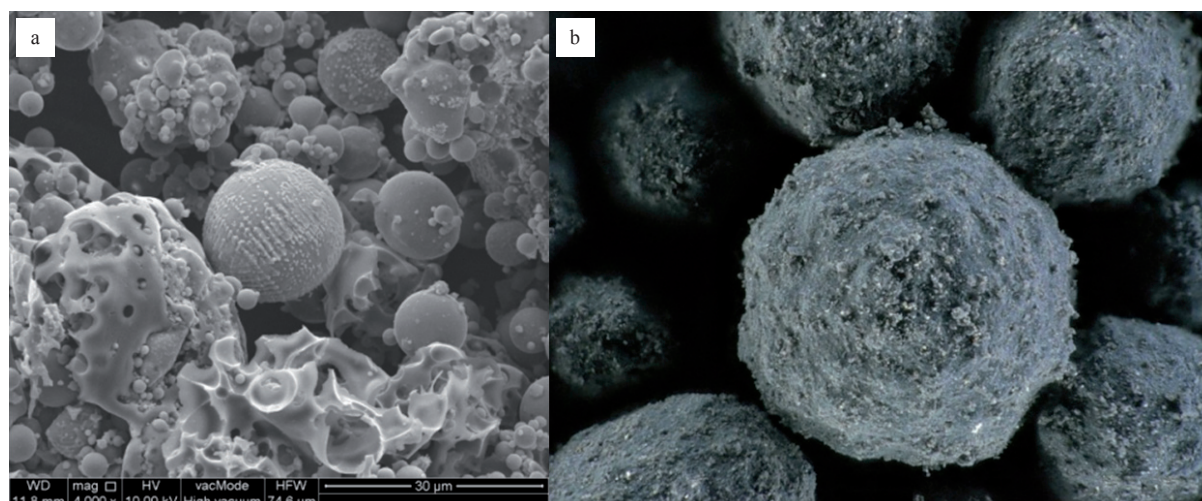
MATERIAŁ I METODY

Materiały wykorzystane do badań

Badania zostały przeprowadzone na krzemionkowych popiołach lotnych – FA, mikrokrzemionce zagęszczonej – SF (rys. 1) oraz betonie o zmiennej zawartości dodatku FA i 10% substytucji cementu w postaci SF (Gil i Golewski, 2016; 2017a; 2017b).

Oznaczenia poszczególnych kompozycji mieszanek betonowych były następujące:

- 0% FA+10% SF (FA-00+SF-10),
- 10% FA+10% SF (FA-10+SF-10),
- 20% FA+10% SF (FA-20+SF-10).



Rys. 1. Obraz mikroskopowy krzemionkowego popiołu lotnego (a) oraz mikrokrzemionki zagęszczonej (b)
Fig. 1. Microscope images of siliceous fly ash (a) and compacted microsilica fume (b)

Mieszanki betonowe wykonano w mieszarce przeciwbieżnej w laboratorium przy wykorzystaniu następujących materiałów: cementu portlandzkiego CEM I 32,5R z cementowni w Ożarowie, kruszywa naturalnego żwirowego 2–8 mm ze złóż w Rokitnie, piasku kopalnego 0–2 mm ze złóż w Niemcach, mikrokrzemionki zagęszczonej z Huty Łaziska SA, krzemionkowych popiołów lotnych z elektrociepłowni w Puławach i plasty-

fikatora Stacheplast 125. Skład szczegółowy mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 3.

Popioły lotne wykorzystane do badań pochodziły z Zakładów Azotowych „Puławy”. Powstały one na skutek spalania pyłu węglowego z węgla kamiennego. W tabeli 4 zestawiano skład chemiczny FA, w których najczęściej jest krzemionki (SiO_2) oraz tlenku glinu (Al_2O_3).

Tabela 3. Receptura mieszanek betonowych

Table 3. Recipe of concrete mixtures

Składnik mieszanki Component of concrete	Zawartość – Contents [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]			
	FA-00+SF-00	FA-00+SF-10	FA-10+SF-10	FA-20+SF-10
Cement portlandzki CEM I 32,5R (cementownia w Ożarowie) Portland cement CEM I 32.5R (Ożarów cement factory)	352	317	282	246
Krzemionkowy popiół lotny (elektrociepłownia w Puławach) Siliceous fly ash (Puławy power plant)	0	0	35	70
Pył krzemionkowy – zagęszczony (Huta Łaziska SA) Concentrated silica fume (Łaziska Ironworks SA)	0	35	35	35
Woda (z wodociągu miejskiego) Water (from urban water supply)	141	141	141	141
Piasek 0–2 mm (Niemce) Sand 0–2 mm (Niemce)	646	676	676	676
Żwir 2–8 mm (żwirownia w Rokitnie) Gravel 2–8 mm (Rokitno gravel pit)	1205	1205	1205	1205

