



fot. Michał Braszczyski

Beton i jego składniki w aspekcie wymagań środowiskowych

Stosowanie surowców odpadowych i odpadów przy produkcji betonu towarowego rodzi pytanie, czy produkty uzyskane z ich udziałem nie będą wywierały negatywnego wpływu na środowisko. W przypadku obiektów i konstrukcji betonowych obawy najczęściej dotyczą wymywalności metali ciężkich oraz poziomu radioaktywności.

Produkcja betonu, najważniejszego materiału budowlanego, nierozzerwalnie związana jest z pozyskaniem i stosowaniem znacznych ilości kruszyw naturalnych, wody oraz produkcją i stosowaniem niezbędnej ilości cementu. Działania te mogą prowadzić do negatywnego oddziaływania na poszczególne komponenty środowiska. Dlatego też coraz częściej dąży się do stosowania w produkcji cementu i betonu odpadów przemysłowych oraz ubocznych produktów z innych branż.

Wymienić tu można zastępowanie paliw naturalnych paliwami zastępczymi w opalaniu pieców cementowych, stosowanie surowców odpadowych do zestawiania mieszaniny surowcowej przeznaczonej do produkcji klinkieru cementowego, stosowanie gipsów odpadowych (zwłaszcza reagipsu z mokrej

metody odsiarczania spalin w energetyce) jako regulatora czasu wiązania cementu. Szczególnie szeroko rozpowszechnionym działaniem jest stosowanie ubocznych produktów z energetyki i hutnictwa (popioły lotne, granulowane żużle hutnicze, pyły krzemionkowe z produkcji żelazostopów) w charakterze aktywnych dodatków mineralnych w produkcji cementu oraz betonu, pod warunkiem spełnienia wymagań zawartych w odpowiednich normach [1-4].

Stosowanie surowców odpadowych i odpadów rodzi pytanie, czy produkty uzyskane z ich udziałem nie będą wywierały negatywnego wpływu na środowisko. W przypadku obiektów i konstrukcji betonowych obawy najczęściej dotyczą wymywalności metali ciężkich oraz poziomu radioaktywności.

Rodzaj materiału	Zawartość pierwiastka [mg/kg]											
	As	Hg	Cr	Cd	Pb	Co	Ni	Mn	V	Cu	Zn	Tl
Cement portlandzki CEM I 32,5R	5	3	29	4,5	42	6	7	244	10	17	198	56
Cement portlandzki CEM I 52,5R	5	3	32	5	44	7	6	275	11	21	151	53
Cement portlandzki żużłowy (30% żużła)	4	4,5	30	6	44	5	3,5	314	6	74	251	29
Cement portlandzki popiołowy (28% popiołu)	83	5	56	7	57	15	23	317	63	30	220	85
Cement portlandzki wieloskładnikowy (35% dodatków mineralnych)	86	3,5	38	5	43	9	13	278	31	41	148	75
Cement hutniczy (ok. 60% żużła)	6	2,7	17	3,1	22	6,7	3,2	710	27	62	180	29
Żużel wielkopiecowy	5	3,5	12	3	<5	6	<2,5	1978	10	22	36	22
Popiół lotny krzemionkowy	140	7	97	11	34	32	41	482	176	71	142	160
Pył krzemionkowy	4,7	2,5	15	3	64	90	160	528	9	123	156	23

Tabela 1. Zawartość metali ciężkich w składnikach betonów

Metal ciężki	Dopuszczalna zawartość metalu, % wag.	Zawartość metali ciężkich w cementach, % wag			
		Cement portlandzki	Cement portlandzki żuźlowy	Cement portlandzki popiołowy	Cement hutniczy
Arsen (As)	0,01	0,0005	0,0004	0,0083	0,0006
Kadm (Cd)	0,001	0,00045	0,0006	0,0007	0,00031
Chrom (Cr)	0,05	0,0029	0,0030	0,0056	0,0017
Nikiel (Ni)	0,05	0,0007	0,00035	0,0023	0,00032
Ołów (Pb)	0,05	0,0042	0,0044	0,0057	0,0022

