

Laboratoryjne badania żużla ze spalania odpadów komunalnych dla zastosowań w budownictwie drogowym

mgr Gabriel Martysz, Laboratorium Drogowe P.P.H.U. FOREQ, Powidz,
dr inż. Szymon Węgliński, Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Poznańska

1. Wprowadzenie

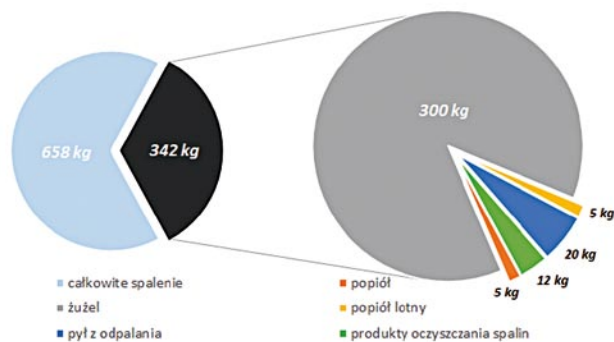
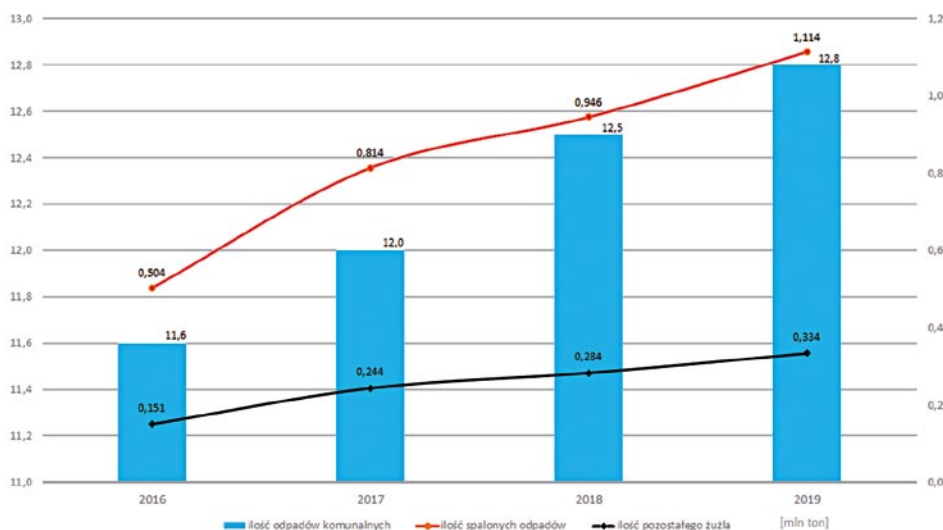
Rosnący udział przewozów drogowych w transporcie dóbr i usług powoduje przyspieszoną degradację nawierzchni dróg. W związku z koniecznością przebudowy i modernizacji istniejących dróg krajowych, powiatowych czy gminnych występuje rosnące zapotrzebowanie na kruszywa przeznaczone na warstwy konstrukcyjne. Ze względu na kosztowność transportu oraz ograniczony dostęp do kruszyw naturalnych warto skorzystać z dostępności kruszyw alternatywnych – sztucznych i recyklingowych. Normy i przepisy europejskie dopuszczają zastosowanie materiałów odpadowych, np. z przemysłu energetycznego czy odpadowego oraz materiałów już wcześniej wykorzystanych w budownictwie, a poddanych recyklingowi [10, 14, 18]. W artykule przedstawiono badania dwóch żużli po spaleniu odpadów komunalnych, przeznaczonych na warstwy niezwiązane konstrukcji nawierzchni drogowych.