Tabela 4. Skład chemiczny spoiw

Table 4. Chemical composition of binders

Składnik Component	Zawartość [% mas.] – Contents [% wt]							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	LOI
CEM I 32,5R	15,00	2,78	2,72	1,21	71,06	1,38	4,56	3,64
FA	55,27	26,72	6,66	3,01	2,35	0,81	0,47	4,66
SF	91,90	0,71	2,54	1,53	0,31	1,14	0,45	3,83

Amerykańska norma ASTM C618-12a klasyfikuje popiół lotny na dwie klasy, tzn. F i C, zgodnie z tabelą 5. Stosowany FA można zakwalifikować do klasy F ze względu na uzyskane wyniki z tabeli 4.

Pył krzemionkowy zagęszczony zastosowany w betonie pochodził z Huty Łaziska SA. Jest on odpadem przemysłu hutniczego, który powstaje w piecach łukowo-oporowych przy produkcji że-

lazokrzemów czy krzemu metalicznego, na skutek odpowietrzenia i prasowania usunięto część fazy rozproszonej (którą zawiera pył krzemionkowy niezagęszczony). Badania SF potwierdziły, że w składzie chemicznym najwięcej jest krzemionki (SiO₂) – prawie 92%. Powierzchnię właściwą określono taką samą metodą jak w przypadku FA i wyniosła ona 260 m²·kg⁻¹.

Tabela 5. Klasyfikacja popiołów według normy ASTM C618-12a

Table 5. Ash classification according to ASTM C 618-12a standard

Składnik Component	Zawartość [% mas.] – Contents [% wt]		
	pucolany puccolan	popiół lotny klasy F fly ash class F	popiół lotny klasy C fly ash class C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Strata prażenia Lost of ignition (LOI)	≤ 10	≤ 6	≤ 6

Metody badań

Do wykonania badań promieniotwórczości naturalnej wykorzystano miernik typu MAZAR-01. Analizator Mazar 01 przeznaczony jest do określenia stężenia naturalnych pierwiastków promieniotwórczych takich jak rad, potas czy tor. Spełnia ono wymagania wspomnianego rozporządzenia Rady Ministrów z 2007 roku i na podstawie wyników badań tym urządzeniem można udzielić aprobaty technicznej zgodnie ze wspomnianym rozporządzeniem dla materiałów budowlanych oraz odpadów stosowanych chociażby do produkcji materiałów budowlanych, np. betonów stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwen-

tarza żywego. Część pomiarowa znajduje się w ołowianym domku osłonowym, który zawiera: sondę scyntylicyjną typu SSU-70-2 z kryształem NaJ(Tl), przedwzmacniaczem i zasilaczem wysokiego napięcia oraz kalibracyjne źródło izotopowe Cs 137 wykorzystywane do stabilizacji toru pomiarowego. W części odczytowej znajduje się sterownik mikroprocesorowy. Analizator jest przystosowany do współpracy z komputerem PC, dzięki czemu możliwa jest wizualizacja widma spektrometrycznego.

Wskaźniki aktywności oznaczone jako f_1 i f_2 określają ilość izotopów. Wskaźnik f_1 uwzględnia zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych, a je-

go wartość informuje o narażeniu organizmu na promieniowanie gamma emitowane przez radionuklidy naturalne: ^{40}K , ^{226}Ra oraz ^{228}Th . Wskaźnik f_2 podaje informację o zawartości radu, który jest izotopem macierzystym radonu, dlatego wartość tego wskaźnika określa stopień narażenia na promieniowanie alfa.

$$f_1 = \frac{S_K}{3000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}} + \frac{S_{Ra}}{300 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}} + \frac{S_{Th}}{200 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}}$$

$$f_2 = S_{Ra}$$

gdzie:

S_K – stężenie potasu,

S_{Ra} – stężenie radu,

S_{Th} – stężenie toru.

Wskaźniki f_1 i f_2 wynoszą odpowiednio 1 i 200 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ i nie mogą przekraczać o więcej niż o 20% tych wartości w odniesieniu do surowców i materiałów budowlanych stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi do inwentarza żywego.

Przed wykonaniem badań, urządzenie zostało skalibrowane, a następnie sprawdzone z użyciem wzorców. W tym czasie przygotowano próbki do badania: krzemionkowych popiołów lotnych, pyłów krzemionkowych zagęszczonych oraz czterech rodzajów betonu. Próbki betonowe miały kształt walców. Walce rozdrobiono na kruszarce szczękowej, po czym przesiano przez sito o boku oczka 2 mm.