Tabela 2. Porównanie zawartości metali ciężkich w cementach a wymagania niemieckie dla cementu stosowanego w budowie obiektów na wodę pitną

Metale ciężkie w betonie i jego składnikach

Obowiązujący obecnie europejski system norm nie zawiera ograniczeń w stężeniach metali ciężkich zawartych w cementach i innych składnikach betonu. Jedynym problemem chromu Cr⁺⁶ i jego alergicznego oddziaływania na człowieka został uregulowany w prawodawstwie europejskim oraz polskim [5]. W świetle tych wymagań zakazuje się wprowadzania do obrotu i stosowania preparatów zawierających cement (dotyczy to także cementu workowanego), jeżeli zawierają one więcej niż 0,0002% (2 ppm) rozpuszczalnego chromu Cr⁺⁶ w przeliczeniu na całkowitą suchą masę wyrobu. Regulacja ta spowodowała konieczność redukcji chromu w cemencie workowanym przez krajowych producentów i dystrybutorów cementu. Aby ocenić, czy beton lub jego składniki (zwłaszcza będące odpadami z procesów przemysłowych) mogą uwalniać metale ciężkie do środowiska naturalnego, należy określić nie tylko zawartość metali ciężkich w suchej masie analizowanego materiału, ale także, co jest znacznie bardziej istotne dla środowiska, określić zawartość metali ciężkich w wyciągach (eluatach) wodnych.

W celu uzyskania wyciągu wodnego z badanego materiału stosuje się wiele różnych procedur badawczych, różniących się czasem trwania procesu wymywania, rozdrobnieniem materiału, odczynem medium ługującego czy też sposobem wymywania (statyczny bądź dynamiczny). Europejski system norm w tym zakresie (uznawany także w Polsce od 2003 roku) przewiduje możliwość wykonywania wyciągów wodnych z odpadów o różnym uziarnieniu, przy zmiennym stosunku objętości medium ługującego do masy próbki, przykładem może tu być procedura badawcza zawarta w normie PN-EN 12457-1-4:2003 [6].

Tabela 3. Stężenie metali ciężkich w wyciągach wodnych ze składników betonu

Rodzaj materiału	Stężenie pierwiastka, mg/dm ³											
	As	Hg	Cr	Cd	Pb	Co	Ni	Mn	V	Cu	Zn	Tl
Cement portlandzki CEM I 32,5R	<0,05	0,0003	0,542	<0,001	0,072	0,009	0,022	<0,0004	0,092	0,005	0,054	<0,003
Cement portlandzki CEM I 52,5R	<0,05	0,0002	0,385	0,002	0,053	0,009	0,019	<0,0004	0,083	0,009	0,049	<0,003
Cement portlandzki żuźlowy	<0,05	0,0002	0,497	<0,001	0,048	0,010	0,023	<0,0004	0,108	0,004	0,067	<0,003
Cement portlandzki popiołowy	<0,05	0,0002	0,477	<0,001	0,060	0,010	0,022	<0,0004	0,105	0,004	0,061	<0,003
Cement portlandzki wieloskładnikowy	<0,05	0,0003	0,499	<0,001	0,071	0,008	0,007	<0,0004	0,088	0,006	0,062	<0,003
Cement hutniczy	<0,05	0,0002	0,173	0,001	0,022	0,003	0,001	<0,0004	0,025	0,002	0,080	<0,003
Żużel wielkopiecowy	<0,05	0,0004	0,007	0,002	0,030	0,045	0,028	0,016	0,034	0,004	0,011	<0,003
Popiół lotny	<0,05	0,0003	0,148	0,001	0,026	0,080	0,019	0,004	0,112	0,001	0,016	<0,003
Pył krzemionkowy	<0,05	0,0001	0,020	0,002	0,032	0,067	0,031	3,371	0,083	0,018	0,117	<0,003

W badaniach, wyniki których przedstawiono w niniejszym artykule, eluaty wodne uzyskiwano w oparciu o metodykę zamieszczoną w normie krajowej PN-Z-15009 [7].

