

mgr inż. Krzysztof Isajenko
mgr Barbara Piotrowska
mgr Olga Stawarz
Zakład Dozymetrii
Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

Łukasz Obigowski
Wydział Chemii
Uniwersytet Warszawski

dr Aneta Łukaszek-Chmielewska
Katedra Nauk Ścisłych
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego
Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Możliwość wykorzystania w budownictwie surowców odpadowych pochodzących z elektrociepłowni warszawskich (2005–2014)

Streszczenie

Żużel, popiół i mieszanina popiołowo-żużłowa stanowią surowce odpadowe wytwarzane w procesie spalania węgla w elektrociepłowniach. Po wykonaniu pomiarów stężeń naturalnych radionuklidów (potasu ^{40}K , radu ^{226}Ra i toru ^{228}Th) i obliczeniu wskaźników aktywności f_1 i f_2 , a następnie zgodnej z przepisami prawnymi kwalifikacji, surowce te mogą być wykorzystane do produkcji materiałów budowlanych.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej prowadzi bazę danych, zawierającą wyniki pomiarów stężenia naturalnych radionuklidów w próbkach surowców i materiałów budowlanych mierzonych na miejscu oraz w ponad 30 laboratoriach w Polsce od 1980 roku do chwili obecnej. W artykule dokonano analizy wyników badań surowców odpadowych (żużel, popiół i mieszanina popiołowo-żużłowa) pochodzących z trzech elektrociepłowni w Warszawie pod kątem określenia zagrożenia radiologicznego dla człowieka i możliwości wykorzystywania tych surowców w różnych rodzajach budownictwa.

Słowa kluczowe: radioaktywność naturalna, ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Th , żużel, popiół, mieszanina popiołowo-żużłowa, surowce budowlane

Possibilities of Re-using Raw Waste Materials from Warsaw Power Plant in Building Construction Sector (2005–2014)

Abstract

Slag, ash and a mixture of ash and slag are the waste materials produced by the combustion of coal in power plants. After the measurement of natural radionuclides (potassium ^{40}K , ^{226}Ra and thorium ^{228}Th) concentration and the calculation of activity indicators f_1 and f_2 , and then in accordance with legal qualifications, these materials may be used for the production of building materials.

Central Laboratory for Radiological Protection maintains a database containing the results of measurements of natural radionuclides concentration in samples of raw and building materials measured in CLOR and in more than 30 laboratories in Poland from 1980 up to now.

This paper presents an analysis of measurements results of waste materials (slag, ash and a mixture of ash and slag) from three power plants in Warsaw for determining the radiological risk to population and the possibility of their use in various types of construction.

Key words: natural radioactivity, ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Th , slag, ash, mixture of ash and slag, building materials

1. WSTĘP

Promieniowanie jonizujące jest wszechobecne w otaczającym nas świecie. Codziennie jesteśmy narażeni na niewielkie dawki promieniowania pochodzące od znajdujących się w środowisku naturalnych radionuklidów, takich jak: potas ^{40}K , rad ^{226}Ra , czy tor ^{228}Th . Stanowią one tzw. naturalne tło promieniowania. Stężenia tych nuklidów przyjmują odmienne wartości w różnych rejonach kraju, co jest wynikiem zróżnicowanych, zarówno naturalnych, jak i sztucznie zmienionych przez człowieka warunków środowiskowych.

Surowce naturalne, takie jak węgiel kamienny, węgiel brunatny czy ropa naftowa, także nie są pozbawione tych radionuklidów, a odpady powstające po ich przetworzeniu bardzo często mają znacznie podwyższoną zawartość tych izotopów. Wartości średnie i zakresy stężeń radionuklidów naturalnych w węglu wydobywanym na terenie Polski przedstawiają się następująco:

- dla węgla kamiennego:
 ^{40}K : 147,0 Bq/kg; (4,9–398,0) Bq/kg
 ^{226}Ra : 23,5 Bq/kg; (2,8–91,4) Bq/kg
 ^{228}Th : 17,9 Bq/kg; (1,0–36,0) Bq/kg.
- dla węgla brunatnego:
 ^{40}K : 38,3 Bq/kg; (4,6–154,0) Bq/kg
 ^{226}Ra : 9,2 Bq/kg; (0,4–23,6) Bq/kg
 ^{228}Th : 7,9 Bq/kg; (1,1–23,1) Bq/kg.