Metodą kwartowania odseparowano średnio trzykilogramowe próbki. Następnie próbki suszono do stałej masy w suszarce z wentylatorem w temperaturze 105°C . Po wystudzeniu, próbki zostały umieszczone w pojemniku typu Marinell o objętości 1700 cm^3 . Pojemniki wcześniej oczyszczono i zważono z dokładnością do 1 g. Po umieszczeniu próbki w pojemnikach oraz odpowiednim jej ubicie, pojemnik z próbką zabezpieczano i odstawiano na bok w celu stabilizacji próbki na siedem dni. Przed wykonaniem badań obliczono tło dla próbek na aluminiowym wzorcu masy. Po analizie tła, próbkę umieszczano w domku pomiarowym i wykonano kolejno pomiary przygotowanych próbek.

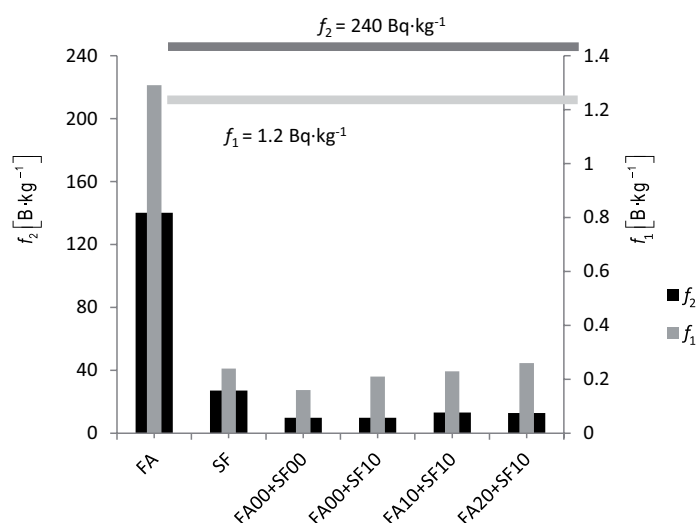
WYNIKI

Uzyskane wyniki badań dodatków do betonu oraz betonów przedstawiono w tabeli 6. W przypadku zastosowanych FA poziom radioaktywności ponadpięciokrotnie przewyższa wartości wskaźnika f_1 uzyskane dla SF i kilkakrotnie dla betonu z różną kompozycją dodatków (rys. 2). Dodatkowo FA przewyższa dopuszczalną granicę wskaźnika f_1 o $0,09 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, co zgodnie ze wspomnianym rozporządzeniem Rady Ministrów z 2007 roku dyskwalifikuje zastosowany materiał do wykorzystania go jako surowiec w budynkach przeznaczonych dla ludzi i inwentarza żywego (dopuszczalny poziom f_1 jest przekroczony o 29%). Badania wykazały ponadto wysoki poziom stężenia potasu we wszystkich materiałach w stosunku do stężenia radu

Tabela 6. Wyniki badań promieniotwórczości naturalnej

Table 6. The results of natural radioactivity

Rodzaj materiału Material type	Stężenie K Concentration of K	Stężenie Ra Concentration of Ra	Stężenie Th Concentration of Th	Wartość wskaźnika aktywności Values of activity indices	
				f_1	f_2
	[$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$]				
FA	600,70	140,17	125,58	1,29	140,17
SF	303,41	27,20	10,07	0,24	27,20
FA00+SF00	296,37	9,83	6,27	0,16	9,83
FA00+SF10	417,91	9,92	8,74	0,21	9,92
FA10+SF10	417,76	13,14	10,25	0,23	13,14
FA20+SF10	449,86	15,88	13,22	0,26	15,88



Rys. 2. Wskaźniki radioaktywności f_1 i f_2 krzemionkowych popiołów lotnych (FA), mikrokrzemionki zagęszczonej (SF) oraz mieszanek betonowych ze zmienną kompozycją substytutów

Fig. 2. Radioactivity indexes f_1 and f_2 of siliceous fly ashes (FA), compacted microsilica fume (SF) and concrete mixtures with variable composition of substitutes

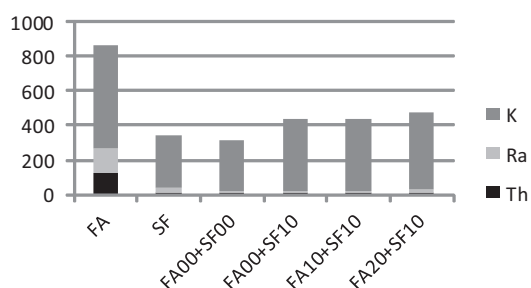
i toru (rys. 3). Decydujący wpływ na przekroczenie wskaźnika f_1 dla FA miało stężenie radu i toru.

