

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE

„INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM”

TOM 17

GOSPODARKA ODPADAMI

pod redakcją

Iwony Skoczko

Janiny Piekutin

Elżbiety Grygorczuk-Petersons

Szymona Skarżyńskiego



Białystok 2015

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE

TOM 17

Gospodarka odpadami

MONOGRAFIE

TOM 17



*Patronat
Rektora Politechniki Białostockiej
prof. dr hab. inż. Lecha Dzieńsi*



*Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
Politechniki Białostockiej*



*Honorowy Patronat
Prezydenta
Miasta Białegostoku*

Serdecznie dziękujemy za pomoc w organizacji uroczystości
i wydaniu niniejszej publikacji.

Sponsorzy:



Nadleśnictwo
Czarna Białostocka

Patronaty medialne:



INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM

TOM 17

ŚCIEKI I OSADY ŚCIEKOWE

**pod redakcją
Iwony Skoczko
Janiny Piekutin
Elżbiety Grygorczuk-Petersons
Szymona Skarżyńskiego**

Redaktor tomu:

Iwona Skoczko
Janina Piekutin
Elżbieta Grygorczuk-Petersons
Szymon Skarżyński

Zespół redakcyjny:

Iwona Skoczko – Redaktor Naczelny
Janina Piekutin – Redaktor Naczelny
Elżbieta Grygorczuk-Petersons – Redaktor Naczelny
Szymon Skarżyński – skład monografii

Recenzenci monografii:

dr hab. inż. Jacek Piekarski, prof. PK
dr inż. Elżbieta Grygorczuk-Petersons

Zespół naukowy:

dr hab. inż. Iwona Skoczko – Politechnika Białostocka
dr n. tech. Janina Piekutin – Politechnika Białostocka
prof. dr hab. inż. Józefa Wiater – Politechnika Białostocka
prof. dr hab. inż. Rafał Miłaszewski – Politechnika Białostocka
prof. Aleksey Ternovtsev – Kijowski Narodowy Uniwersytet Budownictwa i Architektury
prof. Dmitry Spitsov – Moskiewski Państwowy Uniwersytet Budownictwa
prof. Javier Bayo – Uniwersytet Techniczny Cartagena
dr hab. inż. Mariusz Dudziak – Politechnika Śląska
dr hab. Aneta Dorota Petelska – Uniwersytet w Białymstoku
prof. nzw. dr hab. Bożena Łozowicka – Instytut Ochrony Roślin
dr hab. inż. Jacek Piekarski, prof. PK - Politechnika Koszalińska
dr hab. inż. Katarzyna Ignatowicz – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Mirosław Żukowski, prof. PB - Politechnika Białostocka
dr n. tech. Joanna Szczykowska – Politechnika Białostocka
dr inż. Anna Siemieniuk – Politechnika Białostocka
dr inż. Elżbieta Grygorczuk-Petersons – Politechnika Białostocka
dr inż. Dariusz Andraka – Politechnika Białostocka
dr inż. Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk – Politechnika Białostocka
dr inż. Jacek Leszczyński – Politechnika Białostocka

Wszystkie zamieszczone w monografii prace są recenzowane

Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2015

ISBN – 978-83-62582-72-3

Publikacja nie może być w jakikolwiek sposób powielana i rozpowszechniana bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
Ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
Tel.: 85 746 91 37 fax: 85 746 90 12
e-mail: oficyna.wydawnicza@pb.edu.pl
www.pb.edu.pl

SPIS TREŚCI

Beton z kruszywem z recyklingu jako wartościowy materiał budowlanych	9
--	---

mgr inż. Piotr Jurkowski, dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk

Utylizacja i recykling ogniów fotowoltaicznych	33
--	----

mgr Monika Ziółko

Wpływ wybranych zanieczyszczeń kruszywa z recyklingu na zmianę parametrów technicznych betonu	45
---	----

mgr inż. Joanna Czaja, mgr inż. Justyna Jaskowska-Lemańska

Zagospodarowanie frakcji biodegradowalnej odpadów pochodzących z hodowli zwierząt egzotycznych	68
--	----

inż. Jakub Frankowski, dr inż. Damian Janczak, mgr inż. Hanna Waliszewska,
inż. Anna Olszewska, inż. Kamil Kozłowski

Wybrane zagadnienia z recyklingu betonu	81
---	----

mgr inż. Katarzyna Kalinowska-Wichrowska

Odpady komunalne – charakterystyka ilościowa i wybrane metody ich unieszkodliwiania ...	97
---	----

dr hab. Grażyna Łaska, prof. PB, mgr inż. Bożena Nazaruk

Problemy hydrogeologiczne w lokalizacji składowisk odpadów	118
--	-----

mgr inż. Małgorzata E. Wysocka

Odpady energetyczne i możliwość ich wykorzystania do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów.....	137
---	-----

mgr inż. Mariola Wasił

mgr inż. Piotr Jurkowski¹, dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk,
Politechnika Białostocka, Katedra Konstrukcji Budowlanych
ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok
e-mail: ¹jurguc90@gmail.com

Beton z kruszywem z recyklingu jako wartościowy materiał budowlany

Słowa klucze: *recykling w budownictwie, kruszywo wtórne, beton, wytrzymałość na ściskanie, mrozoodporność*

Streszczenie: Wyczerpywanie się zasobów kruszyw naturalnych, a także ograniczona zdolność przyjmowania przez środowisko przyrodnicze, bez niebezpiecznych zmian globalnego ekosystemu, różnego rodzaju odpadów przemysłowych, przyczyniają się do poszukiwania efektywnych metod gospodarczego zastosowania odpadów pochodzących z sektora budownictwa. Przebudowa licznych obiektów przemysłowych, wyburzenia budynków i obiektów infrastruktury drogowej, odpady z zakładów prefabrykacji stanowią znaczące źródło kruszyw wtórnych. Praca przedstawia wyniki badań cech kruszywa wtórnego oraz właściwości fizycznych i wytrzymałościowych betonów zawierających to kruszywo. Badano kruszywo o frakcjach: 2 – 4 mm, 4 – 8 mm i 8 – 16 mm, pochodzące z przekruszonego gruzu betonowego, ustalając jego nasiąkliwość i gęstość. Zaprojektowano mieszanki betonowe, do wykonania których, oprócz kruszywa z recyklingu, wykorzystano piasek naturalny frakcji 0 – 2 mm, cement CEM I 32,5R i wodę wodociągową. Zakres badań wytrzymałości na ściskanie obejmował betony o wskaźniku $w/c = 0,5; 0,6; 0,7$ oraz zawartości cementu: 270 kg/m³; 300 kg/m³; 330 kg/m³; 360 kg/m³. Dla wybranych receptur oceniono również odporność betonu na powierzchniowe łuszczenie pod wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania w obecności soli odładzającej. Podjęto także próbę zwiększenia mrozoodporności poprzez zastosowanie domieszki napowietrzającej. Dodatkowo, przeprowadzono badanie odporności na wewnętrzne niszczenie betonu pod wpływem cyklicznego zamrażania w powietrzu i rozmrażania w wodzie, ocenianą na podstawie zmian statycznego modułu sprężystości betonu. Stwierdzono, że beton wykonany przy zastosowaniu kruszywa z recyklingu może być wartościowym materiałem budowlanym, zarówno w zastosowaniach niekonstrukcyjnych jak i konstrukcyjnych.

1. Wstęp

We współczesnych społeczeństwach coraz częściej zwraca się uwagę na aspekty związane z ekologią, zrównoważonym rozwojem oraz dbaniem o zdrowe i naturalne środowisko. Buduje się tzw. świadomość ekologiczną, która dotyczy, między innymi, doboru stosowanych materiałów do wznoszenia obiektów budowlanych oraz takich rozwiązań technologicznych, aby w jak najmniejszym stopniu negatywnie wpływać na środowisko naturalne. Tworzy to jednak konflikt pomiędzy rozwojem gospodarczym w zakresie przemysłu budowlanego, a aktualnymi potrzebami. Konflikt można załagodzić poprzez stosowanie optymalnych rozwiązań, które będą chronić wyczerpujące się, nieodnawialne zasoby naturalne. Należy więc dążyć do zmiany technologii stosowanych w budownictwie w taki sposób, który

pozwole na produkcję materiałów budowlanych przy zmniejszonym zużyciu energii, wody, czy surowców nieodnawialnych. Jednym z kierunków może być wykorzystanie przekruszonego betonu rozbiórkowego do nowego betonu jako kruszywa wtórnego. Ograniczy to eksploatację naturalnych złóż kruszywa, a także koszty transportu. Racjonalny recykling betonu nie tylko może korzystnie wpłynąć na środowisko naturalne, ale także rozwiązuje problem zagospodarowania odpadów (składowania i utylizacji) [1,2].

Na najbliższe lata, biorąc pod uwagę inwestycje drogowe i budowlane w „krajowym planie gospodarki odpadami” [3], oraz prognozy przedstawione w pracy [4] szacuje się znaczący przyrost ilości odpadów budowlanych. Przebudowy i modernizacje tras komunikacyjnych, wyburzenia starych i zrujnowanych budynków są przeprowadzane w dużych miastach w związku z aktualizacją zagospodarowania przestrzennego. Przewiduje się, że po okresie stagnacji i spadku produkcji budowlanej, spowodowanych kryzysem, nastąpi wzrost produkcji, co wpłynie na wytwarzanie większej ilości materiałów budowlanych, które po planowanym okresie eksploatacji staną się odpadami budowlanymi, które będzie trzeba zutylizować.

Odpady budowlane można podzielić w następujący sposób [5]:

- ziemia z wykopów,
- odpady z remontów dróg,
- gruz rozbiórkowy,
- odpady z placów budów.

Kruszywo z recyklingu pochodzi głównie z odpadów budowlanych, będących wynikiem robót rozbiórkowych obiektów budowlanych, a także odpadów budowlanych z budowy nowych obiektów lub modernizacji i przebudowy starych budowli. Odpady z zakładów prefabrykacji również nadają się do ponownego wykorzystania. Szacunkowy skład odpadów budowlanych określa Ajdukiewicz w [6]:

- ceramika od 30% do 45%,
- beton od 30% do 40%,
- drewno od 8% do 10%,
- metale od 4% do 5%,
- plastik od 3% do 5 %.

W Polsce zagadnienie odpadów budowlanych i ich ponownego wykorzystania jest nadal słabo rozpowszechnione, a zainteresowanie problemem wynika, przede wszystkim, z trudnościami związanymi z utylizacją odpadów pochodzących ze starych budynków

i budowli, których czas eksploatacji dawno minął. Takich budynków często nie poddaje się rozbiórce m.in. ze względu na brak możliwości przetworzenia powstałych wskutek rozbiórki odpadów. Potwierdza to konieczność poszukiwania nowych sposobów na wykorzystanie materiału odpadowego. Ze względu na zbyt mało zastosowań praktycznych i doświadczenia z konstrukcjami z betonu, przy wznoszeniu których wykorzystano kruszywo pochodzące z recyklingu, uzyskanie dodatkowych informacji na ten temat jest pożądane.

Badania nad właściwościami fizycznymi i mechanicznymi kruszywa z recyklingu, jak i betonu z zastosowaniem kruszywa z recyklingu, prowadzone są od kilkunastu lat w wielu krajach. Mają one na celu ustalenie pewnych standardów i rekomendacji, które będą wspierać użycie kruszywa z recyklingu do betonów konstrukcyjnych [7]. Wprowadzenie standardów umożliwiających wykorzystanie odpadów budowlanych (w szczególności gruzu betonowego) pozwoli nam uniknąć nadmiernej ilości odpadów i zredukuje problem ich utylizacji. Będzie to korzystnie wpływać na ekosystem lokalny jak i całej planety.

Najwięcej badań nad wykorzystaniem kruszywa powstałego z przekruszonego gruzu betonowego dotyczy jego wpływu na cechy wytrzymałościowe betonu. Ajdukiewicz, Kliszczewicz [8] stwierdzają, iż właściwości stwardniałego betonu, z którego uzyskano kruszywo wtórne, mają znaczący wpływ na mechaniczne właściwości betonu wytwarzanego z użyciem tego kruszywa. Ponadto stwierdzają, iż możliwe jest uzyskanie betonu, o wyższej wytrzymałości niż materiał, z którego otrzymano kruszywo. Etxeberia i in. [9] stwierdzają na podstawie badań, że zastąpienie całości kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie o 20 – 25% (przy nie zmienionej ilości cementu i wskaźniku wodno – cementowym w/c). Jednak przy zastosowaniu kruszywa z recyklingu na poziomie 30% całości stosu okruszowego (frakcje 6 – 22 mm), spadki wytrzymałości są znacznie mniejsze (8%), co pozwala na zastosowanie kruszywa z recyklingu w procesie wytwarzania betonów do klasy wytrzymałości C30/37 [10]. W przypadku betonów wyższych wytrzymałości (klasy C40/50 do klasy C70/85), zamiana całości naturalnego kruszywa grubego (frakcji 10 – 20 mm) na kruszywo z recyklingu sprawia, iż wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszywem z recyklingu po 28 dniach stanowi ok 87% wytrzymałości betonu z kruszywem naturalnym [11].