2. Charakterystyka żużla ze spalania odpadów komunalnych

2.1. Pochodzenie materiału

W Polsce, zgodnie ze statystykami udostępnionymi przez GUS [2, 3, 11], w ostatnich latach można zaobserwować przyrost odpadów komunalnych, z których coraz większa ilość podlega termicznemu przekształceniu. Historycznie, pierwsze spalarnie w Polsce powstały w Warszawie (1912 r.) oraz Poznaniu (1927 r.), jednak w wyniku działań wojennych uległy częściowemu zniszczeniu i zostały wyłączone z użytku [8]. W 2001 roku powstała nowa spalarnia w Warszawie, zaś od 2013 roku

Rys. 2. Dane statystyczne dotyczące odpadów komunalnych i produktów spalania (opracowanie własne na podstawie [2, 3, 8, 11])



Rys. 1. Bilans mas po przekształceniu termicznym (opracowanie własne na podstawie [9])

wybudowano kolejnych 7 nowoczesnych obiektów, których zadaniem jest przekształcenie odpadów komunalnych i ich utylizacja z jednoczesnym wytworzeniem energii. Wydajność roczna poszczególnych obiektów wynosi od 40 do 220 tys. ton śmieci, zaś łącznie można przekształcić ok. 1,114 mln ton odpadów [8]. Zgodnie z danymi Wielgosińskiego [9] spalarnia pozwala na redukcję masy odpadów, z każdej 1 tony wsadu do ok. 340 kg pozostałości stałych (rys. 1). Największy udział w uzyskiwanych produktach spalania ma żużel (zwany również popiołem dennym, IBS). Ilość powstałych produktów w wyniku termicznego przekształcania odpadów przedstawiono na rysunku 2.

Żużle zgodnie z definicją [10] są stałą pozostałością usuniętą z pieca po spalaniu odpadów komunalnych. Powinny zawierać nie więcej niż 3% niespalonych substancji (odniesionych wagowo w stosunku do masy wsadu). W skład żużla wchodzi również następujące substancje: do 10% żelaza i metali nieżelaznych oraz do 7% frakcji gruboziarnistej i do 83% frakcji drobnoziarnistej [6], w ramach których wyróżnić należy ceramikę, szkło, plastiki, substancje włókniste oraz drewno.

Aby żużel mógł być wykorzystany jako kruszywo sztuczne, nie powinien zawierać substancji niebezpiecznych, takich jak metale ciężkie, siarczany, chlorki czy węglowodory aromatyczne, aby w razie przedostania się do środowiska (np. wodnego) nie spowodować jego zanieczyszczenia. Dlatego podlega waloryzacji (immobilizacji), której celem jest chemiczne przekształcenie odpadu niebezpiecznego w odpad obojętny lub inny niż niebezpieczny [6]. Ze składu wydzielane są metale, które mogą zostać poddane recyklingowi. Następnie wymagany jest okres odgazowania („leżakowania”) żużla na hałdach, najlepiej na otwartym powietrzu, w celu zakończenia się procesu stabilizacji reakcji chemicznych (trwający ok. 3 miesiące). W kolejnym procesie produkcji kruszywa ma miejsce kruszenie oraz wielokrotne przesiewanie pozwalające na usunięcie zanieczyszczeń wraz z frakcjonowaniem na sitach oraz składowanie [5]. Po przekształceniach, zgodnie z Katalogiem odpadów [17], żużel uzyskuje kod 19 01 12 i może być wykorzystany – np. w budownictwie drogowym.

2.2. Przegląd literatury

Spalanie odpadów pozwala na odzysk energii, gdyż nowoczesne spalarnie są elementem w gospodarce zrównoważonej, czyli takiej, która wykorzystuje procesy spalania na uzyskanie energii cieplnej lub elektrycznej, a także na oszczędności wyczerpujących się zasobów paliw kopalnych i kruszyw naturalnych [1, 7].

Zgodnie z klasyfikacją kruszyw według norm europejskich w zakresie budownictwa [13, 14] kruszywo z termicznego przekształcenia zalicza się do kruszyw sztucznych, które może być stosowane na równi z kruszywami naturalnymi, przy uwzględnieniu właściwości mechanicznych i chemicznych [5]. Produkty spalania odpadów komunalnych mogą być zastosowane w przemyśle. Popioły lotne mogą być dodane jako składniki cementu, zaś żużle mogą stanowić materiały na warstwy konstrukcyjne nawierzchni drogowych – np. podbudowy niezwiązane lub związane spoiwami hydraulicznymi. Stosowane mogą być wyłącznie materiały uznane za odpady inne niż niebezpieczne.