Wykonane badania na betonach ze zmienną ilością dodatków wykazało, że najniższa aktywność f_1 została wykryta w betonie FA00+SF00 i wyniosła 0,16 Bq·kg⁻¹, a najwyższa w FA20+SF10 – 0,26 Bq·kg⁻¹. Zaobserwowano wzrost proporcjonalny do zastosowanej ilości FA. Znaczne różnice można zaobserwować, porównując beton zgodnie ze wskaźnikiem f_2 , gdzie różnice są większe w zależności od zastosowanego FA. Wspomniany parametr zawierał się w przedziale 13,14–15,88 Bq·kg⁻¹. Procentowo wskaźnik f_2 wzrósł w stosunku do betonu referencyjnego: FA10+SF10 o

prawie 33,7% i o ponad 61,5% dla FA20+SF10. W stosunku do betonu z dodatkiem jedynie SF odpowiednio o niespełna 1,0% f_1 i ponad 31,2% f_2 .

WNIOSKI

Zastosowanie mikrokrzemionki zagęszczonej oraz krzemionkowych popiołów lotnych do betonu jest korzystne ze względów ekonomicznych i ekologicznych. Na podstawie informacji uzyskanych z firm pośredniczących w sprzedaży mikrokrzemionki cena 1 t wynosi w granicach 100–150 EUR, więc jest porównywalna bądź nieznacznie wyższa od ceny cementu. Głębszą analizę ekonomiczną przedstawiono w artykule Gila i Golewskiego (2018). Krzemionkowe popioły lotne, powstałe na skutek spalania węgla kamiennych, zawierają w składzie dużą ilość różnych pierwiastków promieniotwórczych. Człowiek w mniejszym stopniu jest narażony na groźne promieniowanie, jakie emitują popioły lotne w pobliżu „pól popiołowych”. Można stwierdzić, że jest bezpieczne zastosowanie tych dodatków do wykonania betonu pod względem wskaźników radioaktywności, mimo przekroczonego wskaźnika f_1 dodatku, jakim są krzemionkowe popioły lotne. Zagęszczony pył krzemionkowy nie wpłynął w znacznym



Rys. 3. Poziom stężenia radionuklidów

Fig. 3. The concentration level of radionuclides

stopniu na radioaktywność betonu. Zastosowanie do betonu krzemionkowych popiołów lotnych również nieznacznie podwyższyło dopuszczalny stopień promieniotwórczości i dzięki temu beton z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych i mikrokrzemionki zagęszczonej można zaklasyfikować do bezpiecznych dla zdrowia ludzi materiałów budowlanych.

Zgodnie z dyrektywą 2013/59/Euratom oraz rozporządzeniem Rady Ministrów z 2007 roku w sprawie zawartości ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Th w surowcach i materiałach budowlanych (Dz.U. 2007 nr 4, poz. 29), przedstawionych również w pracy Leonardiego i innych (2018), po głębszej analizie stwierdzono, że krzemionkowe popioły lotne bądź inne odpady przemysłowe można stosować do produkcji betonu pod warunkiem, że produkt końcowy (beton) nie przekroczy dopuszczalnych wskaźników aktywności promieniotwórczej.