Oprócz cech wytrzymałościowych betonu z kruszywem z recyklingu prowadzono również badania jego mrozoodporności. Zaharieva i in. [12] poddali próbki betonowe zawierające kruszywo z recyklingu cyklowi zamrażania i rozmrażania w powietrzu przy różnym nasyceniu próbek wodą. Wyniki okazały się niesatysfakcjonujące i nie zalecano stosowania betonu z kruszywem z recyklingu w miejscach narażonych na działanie surowego klimatu.

Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie domieszek napowietrzających, które znacznie poprawiają mrozoodporność betonu z kruszywem z recyklingu [13]. Analizując wyniki opisanych w literaturze badań, dotyczących mrozoodporności betonów zawierających kruszywo z recyklingu, stwierdzono, że brakuje danych odnośnie wpływu tego rodzaju kruszywa na proces łuszczenia powierzchniowego w warunkach oddziaływania cieczy mrozacej na wybraną powierzchnię elementu próbnego, sytuacji częstej w warunkach eksploatacji konstrukcji betonowych i żelbetowych. Powierzchniowe odpajanie fragmentów zaprawy i odsłanianie ziaren kruszywa nie ma bezpośredniego wpływu na właściwości mechaniczne betonu w konstrukcji. Jednakże element, którego powierzchnia uległa tego rodzaju uszkodzeniom, staje się bardziej podatny na wnikanie wilgoci i agresywnych mediów z otaczającego środowiska, które stanowią istotne zagrożenie dla jego trwałości.

Niektórzy autorzy podejmowali próby badania betonu z kruszywem z recyklingu w warunkach typowej pracy konstrukcji. Stwierdzono, że beton z kruszywem z recyklingu wykazuje mniejszą wytrzymałość na ścinanie, którą da się kontrolować przez odpowiedni rozstaw zbrojenia na ścinanie (strzemiona) [7]. Grygo i Łapko [4] wykorzystali kruszywo z recyklingu do wytwarzania belek zespolonych, zawierających wkładkę z betonu wysoko wartościowego (BWW). Stwierdzono, że takie belki mają nośność o 12 – 22% większą od belek wykonanych w całości na kruszywie naturalnym (bez wkładek BWW). Również zastosowanie włókien stalowych zwiększa nośność belek betonowych z kruszywem z recyklingu, a także korzystnie wpływa na zachowanie się belek podczas zginania i zapobiega powstawaniu rys [14].

Celem pracy jest ocena właściwości kruszywa otrzymanego z przekruszonego gruzu betonowego oraz właściwości betonu o dużej zawartości tego kruszywa pod kątem jego wykorzystania w betonowych elementach konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych.

W pracy przedstawiono wyniki badań wybranych cech kruszywa z recyklingu betonu. Znając właściwości tego kruszywa, takie jak gęstość objętościowa i nasiąkliwość, zaprojektowano mieszanki betonowe, w których całość kruszywa grubego (frakcja 2 – 16 mm) stanowiło kruszywo z recyklingu. Oceniono następujące cechy użytkowe stwardniałego betonu: wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość wodą oraz odporność na działanie mrozu. Podjęto też próbę oceny wpływu kruszywa wtórnego na wybrane parametry mechaniki pękania betonu.

2. Opis badań eksperymentalnych

2.1. Materiały i sposób przygotowania próbek

Do wykonania próbek betonu wykorzystywanych w badaniach doświadczalnych zastosowane następujące materiały:

- cement portlandzki – CEM I 32,5 R,
- kruszywo naturalne – piasek o uziarnieniu 0 – 2 mm,
- kruszywo z recyklingu – pokruszony gruz betonowy, o uziarnieniu do 16 mm,
- woda wodociągowa,
- domieszka napowietrzająca (na bazie zmydlonej żywicy terpentynowej).

Jako spoiwo użyto cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R, spełniającego wymagania normy PN – EN 197 – 1 [15]. Parametry techniczne cementu podano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry techniczne cementu

Właściwości	Wymagania normy PN-EN 197-1 [15]	Wyniki oznaczeń
CEM I 32,5 R		
Zawartość SO ₃ [%]	≤ 3,5	3,17
Zawartość CI [%]	≤ 0,1	0,08
Początek wiązania [min]	≥ 75	182
Wytrzymałość zaprawy na ściskanie [MPa] - po 2 dniach - po 28 dniach	≥ 10 ≥ 32,5 ≤ 52,5	24,1 49,5
Pozostałość nierozpuszczalna [%]	≤ 5	1,36
Straty prażenia [%]	≤ 5	2,95
Zmiana objętości [mm]	≤ 10	0,0

Źródło: <http://www.ozarow.com.pl/main.php?p=523&s=12892> [16]

Zgodnie z zaleceniami RILEM [17], nie stosowano najdrobniejszej frakcji kruszywa z recyklingu, ze względu na jej bardzo wysoką wodożądność i dużą zawartość stwardniałego zaczynu cementowego oraz zanieczyszczeń, powodujące znaczące obniżenie wytrzymałości i zwiększenie porowatości betonu. Jako kruszywo drobne użyto piasek naturalny o uziarnieniu 0 – 2 mm. Gęstość objętościowa piasku naturalnego jest równa 2650 kg/m³, a nasiąkliwość wodą 2,2%. Punkt piaskowy ustalono na poziomie 30%.

Kruszywo wtórne uzyskano poprzez przekruszenie w kruszarce mechanicznej gruzu betonowego pochodzącego z rozbiórki elementów betonowych. Gruz został początkowo wysuszony, następnie poddany wstępnej selekcji w celu eliminacji większych zanieczyszczeń. Po przekruszeniu materiał przesiano przez odpowiednie sita i uzyskano kruszywo o frakcji 2 – 4 mm, 4 – 8 mm i 8 – 16 mm. Dla każdej frakcji wykonano badania gęstości objętościowej

i nasiąkliwości. Aby ograniczyć koszt wytwarzania kruszywa, nie stosowano żadnych metod uszlachetniania materiału, takich, jak np. obróbka termiczna. Do badań kruszywo zostało wysuszone do stałej masy.

Po oznaczeniu parametrów kruszywa przystąpiono do projektowania składów mieszanek betonowych z kruszywem z recyklingu, które oparto na zasadach analogicznych, jak w przypadku betonów zwykłych z uwzględnieniem szczególnych cech kruszywa z recyklingu.

Sformułowano następujące założenia do projektowania mieszanek betonowych:

1. Aby wprowadzić do betonu jak największą ilość kruszywa z recyklingu, założono, że całość frakcji grubej (2 – 16 mm) będzie stanowiło kruszywo wtórne. Zachowano stały udział poszczególnych frakcji w stosie okrucowym.
2. Uwzględniono następujące poziomy wartości wskaźnika w/c : 0,5; 0,6 i 0,7. Przyjęto je ze względu na dużą nasiąkliwość i niejednorodność kruszywa wtórnego, wymaganą urabialność mieszanki betonowej i przeznaczenie betonu.
3. Uwzględniono następujące poziomy zawartości cementu portlandzkiego w mieszance betonowej: 270 kg/m³; 300 kg/m³; 330 kg/m³ i 360 kg/m³. Projektowane betony recyklingowe powinny należeć do klas wytrzymałościowych C16/20 – C30/37
4. Obliczając zawartość kruszywa z recyklingu w mieszance betonowej uwzględniono rzeczywistą gęstość objętościową poszczególnych frakcji, według tabeli 6.

Przyjmując wymienione założenia otrzymano duży zakres zmienności wytrzymałości na ścislenie betonu.

Ustalone składy mieszanek betonowych dla poszczególnych zawartości cementu, w zależności od wskaźnika w/c , przedstawiono w tabelach 2 – 5. W recepturach podano efektywną zawartość wody w mieszance betonowej.

Tabela 2. Skład mieszanki betonowej o zawartości cementu 270 kg/m³

w/c	Cement, CEM I 32,5 [kg]	Woda [l]	Piasek [kg]	Kruszywo z recyklingu [kg]		
				2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
0,5	270	135	617	187	384	759
0,6	270	162	597	182	372	733
0,7	270	189	575	175	359	706

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 3. Skład mieszanki betonowej o zawartości cementu 300 kg/m³

w/c	Cement, CEM I 32,5 [kg]	Woda [l]	Piasek [kg]	Kruszywo z recyklingu [kg]		
				2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
0,5	300	150	599	182	370	735
0,6	300	180	575	175	358	706
0,7	300	210	551	167	343	677

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 4. Skład mieszanki betonowej o zawartości cementu 330 kg/m³

w/c	Cement, CEM I 32,5 [kg]	Woda [l]	Piasek [kg]	Kruszywo z recyklingu [kg]		
				2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
0,5	330	165	579	175	360	711
0,6	330	198	553	167	345	679
0,7	330	231	527	159	328	646

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 5. Skład mieszanki betonowej o zawartości cementu 360 kg/m³

w/c	Cement, CEM I 32,5 [kg]	Woda [l]	Piasek [kg]	Kruszywo z recyklingu [kg]		
				2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
0,5	360	180	560	173	335	690
0,6	360	216	530	164	328	655
0,7	360	252	503	155	310	620

Źródło: Opracowanie własne

W celu poprawy urabialności mieszanki betonowej, zawierającej kruszywo z recyklingu, zastosowano dwustopniową metodę mieszania składników. Pierwszą część wody zarobowej dodano na samym początku podczas mieszania samych kruszyw, w celu wstępnego nasycenia, następnie po uzupełnieniu mieszanki o cement, dodano drugą część wody. Zabieg miał na celu zagęszczenie strefy kontaktowej pomiędzy ziarnami kruszywa i zaczynem cementowym w nowo wykonanym betonie. W trakcie wykonywania mieszanek betonowych dokonywano korekty wody dodanej w oparciu o ustalenie ilości wody zaabsorbowanej przez kruszywo z recyklingu w momencie przygotowywania mieszanki.

Z mieszanek wykonano próbki sześciennie o wymiarach 150x150x150 mm. Próbkę do badań wytrzymałości na ściskanie wykonano i pielęgnowano zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2011 [18]. W trakcie wytwarzania elementów próbnych mieszanka betonowa zagęszczana była w dwóch warstwach, od razu po ułożeniu w formie. Zachowano ostrożność, aby nie nastąpiła segregacja składników. Elementy próbne zagęszczono na stole wibracyjnym. Rozformowanie próbek następowało po 24h, a próbki przechowywano w wodzie

wodociągowej do czasu badania. Łącznie, wykonano 36 sześciennych kostek do badania wytrzymałości na ściskanie (po 3 serie dla każdej zawartości cementu i wskaźnika w/c). Oprócz próbek do badania wytrzymałości na ściskanie wykonano, w podobny sposób, 6 próbek sześciennych 150x150x150 mm (o zawartości cementu 300 kg/m³ i 360 kg/m³ oraz wskaźniku $w/c = 0,5; 0,6; 0,7$), które zostały wykorzystane do badań wytrzymałości na powierzchniowe łuszczenie betonu (badanie mrozoodporności), a także próbki walcowe o wymiarach $d = 150$ mm i $h = 300$ mm do badania odporności na wewnętrzne niszczenie betonu pod wpływem cyklicznego zamrażania w powietrzu i rozmrażania w wodzie.

Dodatkowo, zostały wykonane próbki o wymiarach 400x100x100 mm do badania parametrów mechaniki pękania betonu ($w/c = 0,60$, zawartość cementu 300 kg/m³). Przy czym, wykonano zarówno próbki z kruszywem z recyklingu (2 – 16 mm), jak i próbki kontrolne w całości z kruszywa naturalnego.

2.2. Metody badań

Badanie gęstości objętościowej kruszywa z recyklingu

Gęstość objętościowa ziaren, jest stosunkiem masy próbki wysuszonego kruszywa do objętości, jaką zajmuje ona w wodzie, wraz z wewnętrznymi zamkniętymi pustymi przestrzeniami, lecz bez pustych przestrzeni dostępnych dla wody.