Zawartość metali ciężkich w wyciągach wodnych określano z wykorzystaniem spektrometru emisyjnego z plazmą wzbudzoną indukcyjnie ICP-AES. Tabela 1 pokazuje ilość metali ciężkich zawartych w wybranych rodzajach cementów oraz dodatkach mineralnych stosowanych w technologii cementu i betonu.

W tabeli 2 porównawczo przedstawiono zawartość metali ciężkich w wybranych cementach z niemieckimi przepisami [8] dotyczącymi wymagań dla cementu stosowanego w budowie zbiorników na wodę pitną oraz budowie linii przesyłowych wody pitnej.

Dokonując analizy wyników badań z tablicy 1 i 2 można wyciągnąć wniosek, że do wykonywania obiektów i konstrukcji betonowych mających kontakt z wodą pitną mogą być użyte wszystkie rodzaje cementów powszechnego użytku spełniające wymagania normy PN-EN 197-1 [1].

Zdecydowana większość metali ciężkich zawartych w cemencie jest trwale wbudowana w strukturę klinkieru portlandzkiego lub składniki fazowe granulowanego żużla wielkopiecowego oraz popiołu lotnego (głównie w fazie szklistej) i nie ulega wymyciu (tabela 3). Obliczone poziomy wymywalności wybranych metali ciężkich z cementu oraz dodatków mineralnych pokazano w tabeli 4. Z prezentowanych danych wynika, iż metale ciężkie mają różne poziomy wymywalności; największy obserwowany jest dla chromu, który w zależności od rodzaju badanego materiału wynosi od 0,44 do 11,82%. Najniższym stopniem wymycia wyróżnia się mangan (0,001-0,02%); nie dotyczy to poziomu wymywalności z pyłu krzemionkowego.

Wymywalność metali ciężkich z gruzu betonowego pochodzącego z obiektu przemysłowego po 30 latach eksploatacji pokazano w tabeli 5. W większości przypadków zawartość metali ciężkich w wyciągach wodnych stanowi jedynie znikomą część wartości dopuszczalnych dla wód i ścieków wprowadzanych do środowiska [9].

Reasumując, można postawić wniosek, że beton i jego składniki pod względem zawartości metali ciężkich, a zwłaszcza uwalniania ich do środowi-

ska (poziomu wymywalności), nie stanowią zagrożenia dla środowiska naturalnego (gleby i wód).

Z doświadczeń i wieloletnich badań [10-14] wynika ponadto, że beton jest jednym z najbardziej efektywnych materiałów do unieszkodliwiania odpadów nieorganicznych, niebezpiecznych, zawierających w swoim składzie metale ciężkie. Stwardniała matryca betonowa skutecznie immobilizuje metale ciężkie w złożonych procesach fizyko-chemicznych zachodzących w trakcie wiązania i twardnienia betonu. Trwałe wiązanie metali ciężkich jest możliwe dzięki produktom reakcji hydratacji, a szczególne znaczenie w tym zakresie przypisuje się fazie C-S-H. Kompozyty betonowe cechuje ponadto korzystna mikrostruktura z punktu widzenia immobilizacji metali ciężkich. Na jej właściwe kształtowanie duży wpływ mają także dodatki mineralne o właściwościach pucolanowych bądź pucolanowo-hydraulicznych (popioły lotne, pył krzemionkowy, mielony granulowany żużel wielkopiecowy).