Elektrociepłownie znajdujące się na terenie Warszawy wytwarzają w procesie spalania węgla odpady takie jak żużel, popiół i mieszanina popiołowo-żużlowa. Są one następnie wykorzystywane jako surowce przemysłowe w szeroko pojętym budownictwie.

W celu zebrania danych nt. zmierzonych przez Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej i ponad 30 innych placówek pomiarowo-badawczych w naszym kraju próbek surowców i materiałów budowlanych oraz ich sklasyfikowania, została utworzona ogólnopolska baza danych. Zawiera ona wyniki badań radioaktywności naturalnej surowców i materiałów budowlanych prowadzonych od 1980 roku do chwili obecnej. W niniejszym opracowaniu przeanalizowano wyniki z bazy danych w celu określenia, czy surowce wytwarzane ze spalania węgla przez elektrociepłownie warszawskie (żużel, popiół i mieszanina popiołowo-żużlowa) stwarzają zagrożenie radiologiczne dla człowieka i w jakim stopniu mogą być wykorzystywane do różnych rodzajów budownictwa.

2. PRZEPISY PRAWNE

Badania surowców i materiałów budowlanych (w tym także surowców odpadowych) wykonano, stosując analizatory typu MAZAR oraz AZAR połączone z sondą scyntylicyjną NaI(Tl). Są to analizatory pracujące w trzech zakresach pomiarowych, które pozwalają na wyznaczenie wskaźników aktywności f_1 i f_2 oraz stężeń radioaktywności następujących radioizotopów: ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Th . Okna pomiarowe analizatorów zawierają się w przedziałach energii: okno ^{40}K – od 1,26 MeV do 1,65 MeV, okno ^{226}Ra – 1,65 MeV do 2,30 MeV i okno ^{228}Th – 2,30 MeV do 2,85 MeV. Kalibracja wydajności detektora oparta jest na pomiarach trzech objętościowych wzorców kalibracyjnych: ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Th oraz pomiarze matrycy wzorców (jako pomiaru tła). Geometrię źródeł

wzorcowych stanowią pojemniki typu Marinelli o pojemności 1,5 dm³. Gęstość źródeł wzorcowych wynosi 1,6 g/cm³, natomiast gęstość mierzonych próbek surowców i materiałów budowlanych zawiera się w przedziale od 0,6 do 2,0 g/cm³. W celu zminimalizowania tła zewnętrznego, detektor umieszczony jest w domku osłonnym z ołowiu o grubości ścian 50 mm. Rozdrobnione i przesiane przez sito o grubości oczek 2 mm próbki pakowane są do pojemników typu Marinelli o pojemności 1,5 dm³ i następnie szczelnie zamykane. Próbkę są badane dopiero po ustaleniu się równowagi promieniotwórczej pomiędzy ²²⁶Ra i ²¹⁴Bi oraz ²²⁸Th i ²⁰⁸Tl, po czasie około 5 do 14 dni. Pomiar wykonywane są jednokrotnie dla każdej próbki w tej samej geometrii pomiarowej [1].

Podstawowym aktem prawnym określającym wymagania stawiane surowcom i materiałom budowlanym stosowanym w różnych rodzajach budownictwa jest Rozporządzenie z 2 stycznia 2007 roku „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”. [2]

Rozporządzenie to klasyfikuje surowce i materiały budowlane pod kątem ich zastosowania w różnych typach budownictwa, poprzez określenie dwóch parametrów:

1. Wskaźnika aktywności f_1 , określającego zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych (jest to wskaźnik narażenia całego ciała na promieniowanie gamma), zdefiniowanego za pomocą wzoru:

$$f_s = \frac{S_K}{3000} + \frac{S_{Ra}}{300} + \frac{S_{Th}}{200} \quad (1)$$

gdzie: S_K , S_{Ra} , S_{Th} oznaczają odpowiednio stężenie promieniotwórcze izotopów potasu ⁴⁰K, radu ²²⁶Ra oraz toru ²²⁸Th wyrażone w Bq/kg