Oznaczenie gęstości przeprowadzono na podstawie normy PN-EN 1097-7:2008 [19] według wzoru:

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}} \quad (1)$$

gdzie:

m_0 – masa pustego piknometru [g],

m_1 – masa piknometru z próbką analityczną [g],

m_2 – masa piknometru z próbką, wypełnionego wodą [g],

V – objętość piknometru [ml],

ρ_l – gęstość cieczy w temperaturze 25°C [g/cm³].

Zasada badania oparta jest na zastąpieniu określonej ilości cieczy o znanej gęstości próbką analityczną. Cylinder o znanej objętości, zawierający próbkę, zostaje wypełniony cieczą.

Objętość cieczy jest obliczona przez podzielenie masy dodanej cieczy przez jej gęstość. Objętość próbki analitycznej jest następnie obliczana przez odjęcie objętości od objętości naczynia miarowego.

Do przeprowadzenia badania oznaczenia gęstości, zastosowano trzy oddzielne próbki z każdej badanej frakcji kruszywa. Zważone, czyste i wysuszone naczynie wypełnione zostało kruszywem i ponownie zważone. Następnie dodano taką ilość wody, aby próbka była całkowicie zanurzona. Dla pozbycia się pęcherzyków powietrza między ziarnami kruszywa, naczyniem wstrząsano. Po ustabilizowaniu się poziomu cieczy zważono całą próbkę.

Badanie nasiąkliwości kruszywa z recyklingu

Badanie nasiąkliwości kruszywa wykonano metodą drucianego kosza wg PN-EN 1097-6 [20]. Pobrano trzy próbki analityczne do badania. Zważono próbki kruszywa (m_1), następnie włożono je do suszarki. Kruszywo suszono do stałej masy (m_2). Po wysuszeniu kruszywa umieszczono je w drucianym koszu. Kosz z kruszywem włożono do zbiornika z wodą o temperaturze ok. 22°C. Woda powinna sięgać 50 mm powyżej górnej części kosza. Po zanurzeniu, w celu usunięcia powietrza z kruszywa kosz należy 25 razy wynurzyć i zanurzyć, następnie kosz pozostawiono przez 24 godziny (m_3) w wodzie robiąc badanie kontrolne po 2, a następnie po 24 godzinach (m_4). Badanie wykonano na 3 próbkach sześciennych.

Zawartość wody w kruszywie z recyklingu w stanie powietrzno-suchym obliczamy wg wzoru:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 [\%] \quad (2)$$

gdzie:

W – procentowa zawartość wody w kruszywie stanie powietrzno-suchym

m_1 – masa kruszywa w stanie powietrzno-suchym [kg],

m_2 – masa kruszywa w stanie suchym [kg].

Nasiąkliwość po 2 godzinach obliczamy wg wzoru:

$$N_2 = \frac{m_4 - m_2}{m_2} \times 100 [\%] \quad (3)$$

gdzie:

N_2 – nasiąkliwość po 2 godzinach,

m_4 – masa kruszywa wyjętego z wody po 2 godzinach [kg],

m_2 – masa kruszywa w stanie suchym [kg].

Nasiąkliwość po 24 godzinach obliczamy wg wzoru:

$$N_{24} = \frac{m_3 - m_2}{m_2} \times 100 [\%] \quad (4)$$

gdzie:

N_{24} – nasiąkliwość po 24 godzinach,

m_3 – masa kruszywa wyjętego z wody po 24 godzinach [kg],

m_2 – masa kruszywa w stanie suchym [kg].

Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu zawierającego kruszywo z recyklingu

Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano wg normy PN-EN 12390-3:2011 [21]. Stwardniały beton zbadano po 28 dniach. Po ustalonym okresie próbki wyciągnięto z miejsca pielęgnacji. Następnie oczyszczono je z nadmiaru wody i luźnych zanieczyszczeń tak, aby cała powierzchnia próbki przylegała do płyt dociskowych. Przed badaniem oczyszczono wszystkie powierzchnie nośne maszyny. Próbkę umieszczono w maszynie tak, aby mogła dopasować się idealnie do powierzchni płyt dociskowych. Ważne jest, aby była ułożona prostopadłe do kierunku formowania. Prędkość przykładania siły była równa 5 kN/s. Wytrzymałość na ściskanie obliczono ze wzoru:

$$f_c = \frac{F}{A} [MPa] \quad (5)$$

gdzie:

f_c – wytrzymałość na ściskanie [MPa],

F – maksymalne obciążenie przy zniszczeniu [N],

A – pole przekroju próbki [mm²].

Badania nasiąkliwości betonu zawierającego kruszywo z recyklingu

Nasiąkliwość betonu związana jest z jego porowatością, a w szczególności z porowatością kapilarną i porami otwartymi w betonie. Beton wykazuje zdolność do wchłaniania wody. Porowatość betonu jest bardzo złożona. Zawiera on bowiem w swojej strukturze zarówno pory zamknięte jak i otwarte, a przede wszystkim pory kapilarne położone w matrycy cementowej, które są niepożądane z punktu widzenia trwałości betonu. Kruszywo wtórne użyte do badań podczas rozdrabniania otoczone jest zaprawą cementową, co dodatkowo może wpłynąć na ilość otwartych porów w strukturze próbek [22].

Nasiąkliwością nazywa się zdolność pochłaniania wody przez materiał przy ciśnieniu atmosferycznym. Jest to stosunek masy wchłoniętej wody do masy próbki materiału suchego. Nasiąkliwość określono na podstawie wzoru [22]:

$$n_w = \frac{m_n - m_s}{m_s} [\%] \quad (6)$$

gdzie:

m_n – masa próbki materiału w stanie nasycenia wodą [kg],

m_s – masa próbki materiału w stanie suchym [kg].

Badanie nasiąkliwości wykonano przez nasycanie, próbki określonej wielkości, wodą. Nasycanie wodą przeprowadzono stopniowo zanurzając badany element w wodzie, tak aby nie uwieźć powietrza w porach materiału.

Do badań użyto próbek kostkowych o wymiarach 150x150x150 mm. Elementy próbne wysuszono do stałej masy w suszarce komorowej w temperaturze 110°C (±5), następnie ostudzono i zważono (m_s).

Próbki, po suszeniu, znużono w wodzie do ¼ wysokości, później do ½, a następnie w całości i pozostawiono na 24 godziny, w celu nasączenia wodą. Poziom wody znajdował się powyżej wysokości próbek, aby nasiąkliwość odbywała się całą powierzchnią. Po upływie doby badany element wyciągnięto z wody, delikatnie wytarto i odsączono nadmiar wody. Zważono masę próbki (m_n) na wadze elektronicznej z dokładnością do 0,1 g i ponownie zanurzono się w wodzie na 24 godziny. Wążenie i zanurzanie próbek powtarzano kilkakrotnie do momentu, aż waga próbek zmieniała się nieznacznie w stosunku do poprzedniej.

Badanie mrozoodporności betonu zawierającego kruszywo z recyklingu

Badania dotyczące cech użytkowych betonów zawierających kruszywo z recyklingu obejmowały następujące testy:

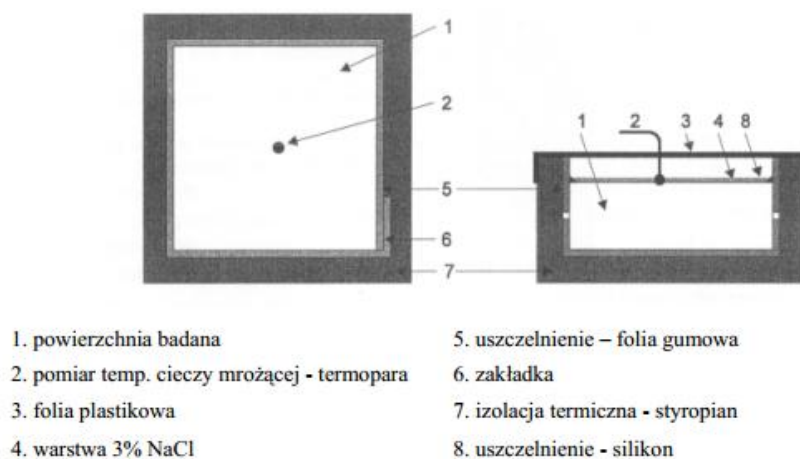
- ocenę odporności na powierzchniowe łuszczenie pod wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania w obecności soli odładzającej,
- odporność na wewnętrzne niszczenie betonu pod wpływem cyklicznego zamrażania w powietrzu i rozmrażania w wodzie, ocenianą na podstawie zmian statycznego modułu sprężystości betonu.

Badanie odporności na powierzchniowe łuszczenie wykonano zgodnie z procedurą opisaną w normie PKN-CEN/ TS 12390-9:2007 [23] (procedura „slab test”). Badanie to polega na określeniu masy materiału złuszczonego z górnej powierzchni próbki po 7, 14, 28, 42 i 56 cyklach zamrażania i odmrażania w obecności 3% roztworu NaCl. W badaniach własnych wykonano 28 cykli w przypadku próbek nienapowietrzonych i 56 cykli dla próbek napowietrzonych.

Próbki sześciennie (150x150x150 mm) do badania przechowywano w wodzie przez 21 dni. Następnie z próbek wycięto prostopadłe do powierzchni wylewanej właściwe próbki do badań o wymiarach 150x150x50 mm i umieszczono w komorze klimatycznej na 4 dni. Po tym okresie na wszystkie powierzchnie oprócz powierzchni poddanej na działanie mrozu naklejono folię gumową i uszczelniono silikonem. Brzeg foli wystawał 20 mm ponad powierzchnię poddaną na działanie mrozu. Próbki ponownie umieszczono w komorze klimatycznej. W 28 dniu dojrzewania betonu próbki włożono do czystej wody na 3 dni. Po tym czasie niebadane powierzchnie zaizolowano styropianem o grubości 20 mm, dolano 3% roztwór NaCl i poddano się cyklom zamrażania i rozmrażania [24].

Każdy cykl zamrażania i rozmrażania trwał 1 dobę. Cykle temperaturowe przedstawiały się następująco [24]:

- zamrażanie od $+20^{\circ}\text{C}$ do -4°C w czasie 4,5 godziny (szybkość obniżania temperatury $5,3^{\circ}\text{C/h}$),
- zamrażanie od -4°C do -18°C w czasie 7,5 godziny (szybkość obniżania temperatury $1,9^{\circ}\text{C/h}$),
- stała temperatura -18°C przez 4 godz.,
- rozmrażanie od -18°C do $+20^{\circ}\text{C}$ w czasie 8 godziny (szybkość podwyższania temperatury $4,8^{\circ}\text{C/h}$).



Rysunek 1. Schematyczny rysunek próbki przygotowanej do badania wg metody *slab test*

Źródło: PKN-CEN/ TS 12390-9:2007 [23]

Co 7 dni wymieniano roztwór NaCl oraz zbierano złuszczonego materiał, który następnie suszono w temperaturze ok. 110°C i zważono. Łączną masę złuszczonego materiału po n cyklach zamrażania/rozmrażania określono się wg równania:

$$m_{s,n} = m_{s,przed} + (m_{v+s} - m_v) \quad (7)$$

gdzie:

$m_{s,n}$ – skumulowana masa złuszczonego materiału po n cyklach zamrażania/rozmrażania [kg],

$m_{s,przed}$ – skumulowana masa złuszczonego materiału badana przy poprzednim pomiarze [kg],

m_{v+s} – masa pojemnika zawierającego złuszczony materiał [kg],

m_v – masa pustego pojemnika [kg].

Jako wynik podano masę złuszczonego materiału w kg/m^2 odniesioną do powierzchni próbki poddawanej zamrażaniu.

Odporność na wewnętrzne niszczenie betonu pod wpływem cyklicznego zamrażania w powietrzu i rozmrażania w wodzie badano stosując reżim temperaturowy jak w metodzie zwykłej, opisanej w normie PN-88/B-06250 [25], przyjmując jako cechę diagnostyczną moduł sprężystości betonu. Wewnętrzne niszczenie betonu ma wpływ na jego cechy mechaniczne, a zatem, pośrednio wpływa na nośność wykonanych z niego elementów konstrukcyjnych. Do badania odporności na wewnętrzne niszczenie betonu wybrano recepturę o $w/c = 0,60$ i zawartości cementu 300 kg/m^3 .