W matrycach betonowych poziom związania metali ciężkich pochodzących z odpadów niebezpiecznych w większości przypadków przekracza 99,98% [10-14]. Stabilizacja odpadów pozwala więc na ich unieszkodliwienie przed procesem składowania lub można proces ten prowadzić w trakcie budowy takich obiektów betonowych, jak drogi, fundamenty, zbiorniki na ścieki itp.

Poziom radioaktywności betonu oraz jego składników

Istotnym problemem z punktu widzenia ochrony środowiska i zdrowia organizmów żywych jest poziom promieniotwórczości surowców naturalnych i odpadów przemysłowych stosowanych w produkcji materiałów budowlanych.

Wymagania dotyczące ograniczenia zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w wyrobach budowlanych uwzględniają otrzymywaną przez ludzi w budynkach mieszkalnych dawkę promieniowania jonizującego, a więc narażenie całego ciała na promieniowanie gamma (25% dawki) oraz narażenie układu oddechowego na promieniowanie alfa (75%). Podobne wymagania przyjęto dla inwentarza żywego.

Na moc dawki promieniowania gamma w budynkach składają się [15]:

Tabela 5. Wymywalność metali ciężkich z gruzu betonowego

Metal ciężki	Stężenie, mg/dm ³		Dopuszczalna zawartość w ściekach według [9], mg/dm ³
	próbka I	próbka II	
Miedź Cu	<0,01	<0,01	0,5
Nikiel Ni	<0,05	<0,05	0,5
Cynk Zn	<0,01	<0,01	2,0
Chrom Cr	0,017	0,027	0,5
Kadm Cd	<0,025	<0,025	0,2
Ołów Pb	<0,15	<0,15	0,5
Mangan Mn	<0,01	<0,01	----
Kobalt Co	<0,01	<0,01	1
Tal Tl	0,06	0,06	1
Arsen As	<0,05	0,053	0,1
Rtęć Hg	0,005	0,003	0,03

Rodzaj materiału	Wymywalność, %					
	Cr	Zn	Cd	Pb	Mn	Cu
Cement portlandzki	11,82	0,27	0,25	2,62	0,01	0,01
Cement portlandzki popiołowy	8,52	0,28	0,14	1,05	0,001	0,13
Cement hutniczy	10,18	0,44	0,32	1,00	0,001	0,03
Żużel wielkopiecowy	0,44	0,31	0,50	6,00	0,02	0,14
Popiół lotny	1,58	0,11	0,06	3,25	0,01	0,02
Pył krzemionkowy	1,33	0,75	0,67	0,50	6,39	0,15

- promieniowanie gamma naturalnych pierwiastków promieniotwórczych (radu Ra-226, toru Th-228, potasu K-40) zawartych w materiałach pochodzenia mineralnego
- promieniowanie gamma naturalnych pierwiastków promieniotwórczych zawartych w podłożu, na którym budynek został posadowiony
- składowa gamma promieniowania kosmicznego przenikającego przez przegrody budynku.

Wymagania stawiane poziomowi promieniotwórczości materiałów stosowanych w budownictwie zostały sprecyzowane w instrukcji ITB [16] oraz dokumentach rządowych [17]. Według zapisów zawartych w tych dokumentach zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie ustala się za pomocą wskaźników aktywności f_1 i f_2 :

$$f_1 = \frac{S_K}{3000 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{S_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} \quad (1)$$