2. Wskaźnika aktywności f_2 , który określa zawartość radu ²²⁶Ra (jest to wskaźnik narażenia nabłonka płuc na promieniowanie alfa emitowane przez produkty rozpadu radonu pobrane wraz z powietrzem przez układ oddechowy człowieka):

$$f_2 = S_{Ra} \quad (2)$$

W zależności od wartości tych dwóch wskaźników, badany materiał może być stosowany w różnych typach budownictwa. Wartości wskaźników aktywności f_1 oraz f_2 nie mogą przekraczać o więcej niż 20% wartości:

- 1) $f_1 = 1$ i $f_2 = 200$ [Bq/kg] w odniesieniu do surowców i materiałów budowlanych stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi lub inwentarza żywego;
- 2) $f_1 = 2$ i $f_2 = 400$ [Bq/kg] w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w obiektach 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 punkcie 2. oraz do niwelacji terenów niewymienionych w punkcie 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 punkcie 3. oraz w budowlach podziemnych, w tym w tunelach kolejowych i drogowych, z wyłączeniem odpadów przemysłowych wykorzystywanych w podziemnych wyrobiskach górniczych.

Dodatkowo przy stosowaniu odpadów przemysłowych do niwelacji terenów, o których mowa w punktach 2. i 3. oraz do budowy dróg, obiektów sportowych i rekreacyjnych zapewnia się, przy zachowaniu wymaganych wartości wskaźników f_1 i f_2 , obniżenie mocy dawki pochłoniętej na wysokości 1 m nad powierzchnią terenu, drogi lub obiektu do wartości nieprzekraczającej $0,3 \mu\text{Gy/h}$, w szczególności przez położenie dodatkowej warstwy innego materiału [2].

Przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania surowców odpadowych pochodzących z elektrociepłowni (popiołów, żużli i mieszaniny popiołowo-żużlowej) do budownictwa mieszkaniowego (patrz pkt. 1.) oraz drogowego, czy budynków użyteczności publicznej (patrz pkt. 2 [2]. RRM) a także sprawdzono, w jakim stopniu wskaźniki aktywności f_1 i f_2 określone dla tych odpadów spełniają kryteria podane w przytaczanym Rozporządzeniu.

3. WYNIKI BADAŃ RADIOAKTYWNOŚCI NATURALNEJ SUROWCÓW PRZEMYSŁOWYCH POCHODZĄCYCH Z ELEKTROCIĘPŁOWNI

Surowce przemysłowe (odpadowe) powstające w elektrociepłowniach warszawskich to produkty uboczne powstające wskutek spalania węgla kamiennego. Produkty te dzieli się na trzy kategorie: żużel, popiół i mieszanina popiołowo-żużlowa. Średnia zawartość naturalnych radionuklidów w węglu kamiennym jest zbliżona do wartości, jakie charakteryzują glebę w Polsce. W procesie spalania dochodzi do znacznego zagęszczenia tych nuklidów, co sprawia, że odpady mają kilkukrotnie zwiększoną ich zawartość. Wielkość tego wzrostu bezpośrednio zależy od rodzaju pieca, w jakim jest spalany surowiec, jakości spalanego węgla, wydajności procesu spalania oraz wielu innych czynników [3]. W Warszawie aktualnie działają trzy elektrociepłownie dostarczające surowców przemysłowych: Kawęczyn, Siekierki i Żerań. Na podstawie danych z lat 2005–2014 wszystkie one dostarczały popiół dla przemysłu, a dwie (Siekierki i Żerań) także żużel i mieszaninę popiołowo-żużlową.

Stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu ^{40}K , radu ^{226}Ra i toru ^{228}Th w surowcach przemysłowych pochodzących z elektrociepłowni warszawskich wyprodukowanych w latach 2005–2014 zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości średnie i zakresy stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych w surowcach przemysłowych pochodzących z elektrociepłowni warszawskich (2005–2014)

Elektro- ciepłownia	Liczba zmiierzonych próbek	Stężenie [Bq/kg]					
		^{40}K		^{226}Ra		^{228}Th	
		zakres	średnia	zakres	średnia	zakres	średnia
<i>popiół</i>							
Kawęczyn	27	356–673	602	47,4–276	151	39,0–93,6	80,4
Siekierki	281	412–914	681	61,4–205	128	51,5–145	97,0
Żerań	88	279–1100	669	42,1–257	118	41,3–142	84,3

cd. Tabeli 1.