Zastosowano próbki w kształcie walców, o wysokości 300 mm i średnicy 150 mm. Próbki przechowywano przez 7 dni w wodzie w celu całkowitego nasycenia wodą. Następnie poddano je cyklicznemu zamrażaniu w powietrzu w temperaturze -18°C (przez 2 godziny) i rozmrażaniu w wodzie o temperaturze 18°C (przez 6 godzin). Pojedynczy cykl trwał 8 godzin. Łącznie przeprowadzono 240 cykli zamrażania i rozmrażania.

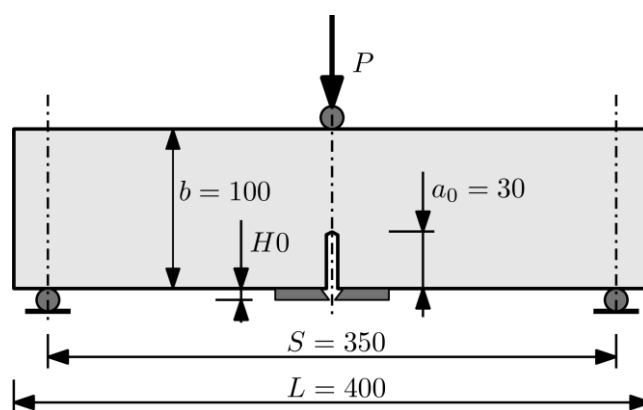
Przed rozpoczęciem zamrażania oraz po 60, 120, 180, 240 cyklach badano wartość modułu sprężystości betonu. Dla porównania, badano również moduł sprężystości betonu kontrolnego nie poddawanego cykлом zamrażania i rozmrażania.

Badanie parametrów mechaniki pękania betonu

Podjęto próbę wykorzystania parametrów mechaniki pękania do oceny właściwości mechanicznych betonu zawierającego kruszywo z recyklingu w porównaniu do betonu z kruszywem naturalnym. Parametry mechaniki pękania wyznaczono na podstawie procedury opisanej w wytycznych RILEM TC 89-FTM [26]. Badania prowadzono przy zastosowaniu próbek betonowych o wymiarach $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$, ze szczeliną pierwotną o głębokości 30 mm, szerokości 3 mm, wykonaną w środku rozpiętości elementu próbnego 24 h przed wykonaniem pomiaru.

Podstawowymi parametrami materiałowymi w mechanice pękania są: krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic} , energia pękania G oraz krytyczne rozwarcie wierzchołka szczeliny (crack tip opening displacement) $CTOD_c$ [27].

Badania prowadzono przy zastosowaniu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej MTS 322 z automatyczną rejestracją wyników. Szerokość rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej mierzono w trakcie testu za pomocą ekstensometru blaszkowego (*clip gauge*). Wymiary elementu próbnego, sposób obciążenia i miejsce umieszczenia blaszek stalowych do mocowania ekstensometru pokazano na rysunku 2. Grubość elementów stalowych H_0 , do mocowania ekstensometru, umieszczonych przy wylocie szczeliny pierwotnej, wynosiła 5 mm. Wartość $CMOD$ mierzono pomiędzy ostrzami blaszek.



Rysunek 2. Wymiary i sposób obciążenia elementów próbnych

Źródło: Kosior-Kazberuk [28]

W trakcie pomiaru rejestrowano zmiany siły obciążającej P w funkcji szerokości rozwarcia szczeliny pierwotnej $CMOD$. Szybkość obciążania dobrano tak by wartość maksymalna została osiągnięta w ciągu około 5 min. Po spadku siły do 95% wartości maksymalnej następowało odciążenie do wartości siły ok. 100 N. Następnie próbkę ponownie obciążano do kolejnej wartości maksymalnej. Po jej osiągnięciu następowało odciążanie. Łącznie wykonywano 4 cykle obciążania-odciążania. Po czwartym cyklu próbkę obciążano do zniszczenia.

Podstawą do wyznaczania wielkości parametrów mechaniki pękania jest wykres obciążenia P w funkcji rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej $CMOD$ uzyskany w rezultacie cyklicznego obciążania i odciążania elementu ze szczeliną pierwotną, w warunkach trójpunktowego zginania (rys. 2) [28].

Ze względu na charakter pękania materiału quasi-krucho i obecność strefy procesowej, w której dochodzi do zmian w mikrostrukturze materiału łączna wartość $CMOD$,

przy obciążeniu inicjującym rozprzestrzenianie się pęknięcia, obejmuje część plastyczną $CMOD^p$ i sprężystą deformacji $CMOD^e$. Aby wyeliminować wpływ strefy procesowej na parametry pęknięcia uwzględnia się tylko sprężystą (odwracalną) część deformacji $CMOD^e$ [28]. Jej wartość wyznaczono w trakcie cyklicznego obciążania i odciążania próbki. Odwracalną część rozwarcia wylotu szczeliny wyznaczono na podstawie podatności materiału w fazie odciążenia C_u , definiowaną jako przyrost szerokości rozwarcia wylotu szczeliny na jednostkę obciążenia. W podobny sposób wyznaczono podatność początkową C_i . Na podstawie podatności odciążenia i początkowej ustalono krytyczną długość efektywnej rysy a_c . Krytyczne wartości parametrów mechaniki pęknięcia betonu obliczono z zależności [28]:

$$K_{Ic}^s = \sigma_c \sqrt{\pi a_c} g_1 \left(\frac{a_c}{d} \right) \quad (8)$$

$$CMOD_c^e = \frac{4\sigma_c a_c}{E} g_2 \left(\frac{a_c}{d} \right) \quad (9)$$

$$CTOD_c = CMOD_c^e g_3 \left(\frac{a_c}{d}, \frac{a_0}{a_c} \right) \quad (10)$$

gdzie:

σ_c – naprężenie maksymalne [MPa],

a_c – krytyczna długość efektywnej rysy [m],

a_0 – długość szczeliny pierwotnej [m],

d – wysokość elementu próbnego [m],

E – statyczny moduł sprężystości betonu [MPa],

g_1, g_2, g_3 – funkcje związane z geometrią elementów próbnych.

Analiza zmian wymienionych parametrów pozwala prawidłowo ocenić odporność na pękanie materiałów quasi-kruchych.

Parametrem opisującym zakres pokrytyczny zależności obciążenie P – przemieszczenie δ jest wielkość definiowana jako ilość energii absorbowanej w obrębie strefy procesowej, przypadająca na jednostkę powierzchni, czyli energia pęknięcia G_F . Wielkość ta może być uznana za stałą materiałową jeśli spełnia warunki [28]:

- ilość energii absorbowanej poza strefą zniszczenia musi być pomijalnie mała,
- zużycie energii niezbędnej do wytworzenia rysy winno być niezależne od geometrii elementu,
- proces pęknięcia musi być stabilny (nie można dopuścić do absorpcji energii w skutek efektów dynamicznych).

Wartość G_F wyznacza się na podstawie wielkości pola powierzchni ograniczonej wykresem zależności obciążenie P – przemieszczenie δ w miejscu przyłożenia siły do elementu próbnego, według wzoru [28]:

$$G_F = \left[\int_0^{\delta_{max}} P(\delta) + mg\delta_{max} \right] / [(d - a_0)b] \quad (11)$$

gdzie:

m – masa belki [N],

g – przyspieszenie ziemskie (9,81 m/s²),

δ_{max} – maksymalne ugięcie belki [m],

b – szerokość belki [m],

σ_0 – długość szczeliny pierwotnej.

3. Analiza wyników badań

3.1. Wyniki badania cech kruszywa z recyklingu

Gęstość objętościową i nasiąkliwość wodą poszczególnych frakcji kruszywa z recyklingu podano w tabeli 6.

Tabela 6. Właściwości kruszywa z recyklingu

Frakcja [mm]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Nasiąkliwość [%]
2-4	2410	6,57
4-8	2475	7,61
8-16	2440	6,78

Źródło: Opracowanie własne

Kruszywo z recyklingu charakteryzuje się mniejszą gęstością objętościową niż kruszywo naturalne (< 2650 kg/m³), a stosunkowo duża nasiąkliwość wynika z rozwiniętej powierzchni jego ziaren. Kruszywo to, z powodu dużej porowatości wynikającej z obecności resztek zaprawy cementowej, intensywnie pochłania dodaną wodę, co powoduje szybką utratę urabialności mieszanki betonowej. Zatem, istotne znaczenie ma ustalenie ilości wody dodatkowej, o którą należy powiększyć ilość wody obliczonej dla mieszanki betonowej.

3.2. Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie

Najważniejszym parametrem, decydującym o przydatności betonu do zastosowania w różnego typu konstrukcjach, jest jego wytrzymałość na ściskanie. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonów zawierających kruszywo z recyklingu, w zależności od

wartości wskaźnika w/c oraz zawartości cementu w mieszance, po 28 dniach dojrzewania, zamieszczono w tabeli 7.

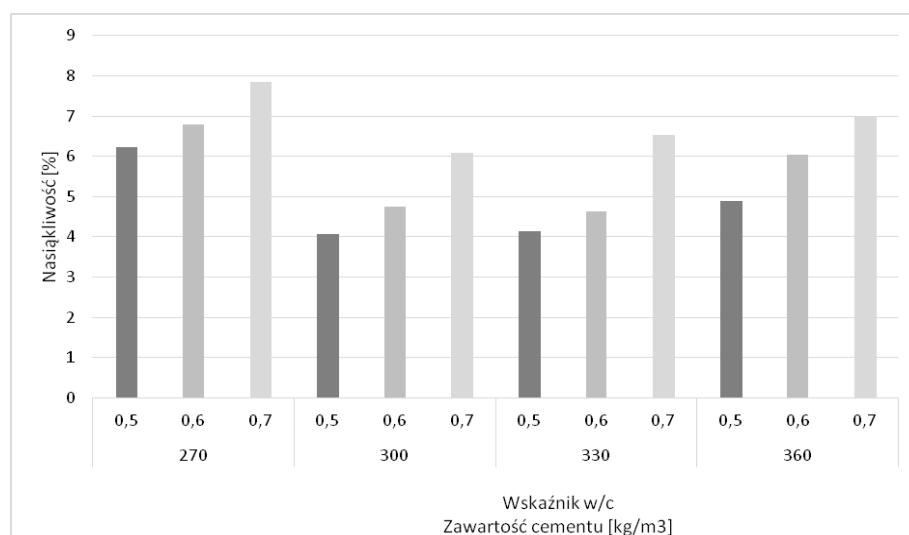
Tabela 7. Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie badanych serii $f_{c,cube}$

cement	270 kg/m ³		300 kg/m ³		330 kg/m ³		360 kg/m ³	
w/c	F [kN]	$f_{c,cube}$ [MPa]	F [kN]	$f_{c,cube}$ [MPa]	F[kN]	$f_{c,cube}$ [MPa]	F[kN]	$f_{c,cube}$ [MPa]
0,5	942,8	41,9	1017,0	40,2	1000,0	44,4	1191,6	53,0
	1084,5	44,5	992,3	44,1	1037,3	46,1	1063,1	47,3
	807,8	39,9	715,5	36,8	1043,7	46,4	1181,6	52,5
0,6	875,3	38,9	936,0	41,6	827,6	36,8	1079,8	48,0
	893,3	39,7	933,8	41,5	889,8	39,5	1044,0	46,4
	897,8	39,9	999,0	44,4	873,5	38,8	988,8	43,9
0,7	798,8	35,5	859,5	31,2	741,0	32,9	756,5	33,6
	823,5	36,6	819,0	36,4	748,2	33,3	825,3	36,7
	794,3	35,3	742,5	33,0	736,6	32,7	868,7	38,6

Źródło: Opracowanie własne

3.3. Wyniki badania nasiąkliwości betonu

Wyniki badań nasiąkliwości betonu dla poszczególnych receptur przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Wyniki badań nasiąkliwości betonu z kruszywem z recyklingu.