Przekształcony żużel może być zastosowany jako materiał budowlany, zwłaszcza w branży cementowej, jako materiał wypełniający strukturę zapraw i betonów, w przewodzie niewykazujący właściwości pucolanowych, a wydłużający czas wiązania cementu. Granulowany żużel może być też wykorzystany jako kruszywo do betonu, jednak w przypadku

stwierdzenia związków siarki i niespalonego węgla może powodować obniżenie wytrzymałości na ściskanie oraz mieć tendencję do skurczu lub pęcznienia [1, 4].

Potencjalne zastosowanie żużla w materiałach budowlanych czy drogowych warstwach konstrukcyjnych wymaga jednorodności materiału. Odpady komunalne z gospodarstw domowych charakteryzują się powtarzalnością, jednak ostateczny skład żużla zależy od skuteczności spalania poszczególnych składników. Ważne jest, aby przed powszechnym zastosowaniem żużla ocenić jego przydatność oraz powtarzalność cech fizyko mechanicznych. Zakres wybranych badań kwalifikacyjnych dla zastosowań na mieszanki niezwiązane w budownictwie drogowym przedstawiono w dalszej części artykułu. Badaniom poddano dwa rodzaje żużla, pierwszy pochodzący ze spalarni bydgoskiej, o frakcji 0/8 mm oraz drugi, uzyskany w Warszawie, o frakcji 0/31,5 mm. Przydatność badanych materiałów oceniono zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-4:2010 [12]. Kruszywo drobniejsze (0/8 mm, oznaczone jako A) oceniono dla zastosowania na kruszywową warstwę ścieralną nawierzchni, a kruszywo grubsze (0/31,5 mm, oznaczone jako B) na warstwę podbudowy zasadniczej nawierzchni.

3. Ocena przydatności żużla spalarnianego do zastosowań budownictwa drogowego

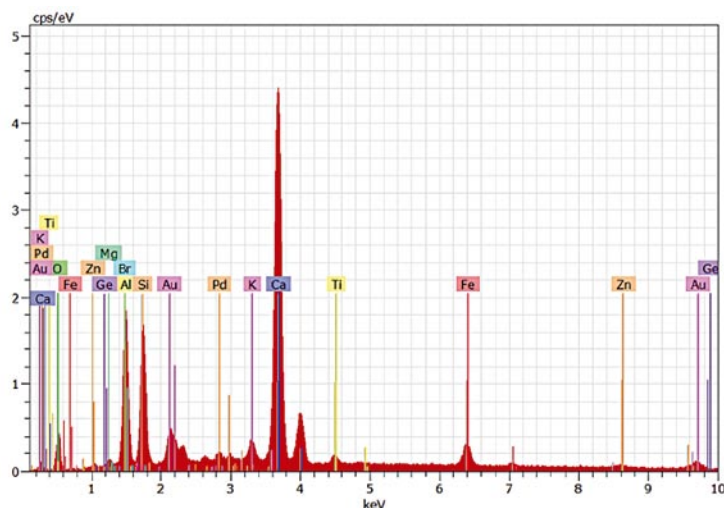
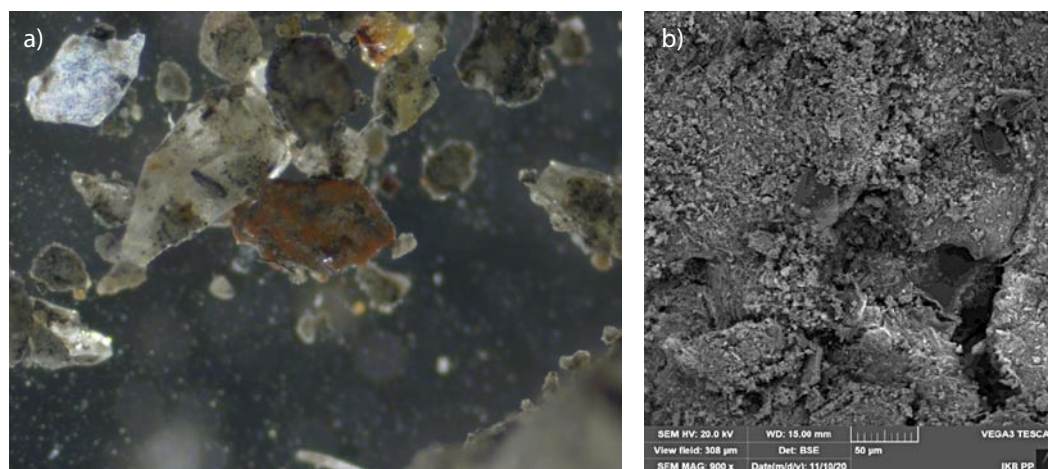
3.1. Ocena jednorodności składu kruszywa