Elektro- ciepłownia	Liczba zmiierzonych próbek	Stężenie [Bq/kg]					
		⁴⁰ K		²²⁶ Ra		²²⁸ Th	
		zakres	średnia	zakres	średnia	zakres	średnia
<i>żużel</i>							
Siekierki	121	254–731	564	57,3–124	87,4	52,9–113	79,9
Żerań	13	364–691	570	44,2–113	83,7	39,1–89,7	69,5
<i>mieszanina popiołowo-żużłowa</i>							
Siekierki	3	499–550	518	78,0–99,0	86,4	64,1–76,0	68,4
Żerań	48	180–730	551	11,5–127	79,6	12,0–87,8	66,2

Źródło: opracowanie własne

Największy wzrost stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych w stosunku do zawartości tych radionuklidów w węglu kamiennym zaobserwowano dla popiołu. W tym produkcie spalania węgla występuje 4–6-krotne zwiększenie zawartości ⁴⁰ K, ²²⁶ Ra, czy ²²⁸ Th. Najmniej wzbogacona pod względem izotopowym jest mieszanina popiołowo-żużłowa. Prawdopodobnie ta jest zauważalna dla każdej z elektrociepłowni.

Wartości wskaźników aktywności f_1 i f_2 wyliczonych na podstawie stężeń naturalnych radionuklidów ⁴⁰ K, ²²⁶ Ra i ²²⁸ Th w surowcach przemysłowych pochodzących z elektrociepłowni warszawskich wyprodukowanych w latach 2005–2014 zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości średnie i zakresy wskaźników aktywności f_1 i f_2 dla surowców przemysłowych pochodzących z elektrociepłowni warszawskich (2005–2014)

Elektrociepłownia	f_1		f_2 [Bq/kg]	
	zakres	średnia	zakres	średnia
<i>Popiół</i>				
Kawęczyn	0,47–1,55	1,10	47,4–276	151

cd. Tabeli 2.

Elektrociepłownia	f_1		f_2 [Bq/kg]	
	zakres	średnia	zakres	średnia
Popiół				
Siekierki	0,65–1,54	1,13	61,4–205	128
Żerań	0,51–1,57	1,03	42,1–257	118
Żużel				
Siekierki	0,47–1,12	0,88	57,3–124	87,4
Żerań	0,46–1,01	0,81	44,2–113	83,7
mieszanina popiołowo-żużlowa				
Siekierki	0,75–0,89	0,80	78–99	86,4
Żerań	0,16–0,99	0,78	11,5–127	79,6

Źródło: opracowanie własne

Analizując dane zawarte w tabeli 2, można zauważyć, że najmniejsze wartości wskaźników aktywności f_1 i f_2 mają surowce pochodzące z EC Żerań i dla większości badanych próbek nie zostały przekroczone wartości graniczne tych wskaźników określone w Rozporządzeniu [2]. Popioły wytwarzane przez EC Kawęczyn i EC Siekierki charakteryzują średnie wartości wskaźnika aktywności f_1 przekraczające wartość 1 o mniej niż 20% i średnie wartości wskaźnika aktywności f_2 nie przekraczające wartości 200 Bq/kg. Zakres wartości f_1 i f_2 jest jednak dosyć szeroki dla poszczególnych rodzajów surowców. Różnice w wartościach wskaźników aktywności mogą być spowodowane różnymi procesami technologicznymi wykorzystywanymi w porównywanych zakładach oraz różną jakością węgla, który prawdopodobnie pochodzi od innych dostawców.

4. OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SUROWCÓW W BUDOWNICTWIE

Z uwagi na to, że czas przebywania ludzi w budynkach mieszkalnych szacuje się na 80%, surowce wykorzystywane bezpośrednio do budowy, jak i do

wytwarzania materiałów budowlanych nie mogą zawierać zbyt dużej ilości naturalnych radionuklidów, aby nie spowodować niepotrzebnego narażenia na otrzymanie podwyższonej dawki promieniowania jonizującego. W tym celu, zgodnie z Rozporządzeniem [2], obliczane są wskaźniki aktywności f_1 i f_2 i na ich podstawie określa się, czy dany surowiec można wykorzystać w budownictwie i w jakim rodzaju. Surowce, które nie nadają się do budowy budynków mieszkalnych, znajdują zastosowanie między innymi przy budowie dróg [4].