Źródło: Badania własne

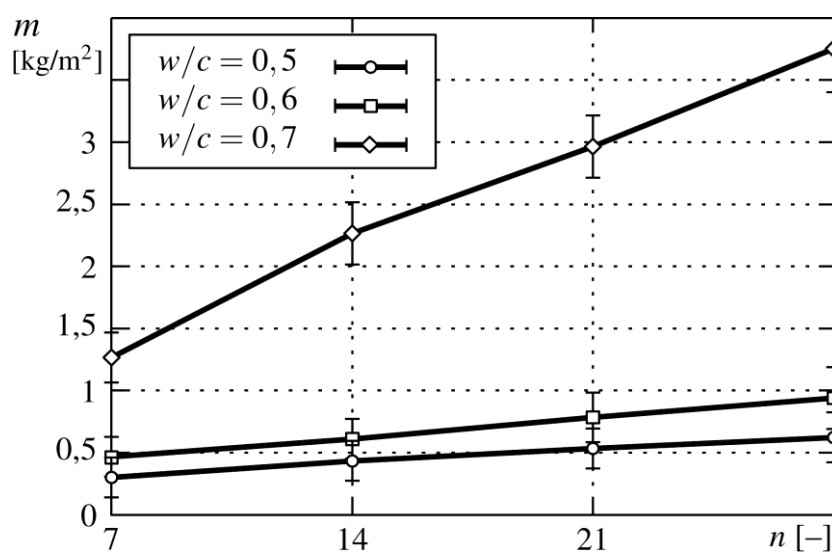
Beton zawierający 270 kg/m³ cementu przy współczynniku w/c równym 0,7 charakteryzuje się największą nasiąkliwością, wynoszącą 7,84 %. Najmniejszą nasiąkliwość (4,08%) wykazał się beton o zawartości cementu 330 kg/m³ i wskaźniku w/c równym 0,5. Z przedstawionego wykresu wynika, iż wraz ze wzrostem wartości wskaźnika wodno-

cementowego, wzrasta nasiąkliwość. Można też stwierdzić, iż wzrost zawartości cementu wpływa pozytywnie na wyniki nasiąkliwości. Jednak ta tendencja utrzymuje się tylko do zawartości cementu 330 kg/m^3 . Dalszy wzrost ilości cementu powodował podwyższenie nasiąkliwości. Biorąc pod uwagę wymaganą dla betonów, narażonych na oddziaływanie czynników atmosferycznych, nasiąkliwość poniżej 5%, warunek ten spełniały betony zawierające 300 i 330 kg cementu w 1 m^3 betonu, przy wskaźniku w/c nie przekraczającym 0,6 oraz beton zawierający 360 kg/m^3 przy $w/c = 0,50$. Pozostałe betony mogą być stosowane w elementach, które są zabezpieczone przed wpływem warunków środowiskowych.

3.4. Wyniki badania mrozoodporności betonu - odporność na powierzchniowe łuszczenie

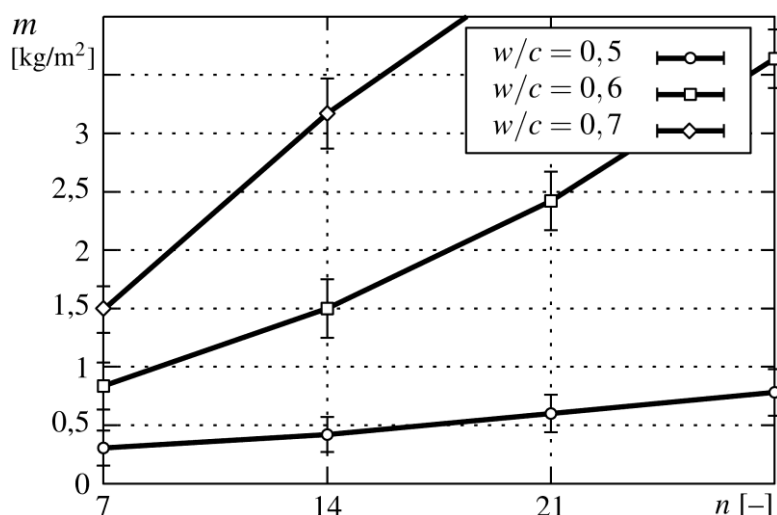
Badanie obejmowało ocenę odporności na powierzchniowe łuszczenie pod wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania w obecności soli odładzającej.

Zależność masy złuszczonego materiału od liczby cykli zamrażania i rozmrażania w obecności 3% roztworu NaCl oraz od wartości stosunku w/c dla betonu o zawartości cementu 300 kg/m^3 przedstawiono na rysunku 4, a dla betonu o zawartości cementu 360 kg/m^3 – na rysunku 5.



Rysunek 4. Zależność masy złuszczeń powierzchniowych m od liczby cykli zamrażania i rozmrażania n oraz od wartości wskaźnika w/c dla betonu o zawartości cementu 300 kg/m^3

Źródło: Opracowanie własne



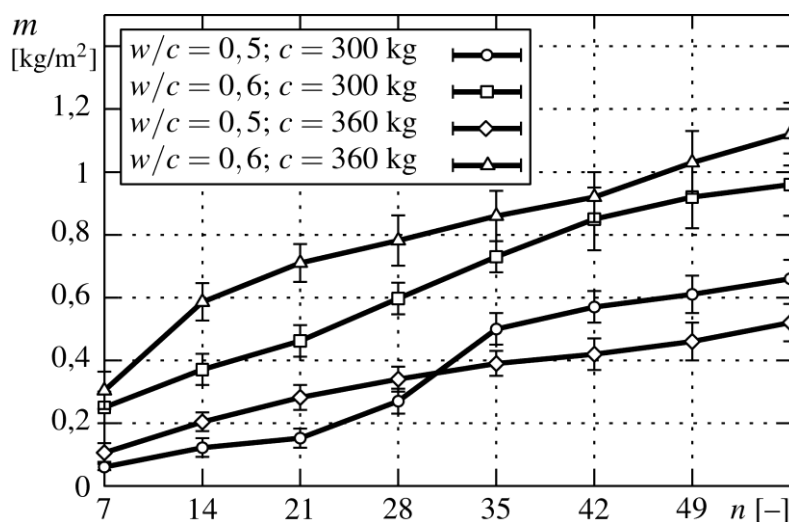
Rysunek 5. Zależność masy złuszczeń powierzchniowych m od liczby cykli zamrażania i rozmrażania n oraz od wartości wskaźnika w/c dla betonu o zawartości cementu 360 kg/m^3

Źródło: Opracowanie własne

Badane betony charakteryzowały się wysokim wskaźnikiem wodno-cementowym, który wpłynął na obniżenie mrozoodporności. W przypadku wszystkich badanych betonów narastanie masy złuszczonego materiału miało charakter liniowy, typowy dla stosowanej metodyki badawczej. Porównując wyniki uzyskane dla różnych zawartości cementu w betonie, znacznie większą masę złuszczeń stwierdzono w przypadku betonów o zawartości cementu 360 kg/m^3 . W przypadku betonów o zawartości cementu 300 kg/m^3 , masa złuszczeń w przypadku wskaźnika o w/c równego 0,50 i 0,60 nie przekroczyła poziomu 1 kg/m^2 po 28 cyklach. Natomiast przy zawartości cementu 360 kg/m^3 , jedynie beton o $w/c = 0,50$ odznaczał się jednostkową masą złuszczeń poniżej 1 kg/m^2 . Jako przyczynę zwiększonej podatności na łuszczenie można wskazać większą ilość zaczynu cementowego (stanowiącego o masie złuszczeń) w betonach zawierających 360 kg cementu na 1 m^3 . Zwiększenie zawartości zaczynu w mieszance spowodowało także wzrost nasiąkliwości wodą (rysunek 3) i podciąganie kapilarne roztworu soli.

Jako sposób zwiększenia odporności betonów, zawierających kruszywo z recyklingu, na powierzchniowe łuszczenie, zaproponowano wprowadzenie domieszki napowietrzającej (na bazie zmydlonej żywicy terpentynowej) w ilości 0,10% masy cementu, bez zmiany stosunku w/c betonów. Ilość domieszki ustalono na podstawie badań wstępnych zawartości powietrza w świeżej mieszance betonowej (nie mniej niż 4%). Czas badania wydłużono do 56 cykli zamrażania i rozmrażania.

Zależność masy złuszczonego materiału od liczby cykli zamrażania i rozmrażania oraz od wartości stosunku w/c dla betonów napowietrzonych przedstawiono na rys. 6.



Rysunek 6. Zależność masy złuszczeń powierzchniowych m od liczby cykli zamrażania i rozmrażania n oraz od wartości wskaźnika w/c dla betonów napowietrzonych, przy różnych zawartościach cementu c .

Źródło: Opracowanie własne

W rozważanym przypadku, wprowadzenie domieszki napowietrzającej spowodowało znaczące ograniczenie masy złuszczeń. Jednakże, działanie domieszki napowietrzającej nie było tak efektywne, jak zazwyczaj w przypadku betonów zawierających wyłącznie kruszywo naturalne [28].

Betony zawierające kruszywo wtórne charakteryzują się ograniczoną odpornością na powierzchniowe łuszczenie pod wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Napowietrzenie betonu może być skutecznym sposobem zwiększenia mrozoodporności betonu kruszywem z recyklingu. Jednakże, ustalenie zawartości i rodzaju domieszki napowietrzającej powinno być poprzedzone badaniami doświadczalnymi. Należy przy tym uwzględnić właściwości kruszywa z recyklingu.

3.5. Wyniki badania mrozoodporności betonu - odporność na wewnętrzne niszczenie betonu

Badanie to obejmowało ocenę odporności na wewnętrzne niszczenie betonu pod wpływem cyklicznego zamrażania w powietrzu i rozmrażania w wodzie. Podstawą oceny była zmiana statycznego modułu sprężystości betonu.

Zmiany wartości statycznego modułu sprężystości podłużnej betonu, pod wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania, w porównaniu do wyników badań próbek kontrolnych nie poddanych zamrażaniu, przechowywanych przez cały czas badania w wodzie wodociągowej, przedstawiono w tabeli 8. Zamrażanie i rozmrażanie miało wpływ na istotny

spadek wartości modułu sprężystości betonu już po 60 cyklach. Jednakże, całkowite zniszczenie próbek w warunkach obciążenia nastąpiło dopiero po 240 cyklach.

Tabela 8. Zmiany wartości modułu sprężystości betonu poddanego oddziaływaniu mrozu i betonu kontrolnego

Liczba cykli/ Termin badania	0 cykli	60 cykli	120 cykli	180 cykli	240 cykli
Próbki zamrażane	36,78 GPa	31,98 GPa	30,65 GPa	28,67 GPa	*
Próbki kontrolne		37,41 GPa	37,40 GPa	38,55 GPa	38,70 GPa

* próbki uległy zniszczeniu w trakcie pomiaru

Źródło: Opracowanie własne

3.6. Wyniki badania parametrów mechaniki pęknięcia betonu

Wyniki badania parametrów mechaniki pęknięcia betonu zawierającego kruszywo pochodzące z recyklingu w porównaniu do betonu z kruszywem naturalnym, po 28 dniach dojrzewania, zamieszczono w tabeli 9.

Tabela 9. Średnie wartości parametrów mechaniki pęknięcia betonu zawierającego kruszywo wtórne oraz kontrolnego z kruszywem naturalnym

Rodzaj betonu ze względu na pochodzenie kruszywa	$P_{\max}$ [N]	a_c/d [-]	K_{Ic}^s [MN/m ^{3/2}]	CTOD _c [m×10 ⁻⁵]	G_F [N/m]
z kruszywem wtórnym	4150	0.425	1,166	2,020	139,0
z kruszywem naturalnym	4305	0.42	1,209	1,696	126,7

Źródło: Opracowanie własne

Zastąpienie całości kruszywa grubego (2 – 16 mm), kruszywem pochodzącym z recyklingu, bez zmiany uziarnienia, spowodowało obniżenie siły krytycznej, przy której następowała propagacja rysy głównej, nieznaczne obniżenie wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic}^s , co wiąże się z pogorszeniem właściwości wytrzymałościowych materiału. Zwiększeniu uległa krytyczna wartość szerokości wylotu szczeliny pierwotnej CTOD_c, co wiąże się, między innymi, z mniejszym współczynnikiem sprężystości betonu z kruszywem wtórnym. Nieco większą (o ok. 15%) energię pęknięcia G_F w przypadku betonu zawierającego kruszywo wtórne, można tłumaczyć bardziej złożoną (heterogeniczną) mikrostrukturą w porównaniu do betonu zawierającego wyłącznie kruszywo naturalne. Propagacja pęknięcia w próbce o złożonej mikrostrukturze wymaga dodatkowej ilości energii.