$$f_2 = SRa \quad (2)$$

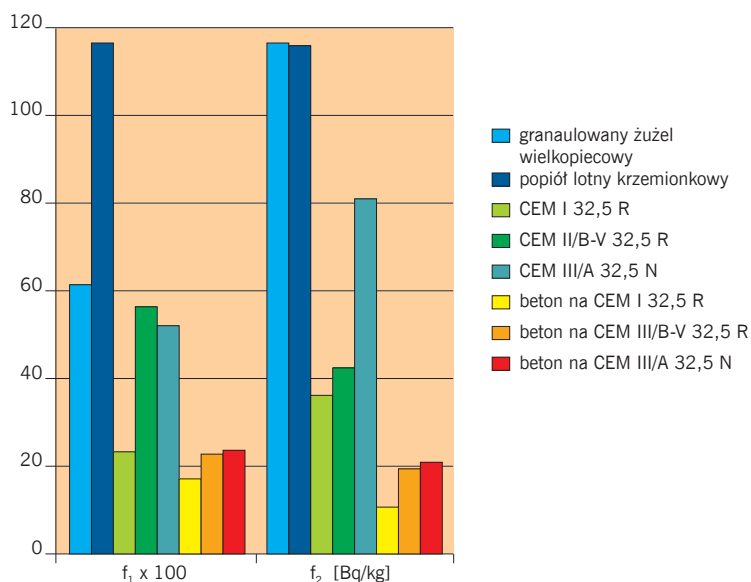
gdzie: S_K , S_{Ra} , S_{Th} – oznaczają wartości stężeń potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228, wyrażone w Bq/kg.

Wartości wskaźników f_1 i f_2 nie mogą przekroczyć 20% wartości:

- $f_1 = 1$ i $f_2 = 200 \text{ Bq/kg}$ – w odniesieniu do surowców i materiałów budowlanych stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego
- $f_1 = 2$ i $f_2 = 400 \text{ Bq/kg}$ – w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w obiektach

Tabela 4. Poziom wymywalności wybranych metali ciężkich z cementu i dodatków mineralnych

Rys. 1. Poziom radioaktywności betonu i jego składników



tach budowlanych naziemnych wznoszonych na terenach zabudowanych lub przeznaczonych do zabudowy w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego oraz do niwelacji takich terenów

3. $f_1 = 3,5$ i $f_2 = 1000$ Bq/kg – w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w częściach naziemnych obiektów budowlanych, niewymienionych w pkt. 2, oraz do niwelacji terenów niewymienionych w pkt. 2
4. $f_1 = 7$ i $f_2 = 2000$ Bq/kg – w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w częściach podziemnych obiektów budowlanych, o których mowa w pkt. 3, oraz w budowlach podziemnych, w tym w tunelach kolejowych i drogowych, z wyłączeniem odpadów przemysłowych wykorzystywanych w podziemnych wyrobiskach górniczych.

Na rysunku 1 pokazano wielkość wskaźników aktywności f_1 i f_2 dla najczęściej stosowanych surowców odpadowych jako składników głównych cementu (popiołu lotnego krzemionkowego oraz granulowanego żużla wielkopieczowego), wybranych rodzajów cementu i betonów z ich udziałem (beton zawierał 350 kg cementu w 1 m³ betonu). Wyraźnie widoczne jest obniżanie się poziomu radioaktywności w szeregu od składników cementu, poprzez cement do betonu. Należy stwierdzić, że beton niezależnie od rodzaju cementu (czysty lub z dodatkami mineralnymi, takimi jak popiół czy żużel wielkopieczowy) charakteryzuje się bardzo niskim poziomem radioaktywności naturalnej i z punktu widzenia ochrony radiologicznej może być bez obaw stosowany w wykonawstwie budynków przeznaczonych na stały pobyt ludzi i inwentarza żywego. Należy podkreślić, iż wskaźniki kwalifikacyjne f_1 i f_2 dla betonów nie przekraczają odpowiednio 20% i 10% dopuszczalnych wielkości dla pierwszej grupy kwalifikacyjnej ($f_1 = 1,2$ i $f_2 = 240$ Bq/kg)

Podsumowanie

Oceniając beton pod kątem oddziaływania na środowisko należy stwierdzić, że charakteryzuje się on niską zawartością związków, które mogą negatywnie wpływać na jego poszczególne elementy (wody, gleba).