Dane zawierające liczbowy i procentowy udział partii surowców do wykorzystania w budownictwie mieszkaniowym (wskaźniki aktywności $f_1 \leq 1,2$ i $f_2 \leq 240$ Bq/kg) lub przy budowie obiektów użyteczności publicznej, czy dróg ($1,2 < f_1 \leq 2,4$ i 240 Bq/kg $< f_2 \leq 480$ Bq/kg) zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Kwalifikacja próbek surowców przemysłowych pochodzących z elektrociepłowni warszawskich do wykorzystania w różnych typach budownictwa (2005–2014)

Elektro- ciepłownia	Liczba zmiierzonych próbek	Kwalifikacja surowców przemysłowych do budownictwa mieszkaniowego ($f_1 \leq 1,2$ i $f_2 \leq 240$ Bq/kg)		Kwalifikacja surowców przemysłowych do budowy dróg i naziemnych obiektów użyteczności publicznej ($1,2 < f_1 \leq 2,4$ i 240 Bq/kg $< f_2 \leq 480$ Bq/kg)	
		Liczba próbek	%	Liczba próbek	%
popiół					
Kawęczyn	27	19	70,4	8	29,6
Siekierki	281	157	55,9	124	44,1
Żerań	88	72	81,8	16	18,2
żużel					
Siekierki	121	121	100	0	0
Żerań	13	13	100	0	0
mieszanina popiołowo-żużłowa					
Siekierki	3	3	100	0	0
Żerań	48	48	100	0	0

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie danych z tabeli 3, można stwierdzić, że wszystkie partie żużłu i mieszaniny popiołowo-żużlowej spełniają warunki pozwalające na wykorzystanie tych surowców w budownictwie mieszkaniowym (wskaźniki aktywności $f_1 \leq 1,2$ i $f_2 \leq 240$ Bq/kg).

Natomiast dla popiołu otrzymano wskaźniki aktywności f_1 i f_2 przekraczające w pewnym stopniu wartości graniczne ustalone dla surowców i materiałów wykorzystywanych w budownictwie mieszkaniowym. Przekroczenia tych wskaźników są jednak na tyle niewielkie, że popiół można stosować np. do budowy obiektów użyteczności publicznej czy dróg (pkt. 2 [2]).

Najniższymi wartościami wskaźników aktywności f_1 i f_2 charakteryzuje się popiół wytworzony przez EC Żerań – 81,8% próbek reprezentatywnych dla danej partii surowca nadaje się do wykorzystania w budownictwie mieszkaniowym, zaś najwyższymi – popiół z EC Siekierki – 55,9% próbek reprezentatywnych można wykorzystać w budownictwie mieszkaniowym. Pozostała część próbek reprezentatywnych dla partii surowców odpadowych z elektrociepłowni warszawskich nie nadaje się do budowy obiektów przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, ale może być wykorzystana w innych typach budownictwa opisanych w pkt. 2 [2].

5. OCENA NARAŻENIA WYNIKAJĄCEGO ZE STOSOWANIA SUROWCÓW ODPADOWYCH Z ELEKTROCIEPŁOWNI W BUDOWNICTWIE

Dzięki dokładnym pomiarom stężeń naturalnych radionuklidów w surowcach i materiałach budowlanych można ocenić narażenie człowieka na promieniowanie jonizujące. Kontrola próbek pozwala na stosowanie surowców lub materiałów budowlanych w sposób nie zagrażający bezpieczeństwu ludności. Na podstawie wyników pomiarów stężeń ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Th obliczono moc dawki promieniowania gamma, która daje pełny pogląd na to, jakie narażenie powodują poszczególne surowce i materiały.

Moc dawki promieniowania gamma obliczono stosując następujący wzór półempiryczny:

$$D = 0,043S_K + 0,43S_{Ra} + 0,66S_{Th} \quad (3)$$

gdzie: S_K , S_{Ra} , S_{Th} – stężenia w [Bq/kg] odpowiednio ^{40}K , ^{226}Ra (w równowadze promieniotwórczej z jego izotopami pochodnymi) oraz ^{228}Th (w równowadze promieniotwórczej z jego izotopami pochodnymi).