4. Wnioski

Podsumowując wyniki badań zawartych w pracy można sformułować następujące wnioski:

1. Kruszywo z recyklingu charakteryzuje się mniejszą gęstością objętościową niż kruszywo naturalne o podobnym uziarnieniu. W przypadku badanego kruszywa, było to spowodowane obecnością pozostałości stwardniałego zaczynu cementowego wokół ziaren kruszywa.
2. Porowata struktura kruszywa wpływa również na jego nasiąkliwość, która jest ponad 2 – krotnie większa od typowej nasiąkliwości kruszywa naturalnego. W związku z tym, należy zwrócić szczególną uwagę na całkowitą ilość wody potrzebną do wykonania mieszanki betonowej o żądanej urabialności. Zwiększa to wskaźnik wodno-cementowy (w/c) betonu, który znacząco wpływa na parametry mechaniczne stwardniałego materiału. Rozwiązaniem może być zastosowanie do produkcji betonu plastyfikatorów bądź superplastyfikatorów, które zmniejszają ilość wody w mieszance.
3. Analiza wyników badań wytrzymałości na ściskanie, potwierdziła, iż wzrost wskaźnika wodno-cementowego (w/c) wpływa negatywnie na wytrzymałość na ściskanie betonu zawierającego kruszywo z recyklingu. Należy, więc dążyć do produkcji betonu recyklingowego o jak najmniejszym wskaźniku wodno-cementowym.
4. Badanie mrozoodporności na podstawie powierzchniowego łuszczenia, pod wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania w obecności soli odladzającej, w przypadku betonów nienapowietrzonych, dało niesatysfakcjonujące wyniki. Stwierdzono, że masa złuszczeń wzrastała wraz ze wzrostem wartości wskaźnika wodno-cementowego (w/c). Oznacza to zmniejszenie odporności na działanie mrozu. Zastosowanie domieszki napowietrzającej spowodowało istotną poprawę mrozoodporności. Jednakże, ustalenie zawartości i rodzaju domieszki napowietrzającej powinno być poprzedzone badaniami doświadczalnymi. Należy przy tym uwzględnić właściwości kruszywa z recyklingu.
5. W przypadku analizowanych receptur wartości parametrów mechaniki pękania betonu zawierającego kruszywo z recyklingu były porównywalne od parametrów uzyskanych dla betonów z kruszywem naturalnym.
6. Stosowanie kruszywa z recyklingu, jako zamiennika kruszywa grubego w betonie, może być skutecznym sposobem zagospodarowania materiału odpadowego z przemysłu budowlanego.

Literatura:

1. Adamczyk J., Dylewski R.: Recykling odpadów budowlanych w kontekście budownictwa zrównoważonego. W: Problemy ekorozwoju, Zielona Góra, 2010, str. 125-131.
2. Sadowska-Buraczewska B., Rutkowski P.: Betony z użyciem kruszywa recyklingowego wysokiej wytrzymałości - dziedzina zrównoważonego rozwoju. Rocznik Ochrony Środowiska, tom 15 No 3, Koszalin 2013, str 2175-2184.
3. Krajowy plan gospodarki odpadami 2014 r., Uchwała Rady Ministrów nr 217 z dnia 24 grudnia 2010 r., MP 2010, nr 10, poz. 101, art. 1183.
4. Grygo R., Łapko A.: Badania nad zastosowaniem betonów recyklingowych w belkach żelbetowych według nowej koncepcji. Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Nr 9, Warszawa-Opole 2012, str. 65-77.
5. Bilitewski B., Hardtle G.: Podręcznik Gospodarki Opadami - teoria i praktyka, Seidel-Przywecki, Warszawa 2006.
6. Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.: Recykling betonu konstrukcyjnego - cz.1, Inżynier Budownictwa, 02/2009.
7. González-Fomteboa B., Martínez-Abella F.: Shear strength of recycled concrete beams, Construtions and Building Materials 21 (2007), str. 887-893.
8. Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.: Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, Cement and Concrete Composites 24 (2002), str. 269-279.
9. Etcheberia M., Vázquez E., Marí A., Barra.: Influence of amount of recycled coarse aggregates and producion process on properties of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Research 37 (2007), str. 735-742.
10. Carinaldesi W.: Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates, Construtions and Building Materials 24 (2010), str. 1616-1620.
11. Wang W., Kou S., Xing F.: Deformation properties and direkt shear of medium strenght concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates, Construtions and Building Materials 43 (2013), str. 187-193.
12. Zaharieva R., Buyle-Bodin F., Wirquin E.: *Frost resistance of recycled aggregate concrete*, Cement and Concrete Research 34 (2004), str. 1927-1932.
13. Gocke A., Nagataki S., Saeki T., Hisada M.: *Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete*, Cement and Concrete Research 34 (2004), str. 799-806.

14. Kosior-Kazberuk M., Grzywa M.: *Recycled Aggregate Concrete as Material for Reinforced Concrete Structures*, Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering No. 2(7) (2014), str. 60-66.
15. PN-EN 197-1:2012 *Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*. Październik 2013.
16. Witryna internetowa: <http://www.ozarow.com.pl/main.php?p=523&s=12892> – *Właściwości cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R*.
17. RILEM TC 121-DRG, 1994: *RILEM recommendation: Specifications for concrete with recycled aggregates*, Materials and Structures 27, 557-559.
18. PN-EN 12390-2:2011 *Badania betonu Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych*, Wrzesień 2011.
19. PN-EN 1097-7:2008 *Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza - Metoda piknometryczna*, Kwiecień 2008.
20. PN-EN 1097-6:2013-11 *Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw Część 6: Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości*, Listopad 2013.
21. PN-EN 12390-3:2011 *Badania betonu Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania*, Październik 2011.
22. Nagrodzka-Godycka K.: *Badanie wytrzymałości betonu i żelbetu w warunkach laboratoryjnych*, Wyd. Arkady, Gdańsk 1999.
23. PKN-CEN/TS 12390-9:2007, *Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance. Scaling (oryg.)*, Czerwiec 2007.
24. Józwiak-Niedźwiedzka D.: *Metody badania mrozoodporności betonu, II Sympozjum naukowo-techniczne*, Kraków 2008
25. PN-B-06250:1988, *Beton zwykły*, Listopad 1988.
26. Recommendation TC 89-FMT RILEM, *Determination of fracture parameters (K_{Ic}^S and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point bend tests*, Materials and Structures (1990) str. 457-460.
27. Kosior-Kazberuk M.: *Ocena parametrów mechaniki pękania betonu cementowego*, Przegląd Budowlany 11 (2012), str. 20-23.
28. Kosior-Kazberuk M.: *Ocena degradacji betonu konstrukcyjnego poddanego procesom niszczenia mrozowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. Białystok 2013.

mgr Monika Ziółko¹

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

ul. Rakowicka 27, 31-510 Kraków

e-mail: ¹monikaz61@wp.pl

Utylizacja i recykling ogniw fotowoltaicznych

Słowa klucze: *ogniwa fotowoltaiczne, recykling, utylizacja, krzem*

Streszczenie: Pod względem ochrony środowiska panele słoneczne są jednym z najczystszych źródeł energii elektrycznej. Pozwalają na bezpośrednią konwersję promieniowania słonecznego wprost na energię elektryczną. Panele zapewniają niezawodność oraz bardzo długi czas bezawaryjnego użytkowania. Charakteryzują się również brakiem produktów ubocznych w trakcie ich eksploatacji, takich jak: emisja zanieczyszczeń, produktów spalania, hałasu. Systemy fotowoltaiczne prawie nie wymagają konserwacji, ponieważ zazwyczaj nie posiadają ruchomych części. Urządzenia tego typu w trakcie eksploatacji nie zanieczyszczają więc środowiska naturalnego oraz nie emitują szkodliwych substancji do atmosfery. Nieco inaczej wygląda jednak proces ich produkcji, recyklingu i utylizacji. Przy produkcji ogniw krzemowych i cienkowarstwowych stosuje się toksyczne pierwiastki i dochodzi do emisji metali ciężkich. Produkcja paneli słonecznych pociąga za sobą również emisję gazów cieplarnianych. Proces produkcji pochłania także duże ilości energii, produkowanej w sposób konwencjonalny, co także nie pozostaje bez wpływu na środowisko naturalne. Podobne problemy napotyka się w procesie utylizacji modułów fotowoltaicznych. Mimo, że istnieje wiele firm zajmujących się recyklingiem baterii słonecznych, odzyskiwaniem i ponownym przetwarzaniem elementów składowych paneli, nie można zapominać, że mają one określony czas życia i wraz ze zwiększeniem skali ich produkcji zacznie wzrastać konieczność opracowania skutecznych metod ich utylizacji na skalę przemysłową.

1. Wstęp

Fotowoltaika to dziedzina nauki, która zajmuje się bezpośrednią przemianą energii słonecznej w energię elektryczną. Coraz więcej ośrodków badawczych na świecie skupia swoje działania na problemach związanych z efektywnym wykorzystywaniem energii słonecznej. Promieniowanie słoneczne, które dociera do Ziemi, stanowi znaczące źródło energii. Jest ona wykorzystywana dzięki konwersji fotowoltaicznej już od XIX wieku [1].

Porównując fotowoltaikę do innych źródeł energii, nie wytwarza ona hałasu, który stanowi główną barierę społeczną na przykład niektórych instalacji wiatrowych. Budowa systemów, które składają się z paneli nie powoduje zmian zagospodarowania terenu ani zmian środowiska naturalnego [2].

W ostatnich latach energetyka słoneczna PV to jedna z najszybciej rozwijających się gałęzi gospodarki. Wzrost produkcji modułów fotowoltaicznych porównywalny jest do dynamiki wzrostu przemysłu mikroelektronicznego w pierwszych fazach jego rozwoju.

Pod względem ochrony środowiska panele słoneczne są czystym źródłem energii elektrycznej. Pozwalają na bezpośrednią konwersję promieniowania słonecznego wprost na energię elektryczną, z wyłączeniem konieczności zastosowania dodatkowych mediów, tak jak to się dzieje w przypadku kolektorów słonecznych. Panele zapewniają niezawodność oraz bardzo długi czas użytkowania bez awarii (nawet do 30 lat) [3]. Systemy fotowoltaiczne prawie nie wymagają konserwacji, ponieważ zazwyczaj nie posiadają ruchomych części. Urządzenia tego typu w trakcie eksploatacji nie zanieczyszczają więc środowiska naturalnego oraz nie emitują szkodliwych substancji do atmosfery oraz hałasu.

W przeciwieństwie do ekologicznej produkcji prądu przy użyciu paneli fotowoltaicznych, inaczej wygląda proces ich produkcji i utylizacji. Przy produkcji ogniw krzemowych i cienkowarstwowych stosuje się toksyczne pierwiastki i dochodzi do emisji metali ciężkich, takich jak nikiel, ołów, kadm [4]. Poza szkodliwymi pierwiastkami, produkcja baterii słonecznych pociąga za sobą emisję gazów cieplarnianych w tym dwutlenku węgla, związków siarki i azotu. Proces produkcji pochłania również duże ilości energii, produkowanej w sposób konwencjonalny, co także nie pozostaje bez wpływu na środowisko naturalne [5].

Podobne problemy napotyka się w procesie utylizacji modułów fotowoltaicznych. Mimo, że istnieje wiele firm zajmujących się recyklingiem baterii słonecznych, odzyskiwaniem i ponownym przetwarzaniem elementów składowych paneli, nie można zapominać, że mają one określony czas życia i wraz ze zwiększeniem skali ich produkcji zacznie wzrastać konieczność opracowania skutecznych metod ich utylizacji na skalę przemysłową.

2. Istota i rodzaje ogniw fotowoltaicznych

Ogniwa fotowoltaiczne zwane inaczej ogniwami słonecznymi lub fotoogniwami służą przede wszystkim do konwersji energii Słońca w ogólnodostępną energię elektryczną. Proces ten nazywany jest konwersją fotowoltaiczną [6]. Ogniwo fotowoltaiczne składa się z płytki półprzewodnika. Istnieje w niej w bariera potencjału elektrycznego w postaci złącza p-n (positive-negative). Pod wpływem padania promieni słonecznych na ogniwo wybijane zostają ze swoich miejsc w strukturze półprzewodnika elektrony. Tworzą one pary nośników, z których część elektronów posiada ładunek ujemny a część dodatni. Po ich wybiciu tworzy się „dziura”. Ładunki zostają rozdzielone poprzez pole elektryczne p-n, które istnieje na złączu. Dzięki temu w ogniwie pojawia się napięcie. Podłączenie kilku ogniw, które wchodzi w skład modułów fotowoltaicznych wystarczy do tego, żeby zasilic urządzenie o niewielkiej mocy. Następuje przepływ prądu elektrycznego.