Wymywalność metali ciężkich z betonu oraz jego składników stanowi niewielki procent dopuszczalnych stężeń metali ciężkich dla wód i ścieków wprowadzanych do środowiska. Z tego też względu bardzo często beton jest trwałą matrycą zastalającą metale ciężkie z odpadów, w tym także odpadów nieorganicznych niebezpiecznych.

Poziom radioaktywności betonu wykonanego z różnych cementów jest bardzo niski i nie stanowi żadnego zagrożenia radiologicznego, co pozwala na całkowicie bezpieczne stosowanie betonu w wykonawstwie obiektów przeznaczonych na ciągły pobyt zwierząt i ludzi.

dr inż. Anna Król
Politechnika Opolska
akrol@po.opole.pl

Literatura

- 1 PN-EN 197-1 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku

- 2 PN-EN 450 Popiół lotny do betonu. Definicje, wymagania i kontrola jakości
- 3 EN 13263-1 Silica fume for concrete – Part 1: Definitions, requirements and conformity criteria. Final draft – February 2005
- 4 Pr EN 15167-1 Ground granulated blastfurnace slag for use in concrete, mortar and grout – Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria
- 5 Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 lipca 2004 r. w sprawie ograniczeń, zakazów lub warunków produkcji, obrotu lub stosowania substancji niebezpiecznych i preparatów niebezpiecznych oraz zawierających je produktów. Dz. U. nr 168, 2004, poz. 1762
- 6 PN-EN 12457-1-4:2003 Charakteryzowanie odpadów – Wymywanie – Badanie zgodności dotyczące wymywania ziarnistych materiałów odpadowych i osadów
- 7 PN-Z-15009:1997 Odpady stałe. Przygotowanie wyciągu wodnego
- 8 Worksheet W 347 „Hygienic requirements for cement bound materials materials for drinking water supply – tests and evaluation” of the German Association for Gas and Water (DVGW, 2004)
- 9 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 lipca 2004 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego
- 10 J. Małolepszy, Z. Giergiczny, A. Król, Wiązanie metali ciężkich przez spoiwa mieszane. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2002, T. III, s. 49-56
- 11 A. Król, Immobilizacja metali ciężkich w matrycach wykonanych ze spoiw mieszanych, praca doktorska, Politechnika Częstochowska 2003
- 12 F. P. Glasser, Immobilization potential of cementitious materials. Proceeding of the International Conference on Environmental Implication of Construction Materials and Technology Developments, Maastricht 1994, pp. 77-86
- 13 S. R. Hillier, C. M. Sangha, B. A. Plunkett, P. J. Walden, Long-term leaching of toxic trace metals from Portland cement concrete, „Cement and Concrete Research”, Vol. 2, 1999, 515-521
- 14 J. Deja, Immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ and Pb²⁺ in alkali-activated slag binders, „Cement Concrete Research”, Vol 32, 1971-1979
- 15 M. Łaś, M. Kruk, Promieniotwórczość naturalna betonów komórkowych i popiołów lotnych zastosowanych do ich produkcji – badania i ocena zgodności zgodnie z nowymi przepisami, XIX Konferencja Naukowo-Techniczna Jadwisin 2004, s. 345-350
- 16 Instrukcja ITB 234: Badania promieniotwórczości naturalnej surowców i materiałów budowlanych, Warszawa 2003
- 17 Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 3 grudnia 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych 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. nr 220, poz. 1850

Wyjaśnienie

W kwartalniku „Budownictwo, Technologie, Architektura” nr 3/2005 ukazał się mój tekst pt. „Betony w projektowaniu ogrodów” (s. 20-22).

W tekście tym pojawiły się niewłaściwe podpisy pod dwiema fotografiami. Fotografia nr 2 pochodzi ze strony internetowej www.myspot.net, natomiast autorem fotografii nr 6 jest Jeroen Musch [w:] „Ogrody, ogródki i zieleńce” 2001, nr 5. Autorów zdjęć i Czytelników przepraszam.

Katarzyna Hodor