Podstawowym badaniem określonym dla mieszanek kruszyw sztucznych lub recyklingowych zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-4 [12] jest wizualna ocena składu po przemyciu i suszeniu. Zdaniem autorów artykułu przed zastosowaniem na warstwy konstrukcyjne, oprócz wizualnej oceny składu, należy precyzyjnie rozpoznać ewentualną obecność szkodliwych dla otoczenia związków niebezpiecznych. Narzędziami do laboratoryjnej oceny są wykorzystanie lupy binokularnej oraz analizy chemicznej pod mikroskopem SEM, a także badania wymywania związków chemicznych.

W składzie analizowanego żużla potwierdzono obecność ziarnistych materiałów nieorganicznych, a także szkła oraz substancji włóknistych (rys. 3a). Ponadto analiza SEM wykazała obecność metali oraz pierwiastków, takich jak: wapień, krzem, glin, żelazo, potas (rys. 4). Strukturę żużla w badaniu mikroskopowym zilustrowano na rysunku 3b. W przedstawionym badaniu mikroskopowym stwierdzono obecność dominujących konglomeratów glino-krzemiano-wapniowych, jednak z uwagi na zróżnicowanie składników udział poszczególnych składników nie jest powtarzalny dla wszystkich przeprowadzonych obserwacji.

W badaniach promieniotwórczości naturalnej oraz wymywania stwierdzono obecność metali ciężkich. Zawartość poszczególnych substancji zestawiono w tabeli 1. Maksymalne wartości dopuszczalne pierwiastków oraz promieniotwórczości naturalnej dla zapewnienia odpowiednich

Rys. 3. Widok żuźla
a) w badaniu lupą binokularną b) SEM (opracowanie własne)



Rys. 4. Skład przykładowej próbki żuźla w ocenie chemicznej z zastosowaniem SEM (opracowanie własne)

warunków higieniczno-zdrowotnych w pomieszczeniach budowlanych określone przepisami [15, 16] nie zostały przekroczone, co oznacza, iż badane żuźle nie stanowią zagrożenia dla ludzi i zwierząt oraz nie są traktowane jako materiały niebezpieczne.

3.2. Oznaczenia cech fizykomechanicznych

W celu zastosowania żuźla pochodzącego ze spalania odpadów komunalnych jako kruszywa sztucznego oba materiały przebadano zgodnie z wymaganiami [12], a wyniki przeprowadzonych oznaczeń zestawiono w tabeli 2. W ramach podstawowych badań wykonano:

- ocenę uziarnienia – analizę sitową – przesiewy wraz z polem dobrego uziarnienia według [12] przedstawiono na rysunku 5,
- oznaczenie wskaźnika piaskowego, który pozwala na ocenę wysadzinowości kruszywa, czyli możliwości powstania szkód mrozowych przy obniżonej temperaturze,
- nasiąkliwość oraz mrozoodporność kruszywa,
- odporność na rozdrabnianie w bębnie Los Angeles,
- odporność na ścieranie mikro-Devala,

Tabela 1. Skład pierwiastków oraz promieniotwórczość żuźla

		Zawartość metali ciężkich [mg/dm ³]		
		dopuszczalna	A - 0/8	B - 0/31,5
Chrom	Cr	< 0,5	0,005	0,052
Cynk	Zn	< 2,0	0,058	0,025
Kadm	Cd	< 0,4	< 0,001	< 0,001
Miedź	Cu	< 0,5	0,029	0,038
Nikiel	Ni	< 0,5	< 0,004	< 0,001
Ołów	Pb	< 0,5	0,025	0,018
Żelazo	Fe	< 10,0	< 0,005	< 0,005
Promieniotwórczość naturalna				
		dopuszczalna	A - 0/8	B - 0/31,5
wskaźnik aktywności f1 [-]		< 1,2	< 0,39	< 0,61
wskaźnik aktywności f2 [Bq/kg]		< 240	< 40,7	< 75,3

- wskaźniki kształtu kruszywa,
- zawartość pyłów.