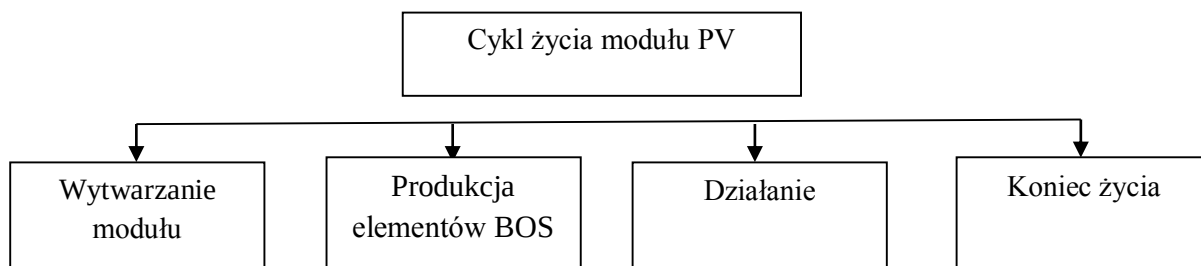
Ogniwa fotowoltaiczne wykonywane są najczęściej z krzemu. Jest to pierwiastek bardzo popularny i często stosowany w elektronice. Jest on po tlenie najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem na Ziemi. Występuje m.in. w piasku. Głównym elementem budowy systemu fotowoltaicznego są niewielkie ogniwa. Ich powierzchnie zawierają się w przedziale 100 – 250 cm², który zapewnia moc wahającą się od 1 do 3 W, przy napięciu 0,6 V. Aby uzyskać większą moc ogniwa łączone są w moduły, a moduły w panele. Panele to powszechnie stosowane formy, możliwe jest jednak dopasowanie kształtu i rozmiaru do używanej powierzchni.

Jednym z najbardziej popularnych surowców, które stosuje się do produkcji modułów PV, jest krzem. Pierwsze ogniwo fotowoltaiczne zbudowane zostało pod koniec XIX wieku. Było to ogniwo selenowe. Poszukiwania odpowiedniego materiału do produkcji ogniw słonecznych rozpoczęły się kilkadziesiąt lat temu. W konsekwencji przeprowadzonych badań wyodrębniona została grupa materiałów, które wykorzystywane są obecnie w produkcji ogniw słonecznych. Wytwarzane są trzy typy ogniw krzemowych dla zastosowań komercyjnych [7]:

- 1monokrystaliczne,
- polikrystaliczne (multikrystaliczne),
- amorficzne.

3. Cykl życia ogniw fotowoltaicznych

Główne etapy cyklu życia ogniw fotowoltaicznych to: produkcja modułów, etap instalacji, eksploatacji i koniec życia ogniw. Oddziaływanie środowiskowe wiąże się ze zużyciem zasobów w czasie wytwarzania. Etap ten charakteryzują wysokie koszty energochłonnego procesu produkcji krzemu o wysokiej czystości jak również procesu jego krystalizacji. Ostatni etap to także duże koszty recyklingu poszczególnych elementów modułu fotowoltaicznego po ich zużyciu [8]. Na rysunku 1 zilustrowano przykładowy cykl życia modułu PV.



Rysunek 1. Cykl życia modułu PV

Źródło: Śliwińska A., Czaplicka – Kolarz K., Wybrane aspekty metodologii analizy cyklu życia odnawialnych źródeł energii, Środowisko – Czasopismo Techniczne, Zeszyt 11, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009, s. 135.

Analiza cyklu życia ogniw fotowoltaicznych wykazała, iż oddziaływanie na środowisko i ilość zużytej energii w tym procesie uzależnione są między innymi od sposobu montażu ogniw. W przypadku, gdy są one zintegrowane z budynkiem (umieszczone na dachach lub fasadach) parametry ich energooszczędności oraz oddziaływania na środowisko są korzystniejsze niż instalacje wolnostojące, ze względu na to, że wymagają zdecydowanie mniejszej ilości materiału do instalacji oraz nie wykorzystują terenu [9]. Pozostałe parametry, które mają wpływ cykl życia modułów fotowoltaicznych to [10]:

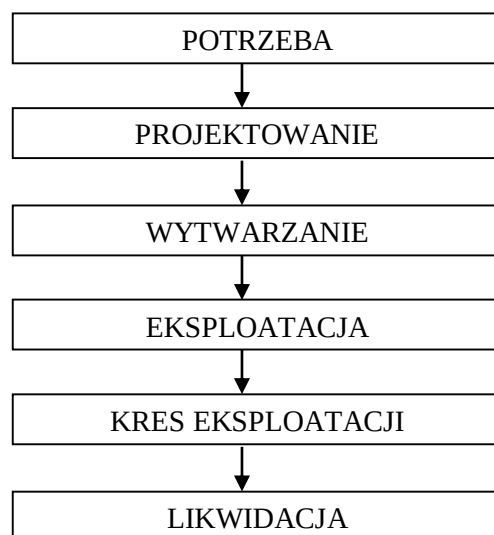
- założona sprawność, zależna od wyżej wymienionych czynników,
- rodzaj krzemu (złom EG – Si czy SoG – Si),
- zastosowana technologia produkcji krzemu,
- grubość warstwy krzemu,
- typ instalacji – wolno stojąca czy zintegrowana z budynkiem, panel lub laminat, rodzaj materiału zastosowanego do ramy,
- wytwarzanie ciepła (Heat Recovery Unit).

Opracowanie skutecznej metody odzyskiwania, oczyszczania oraz dalszego przetwarzania proszku krzemowego daje możliwość uzupełnienia zapotrzebowania na krzem o wysokiej czystości nie tylko w fotowoltaice, ale także metalurgii proszków oraz ceramice niemetalu [11].

Najważniejszym etapem cyklu życia jest produkcja modułu, przede wszystkim krzemu. Założenia stosowane w procesie produkcji mają kluczowy wpływ na rezultaty analizy i mogą przyczyniać się do znacznych rozbieżności wyników, ponieważ duża część krzemu stosowanego w ogniwach pochodzi z energochłonnego procesu produkcji krzemu wysokiej czystości do mikrochipów (proces Siemens) oraz procesu krystalizacji krzemu Czochralskiego.

4. Utylizacja ogniw fotowoltaicznych

Obecnie brak jest danych na temat faktycznego wpływu produkcji modułów fotowoltaicznych na środowisko. W celu przeprowadzenia oceny oddziaływania instalacji fotowoltaicznych na środowisko naturalne należy wziąć pod uwagę wszystkie fazy istnienia rozpatrywanych obiektu technicznego. Zostały one przedstawione na rysunku 2.



Rysunek 2. Fazy istnienia obiektu technicznego

Źródło: Ostrowski P., *Procesy termiczne i chemiczne w recyklingu ogniw i modułów fotowoltaicznych z krystalicznego krzemu*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2010, s. 48.

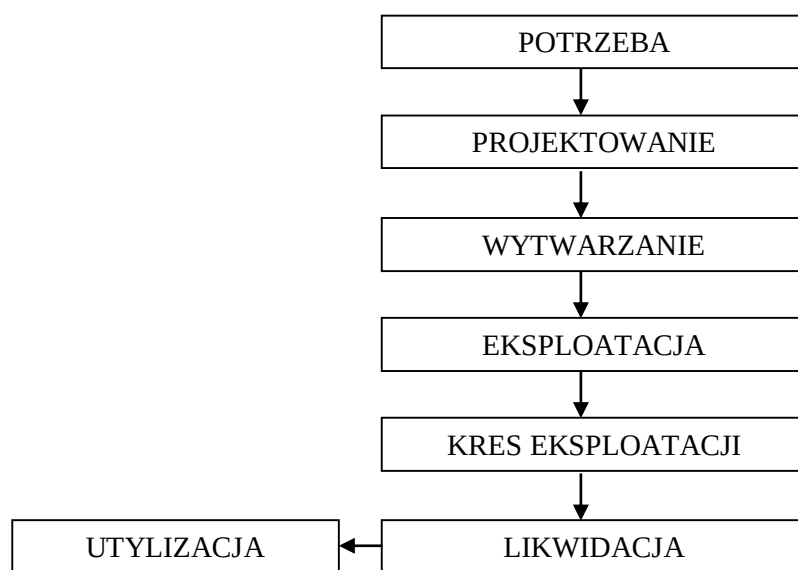
Analizując poszczególne fazy (powstania potrzeby, projektowania, produkcji, użytkowania, kresu eksploatacji oraz likwidacji) istnienia modułów PV nie trudno zauważyć, że jedynie faza użytkowania nie wywiera żadnego negatywnego wpływu na środowisko. W trakcie fazy użytkowania nie zużywa się w bezpośredni sposób żadnej dodatkowej energii oraz nie występuje w tym przypadku emisja substancji szkodliwych do atmosfery. Moduły ogniw fotowoltaicznych mogą zawierać następujące substancje, uznawane za szkodliwe dla środowiska naturalnego, które w procesach utylizacji lub recyklingu mogą ulec uwolnieniu [12]:

- ołów – w stopach lutowniczych (obecnie używa się stopu lutowniczego o zawartości ołowiu poniżej dopuszczalnej normy, która wynosi 0,1% wagowo),
- kadm – jedynie w ogniwach z CdTe oraz CIS z CdS dyrektywa unijna nie zabrania używania modułów z zawartością kadmu, ponieważ w modułach tych występuje on w postaci niemetalicznej,
- brom – zawarty w środkach przeciw palnych, stosowanych w obudowach inwerterów i skrzynek przyłączeniowych.

Panele fotowoltaiczne zbudowane są z materiałów praktycznie w całości podlegających utylizacji. Aluminium, szkło, krzem krystaliczny oraz niewielkie ilości tworzywa sztucznego, mogą być całkowicie zagospodarowane. Konstrukcje, na których ustawiane są panele, zbudowane są ze stali nierdzewnej lub aluminium. Zagospodarowanie wyeksploatowanych paneli powinno jednak odbywać się przy zachowaniu minimalnego obciążenia dla środowiska naturalnego i relatywnie niskich kosztów. Wszyscy producenci urządzeń PV są zobowiązani

do ich odbioru i utylizacji po okresie przydatności. Jak wykazują badania recykling paneli wymaga dwóch podstawowych procesów. Pierwszy z nich to separacja ogniw, która może nastąpić w rezultacie obróbki chemicznej lub termicznej. Drugi proces to oczyszczanie powierzchni modułów fotowoltaicznych wiążący się z usunięciem warstwy antyrefleksyjnej, metalizacji oraz złącza n-p, w celu uzyskania podłoża krzemowe, które mogłoby być powtórnie zastosowane. Jest to możliwe do uzyskania podczas obróbki chemicznej lub techniki laserowego oczyszczania powierzchni. Innym sposobem jest stopienie składników (za wyjątkiem ogniw słonecznych) i zbudowanie nowych modułów z tych komponentów [13].

Najczęstszym sposobem utylizacji modułów fotowoltaicznych jest spalanie. Do atmosfery lub wód gruntowych mogą przedostać się substancje szkodliwe dla środowiska naturalnego. Ryzyko to występuje przede wszystkim dla modułów, które zawierają w swojej strukturze kadm [14]. Wystąpienie procesu utylizacji w poszczególnych fazach istnienia obiektu technicznego przedstawione zostało na rysunku 3.