PIŚMIENICTWO

- ASTM C618-12a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- Bem, H., Wieczorkowski, P. i Budzanowski, M. (2002). Evaluation of technologically enhanced natural radiation near the coal-fired power plants in the Lodz region of Poland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 61, 191–201.
- Bojakowska, I., Lech, D. i Wołkowicz, S. (2008). Uran i tor w węglach kamiennych i brunatnych ze złóż polskich. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24 (2), 53–58.
- Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz uchylająca dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom. Dz.U. UE L 13 z 17.01.2014.
- Gil, D. i Golewski G. L. (2017b). Wpływ dodatku pyłu krzemionkowego (SF) i krzemionkowych popiołów lotnych (FA) na krytyczny współczynnik intensywności naprężeń betonu. *Materiały Budowlane*, 7, 48–49.
- Gil, D. i Golewski, G. L. (2017a). Badania odporności na pękanie i wielkości mikrorys w betonie ze zmiennym dodatkiem pyłu krzemionkowego i popiołów lotnych. *Materiały Budowlane*, 10, 12–13.
- Gil, D. M. i Golewski, G. L. (2016). Analiza odporności na pękanie betonów z dodatkiem popiołów lotnych i mikrokrzemionki. *Materiały Budowlane*, 11, 116–117.
- Gil, D. M. i Golewski, G. L. (2018). Ocena korzyści ekologicznych i ekonomicznych wynikających z wykorzystania w betonie łącznego dodatku krzemionkowych popiołów lotnych i mikrokrzemionki zagęszczonej. *Materiały Budowlane*, 10, 22–24.
- Główny Urząd Statystyczny [GUS] (2017). *Ochrona środowiska 2017*. Warszawa.
- Golewski, G. L. (2015). Studies of natural radioactivity of concrete with siliceous fly ash addition. *Cement – Wapno – Beton*, 2, 106–114.
- Kovler, K. (2011). Legislative aspects of radiation hazards from both gamma emitters and radon, exhalation of concrete containing coal fly ash. *Construction and Building Materials*, 25, 3404–3409.
- Kovler, K. (2012). Does the utilization of coal fly ash in concrete construction present a radiation hazard? *Construction and Building Materials*, 29, 158–166.
- Kuliczkowski, A., Pluta, R. i Zwierzchowski, D. (1993). Radioaktywność w środowisku człowieka. *Monitoring Środowiska Regionu Świętokrzyskiego*, 1, 47–50.
- Leonardi, F., Bonczyk, M., Nuccetellic, C., Wysocka B. M., Michalik, B., Ampollinic, M., Tonnarini, S., Rubin, J., Niedbalska, K. i Trevisi, R. (2018). A study on natural radioactivity and radon exhalation rate in building materials containing norm residues: preliminary results. *Construction and Building Materials*, 173, 172–179.
- Lubin, J. H., Tomasek, L., Edling, C., Hornung, R. W., Howe, G., Kunz, E., Kusiak, R. A., Morrison, H. I., Radford, E. P., Samet, J. M., Tirmarache, M., Woodward A. i Yao, S. X. (1995). Radon-exposed underground miners and inverse dose-rate (protraction enhancement cement) effects. *Health Physics*, 69 (4), 494–500.
- Mamta, G., Ajah Kumar, M., Rati, V., Sonkawade, R. G., Verma, K. D. i Rajendra, P. (2013). Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate in fly ash samples from a thermal power plant and estimation of radiation doses. *Radiation Measurements*, 50, 160–165.
- Michalik, B. (2006). Naturalna promieniotwórczość w węglu kamiennym i stałych produktach jego spalania. *Karbo*, 1, 2–12.
- Olkuski, T. (2008). Zawartość uranu i toru w węglach polskich i amerykańskich. *Polityka Energetyczna*, 11 (1), 323–334.
- Olkuski, T. i Stala-Szlugaj, K. (2009). Pierwiastki promieniotwórcze w węglu oraz w produktach odpadowych

- powstających podczas jego spalania. *Rocznik Ochrony Środowiska*, 11, 913–922.
- Pandit, G. G., Sahu, S. K. i Puranik, V. D. (2011). Natural radionuclides from coal fired thermal power plants – estimation of atmospheric release and inhalation risk. *Radioprotection*, 46, 173–179.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (Dz.U. 2005 nr 20, poz. 168).
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2007 r. w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów (Dz.U. 2007 nr 4, poz. 29).
- Turhan, Ş., Arıkan, I. H., Yücel, B., Varinlioğlu, A. i Köse, A. (2010). Evaluation of the radiological safety aspects of utilization of Turkish coal combustion fly ash in concrete production. *Fuel*, 89, 2528–2535.
- Xinwei, L., Caifeng, Z., Cancan, C. i Wen, L. (2012). Radioactivity level of soil around Baqiao coal-fired power plant in China. *Radiation Physics and Chemistry*, 81, 1827–1832.
- Zakrzewski, T. (2005). *Promieniotwórczość naturalna w budownictwie*. Gliwice: WPS.

NATURAL RADIOACTIVITY OF CONCRETE WITH CONCENTRATED SILICA FUME (SF) AND SILICEOUS FLY ASH (FA) ADDITION

ABSTRACT

Natural radiation has been accompanying humans since its inception. They are present in the air, in water, soil or rocks, as well as in building materials that are used to erect building objects. However, a person may be exposed to a greater or lesser extent to the surrounding radioactivity. The paper presents the results of radioactivity testing of concrete with a different composition of the addition of exemplary siliceous fly ash and compacted microsilica fume. It has been proven that material with increased radioactive activity can be safely used in the production of concrete and additionally it meets the restrictive requirements of the Polish regulation of the Council of Ministers of 2017 or Council directive 2013/59/Euratom in the field of protection against active radiation.

Key words: natural radioactivity, radionuclide, concrete, fly ash, concentrated silica fume, radioactive safety