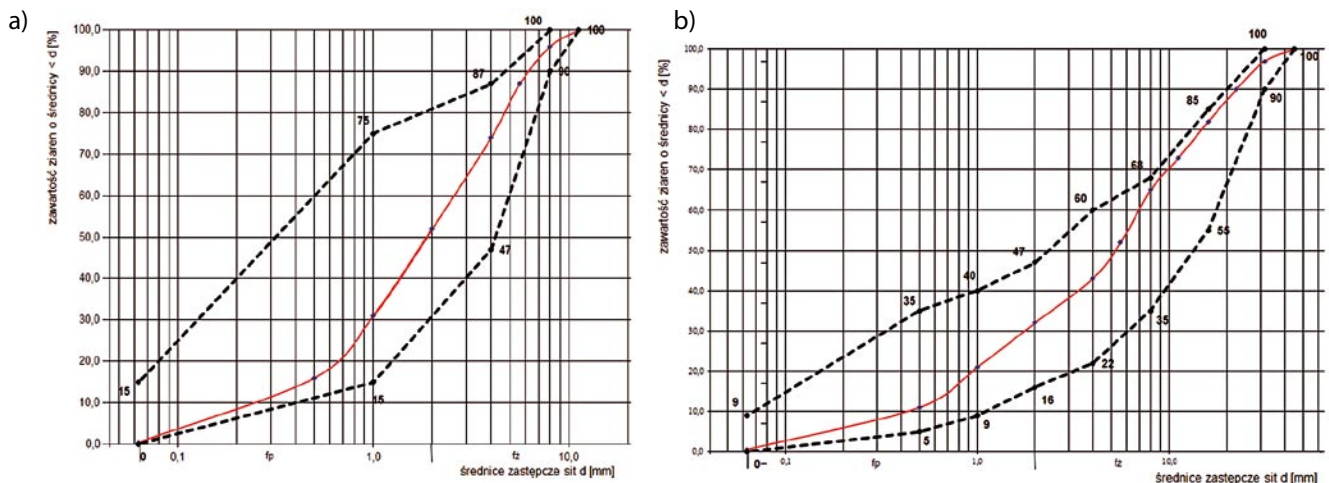
Żużel ze spalarni bydgoskiej, o uziarnieniu 0/8 mm, charakteryzuje się wysokimi parametrami mechanicznymi i spełnia wymagania techniczne WT-4 w zakresie przydatności na warstwę niezwiązaną kruszywową nawierzchni drogowej.

Żużel ze spalarni warszawskiej, o uziarnieniu 0/31,5 mm, charakteryzuje się również wysokimi parametrami mechanicznymi i spełnia wymagania techniczne WT-4 w zakresie przydatności na warstwę kruszywową podbudowy zasadniczej dla nawierzchni drogowej.

Oba badane materiały mają wystarczające uziarnienie i odpowiadają polom dobrego uziarnienia opisanym krzywymi granicznymi według WT-4 [12]. Stwierdzono wysoką mrozoodporność oraz wymaganą wysadzinowość określoną wskaźnikiem piaskowym.

4. Podsumowanie

W ostatnich kilku latach, ze względu na rosnące zapotrzebowanie na kruszywa dla budownictwa drogowego popularnym materiałem stają się kruszywa alternatywne – sztuczne



Rys. 5. Wykres uziarnienia żużla: a) 0/8 mm, b) 0/31,5 mm (opracowanie własne)