Wartości średnie i zakresy mocy dawki dla poszczególnych surowców odpadowych pochodzących z warszawskich elektrociepłowni (2005–2014) zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Moc dawki promieniowania jonizującego wyznaczona dla próbek surowców pochodzących z warszawskich elektrociepłowni wyprodukowanych w latach 2005–2014

Elektrociepłownia	Moc dawki [nGy/h]	
	zakres	średnia
<i>popiół</i>		
Kawęczyn	62–202	145
Siekierki	86–201	149
Żerań	67–205	136
<i>żużel</i>		
Siekierki	80–147	116
Żerań	61–132	107
<i>mieszanina popiołowo-żużlowa</i>		
Siekierki	99–117	105
Żerań	21–129	103

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie danych zawartych w tabeli 4 można stwierdzić, że najmniejsza moc dawki pochodzi od mieszaniny popiołowo-żużlowej, natomiast największe wartości obserwujemy dla czystego popiołu. Jeśli weźmie się pod uwagę moc dawki dla surowców pochodzących z poszczególnych elektrociepłowni, to można zauważyć, że najwyższe wartości uzyskiwane są dla próbek pochodzących z EC Siekierki, a najniższe dla próbek z EC Żerań. Dla wszystkich próbek poddanych analizie moc dawki nie przekraczała wartości

300 nGy/h, określonej w Rozporządzeniu [2] dla surowców stosowanych do budowy dróg i niwelacji terenów, dzięki czemu można wykorzystać te surowce odpadowe w budownictwie bez konieczności zastosowania dodatkowej wierzchniej warstwy innego materiału o niższych wartościach wskaźników aktywności f_1 i f_2 .

6. PODSUMOWANIE

Dokładna kontrola surowców pochodzących z warszawskich elektrociepłowni pozwala uniknąć sytuacji, w której do budownictwa trafiłyby materiały o niedozwolonych przepisami prawnymi wartościach wskaźników aktywności f_1 i f_2 (spowodowanych wysokimi stężeniami naturalnych radionuklidów). Pomiary pozwalają zakwalifikować wszystkie surowce do odpowiednich kategorii, dzięki czemu łatwo można stwierdzić, które z nich można stosować w budownictwie mieszkaniowym, które w drogowym bądź innych rodzajach budownictwa użyteczności publicznej, a których nie można używać do budownictwa naziemnego.

Opierając się na wynikach przedstawionych w niniejszym opracowaniu, można stwierdzić, że najniższą zawartością naturalnych radionuklidów charakteryzuje się mieszanina popiołowo-żużłowa i żużel. Dla tych próbek nie obserwuje się przekroczenia wartości wskaźników f_1 i f_2 pozwalających na wykorzystanie danego surowca w budownictwie mieszkaniowym. Wartości mocy dawki promieniowania gamma dla próbek żużla i mieszaniny popiołowo-żużłowej są niższe niż dla próbek popiołu.

Z kolei najbardziej wzbogacony o naturalne radionuklidy okazuje się popiół. Dla znacznej części próbek zaobserwowano przekroczenie dopuszczalnej wartości wskaźników aktywności f_1 i f_2 , określonych dla budownictwa mieszkaniowego. Jednak przekroczenia są na tyle niewielkie, że można te surowce z powodzeniem zastosować na przykład przy budowie obiektów naziemnych użyteczności publicznej czy dróg.

Podsumowując, warszawskie elektrociepłownie wytwarzają w procesie spalania węgla surowce odpadowe, które nie stwarzają realnego zagrożenia radiologicznego dla ludności i mogą być wykorzystywane w różnych rodzajach budownictwa, w tym w znacznej mierze w budownictwie mieszkaniowym.

LITERATURA

- [1] L. Brunarski, M. Dohojda, Badania promieniotwórczości naturalnej wyrobów budowlanych. Poradnik nr 455/2010, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2010.
- [2] Rozporządzenie Rady Ministrów z 2 stycznia 2007 roku 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 (DzU 2004, nr 4, poz. 29).
- [3] A. Żak, K. Isajenko, B. Piotrowska, M. Kuczbajska, A. Ząbek, T. Szczygielski, Natural radioactivity of waste, *Nukleonika* 2008, nr 55(3), s. 387–391.
- [4] B. Piotrowska, K. Isajenko, M. Fajak, J. Szymczyk, M. Krajewska, Budujemy dom... – ocena promieniotwórczości naturalnej wybranych surowców i materiałów budowlanych, *Postępy Techniki Jądrowej* 2015, nr 58, z. 4, s. 17–21.