Tabela 2. Wyniki oznaczeń cech fizykomechanicznych wraz z wymaganiami WT-4

		Kruszywa nawierzchnia		Podbudowa zasadnicza	
		Wymagany	A - 0/8	Wymagany	B - 0/31,5
wskaźnik piaskowy	SE [-]	> 35	38	> 45	46
nasiąkliwość	WA24 [-]	WA 24 2	3,07	WA 24 2	3,06
mrozoodporność	F [-]	F 4	8 - F 10	F 10	9 - F 10
odporność na rozdrabnianie	LA [-]	LA 40	39 - LA 40	LA 40	39 - LA 40
odporność na ścieranie	M [-]	M DE	36 - M 40	M DE	38 - M 40
wskaźnik kształtu	SI [-]	SI 55	10,4 - SI 15	SI 55	11,2 - SI 15
zawartość pyłów	f [%]	f 15 / < 15%	0,4 - f 3	f 9 / < 9%	0,5 - f 3

i recyklingowe, w tym odpady pochodzące z przemysłu np. górniczego i komunalnego. Zastosowanie żużli metalicznych oraz produktów spalania odpadów komunalnych pozwala na oszczędność kruszyw naturalnych – pochodzenia skalnego i wodnolodowcowego. Aby móc wykorzystać kruszywa alternatywne, należy przeprowadzić niezbędne badania laboratoryjne. W przypadku żużli pochodzących ze spalania odpadów komunalnych istotną kwestią jest możliwa obecność substancji niebezpiecznych, takich jak metale ciężkie czy szkodliwe związki chemiczne. Ważna jest również jednorodność materiałów. Zdaniem autorów do niezbędnych badań oprócz makroskopowej oceny żużli należą ocena składu materiałów w badaniach mikroskopowych (z zastosowaniem lupy binokularnej lub mikroskopu SEM), a także skład pierwiastków w badaniach wymywania.

W niniejszym artykule autorzy zaproponowali zastosowanie żużli po spalaniu odpadów komunalnych na warstwy niezwiązane konstrukcji drogowych. Z uwagi na zróżnicowane uziarnienie badanych kruszyw oceny dokonano dla warstw kruszywowej nawierzchni oraz podbudowy zasadniczej. Oba badane żużle spełniają wymagania Wytycznych Technicznych WT-4 w zakresie podstawowych badań klasyfikacyjnych i mogą być stosowane na warstwy konstrukcyjne nawierzchni drogowych.

BIBLIOGRAFIA

[1] Czop M., Łażniewska-Piekarczyk B., Use of Slag from the Combustion of Solid Municipal Waste as A Partial Replacement of Cement in Mortar and Concrete, Materials 13, 1593, 2020
 [2] Domańska W. (red.), Ochrona środowiska 2018, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2018

[3] Domańska W. (red.), Ochrona środowiska 2020, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2020
 [4] Keppert M., Reiterman P., Pavlik Z., Pavlikowa M., Jerman M., Cerny R., Municipal solid waste incineration ashes and their potential for partial replacement of Portland cement and fine aggregates in concrete, Cement, Wapno, Beton 4/2010
 [5] Kraszewski C., Właściwości techniczne i chemiczne żużli ze spalania odpadów komunalnych (IBA) oraz możliwości ich zastosowania w budownictwie drogowym, Materiały niepublikowane, Warszawa, 2014
 [6] Mięka J., Łach M., Mierzwiński D., Sposoby zagospodarowania popiołów i żużli ze spalarni odpadów, Inżynieria Ekologiczna 18(3)2017
 [7] Seniūnaitė J., Vasarevičius S., Grubliauskas R., Zigmontienė A., Vaitkus A., Characteristics of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration, Rocznik Ochrony Środowiska 20/2018
 [8] Wielgościński G., Czerwińska J., Spalarnie odpadów komunalnych w Polsce, Nowa Energia 4/2019
 [9] Wielgościński G., Wtórne odpady ze spalania odpadów komunalnych. Bariery i perspektywy ich wykorzystania, Materiały niepublikowane, Łódź, 2011
 [10] Decyzja wykonawcza komisji UE 2019/2010 z dnia 12 listopada 2019 r. ustanawiająca konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE w odniesieniu do spalania odpadów, Bruksela, 2019
 [11] Gospodarka odpadami komunalnymi, Bank Danych Lokalnych, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2021
 [12] Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych, Wymagania Techniczne WT-4, Warszawa, 2010
 [13] PN-EN 13285:2010: Mieszanki Niezwiązane – Specyfikacja
 [14] PN-EN 13242+A1:2010: Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym
 [15] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 2 stycznia 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)
 [16] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz.U. 2014, poz. 1800)
 [17] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie Katalogu odpadów (Dz.U. 2020, poz. 10)
 [18] Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the possible development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive, JRC Technical Reports, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014