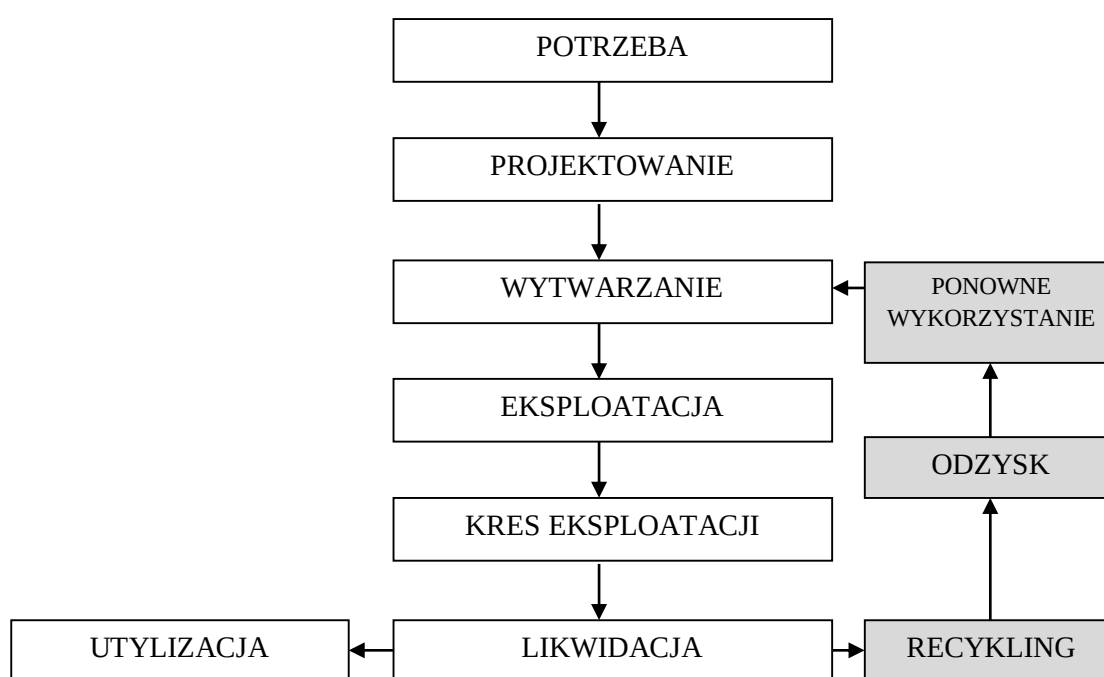
Rysunek 3. Fazy istnienia obiektu technicznego z uwzględnieniem procesu utylizacji

Źródło: Ostrowski P., *Procesy termiczne i chemiczne w recyklingu ogniw i modułów fotowoltaicznych z krystalicznego krzemu*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2010, s. 49.

Proces ten w odniesieniu do modułów z krystalicznego krzemu jest nieco bardziej korzystny, ponieważ krzem nie jest substancją trującą. Pomimo to moduły tego typu mogą zawierać śladowe ilości substancji szkodliwych, takich jak np. ołów. Zniszczenie materiałów lub surowców odpadowych w procesie utylizacji nie jest, więc rozwiązaniem optymalnym. Należy szukać alternatywnych rozwiązań, najlepszym z nich jest recykling [15].

5. Recykling ogniw fotowoltaicznych

Recykling jest to forma odzysku, polegająca na powtórным przetwarzaniu substancji lub materiałów zawartych w materii, będącej odpadem, w celu uzyskania substancji lub materiału o pierwotnym przeznaczeniu lub innym z wyłączeniem odzysku energii. Poddanie zużytych modułów fotowoltaicznych utylizacji, zarówno z ekonomicznego jak i ekologicznego punktu widzenia, jest rozwiązaniem niekorzystnym. Zważywszy na bardzo kosztowny materiał wykorzystywany przy produkcji ogniw PV wysoko oczyszczony krzem. Jak już wspomniano jedynym racjonalnym sposobem likwidacji zużytych modułów jest ich recykling. Na rysunku 4 w fazach istnienia obiektu technicznego poza utylizacją uwzględniono także recykling.

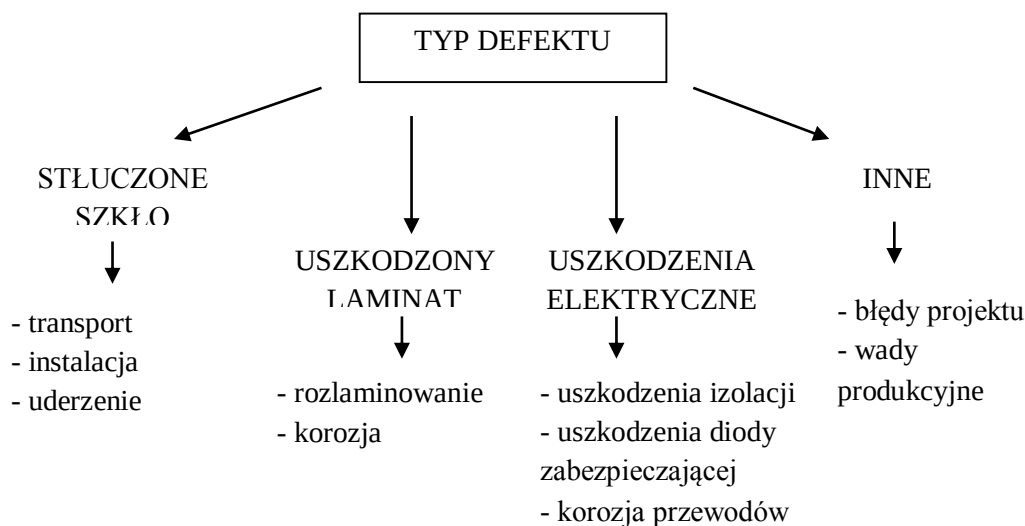


Rysunek 4. Fazy istnienia obiektu technicznego z uwzględnieniem procesów utylizacji i recykling

Źródło: Radziemska E., Ostrowski P., *Life cycle analysis of a solar module and its ecological impact*, Ecology and Technology. T. 15, nr 3 (2007).

Do dnia dzisiejszego nie została opracowana skuteczna metoda recyklingu elementów systemów fotowoltaicznych, która z jednej strony rozwiązałaby problem składowania zużytych materiałów, a z drugiej prowadził by do efektywnego ich odzysku. Jest to istotne zagadnienie, jako, że z roku na rok zwiększa się ilość nowopowstających instalacji fotowoltaicznych, a ich trwałość szacowana jest na około 25 lat [10]. Ważnym aspektem, na który warto zwrócić uwagę jest żywotność ogniw, która jest większa od żywotności całych modułów. Ogniwa, więc mogą zostać użytkowane ponownie, po utylizacji pozostałych elementów. Zmniejsza to między innymi koszty potrzebne do produkcji nowych baterii słonecznych.

Producenci paneli udzielają około 25 – 30 lat gwarancji na swoje produkty, w zależności od technologii, w jakiej zostały wykonane. Mimo tego część paneli fotowoltaicznych ulega uszkodzeniu podczas eksploatacji. Na rysunku 5 przedstawiono zestawienie najczęstszych defektów i uszkodzeń paneli.



Rysunek 5. Typowe uszkodzenia modułów fotowoltaicznych

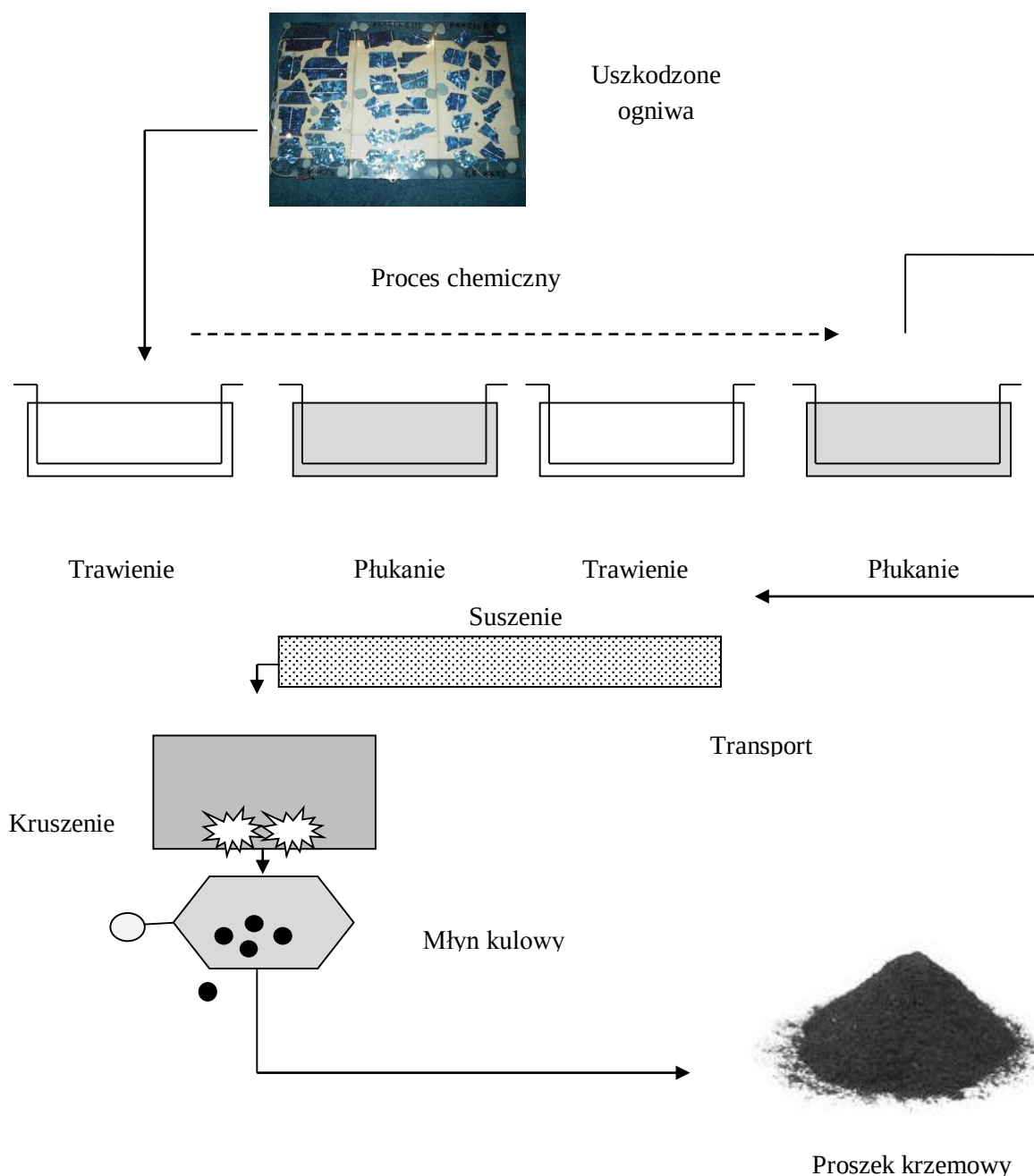
Źródło: Radziemska E., Ostrowski P., , *Recykling i ponowne użycie elementów systemu fotowoltaiki*, 2008, s. 237 – 242.

Proces recyklingu krzemowych ogniw fotowoltaicznych wymaga opracowania skutecznej metody wykorzystania dużej ilości cennego materiału. Jedną z technologii polega na wytworzeniu proszku krzemowego z uszkodzonych i używanych ogniw krzemowych. Niezbędne jest zastosowanie odpowiednich procesów chemicznych i mechanicznych. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe procesy odzyskiwania proszku krzemowego.

Pozyskany proszek wykorzystuje się do produkcji nowych ogniw lub jako dodatek stopowy do stali w przemyśle metalurgicznym.

W recyklingu zużytych modułów fotowoltaicznych istotnym aspektem nie jest tylko odzysk proszku krzemowego, ale także całych płytek krzemowych. Obecnie ilości materiałów, które są możliwe do odzyskania wydają się niewielkie. Mimo tego należy wprowadzać zaawansowane systemy recyklingu ze względu na prognozowany dynamiczny przyrost ilości zużytych modułów krzemowych.

Kolejnym źródłem rozbieżności na etapie produkcji ogniw jest recykling chlorosilanów powstających podczas procesów oczyszczania. Równie istotny jest recykling aluminium i metali żelaznych oraz recykling całego modułu [16].



Rysunek 6. Wytwarzanie proszku krzemowego z uszkodzonych ogniw PV

Źródło: Mroziński A., *Recykling ogniw fotowoltaicznych*, Inżynieria i aparatura chemiczna, nr 5/2010, 49, s. 85.

W ostatnich latach na rynku występuje zdecydowany rozwój technologii w zakresie fotowoltaiki, zwiększenie sprawności modułów, zmniejszenie masowego zużycia krzemu w ogniwach, oraz zwiększenie efektywności cięcia. Wzrasta także recykling wewnętrznych odpadów krzemowych, jak również powstają nowe technologie oczyszczania krzemu.

Możliwe jest zagospodarowanie odpadu powstającego we wszystkich etapach procesu produkcyjnego wytwarzania mono- i polikrystalicznych ogniw i modułów fotowoltaicznych. Podstawowymi metodami wytwarzania bloków monokrystalicznych są [17]:

- metoda Czochralskiego,

– metoda topienia strefowego (*float zone*).

Produkcja krzemu polikrystalicznego wymaga natomiast stosowania metod ukierunkowanej krystalizacji oraz odlewania w formy. Odpad krzemowy, który powstaje w trakcie wytwarzania materiału wyjściowego dla przemysłu fotowoltaicznego i elektronicznego opisanymi metodami, może być ponownie użyty przy produkcji urządzeń fotowoltaicznych. Możliwy jest również odzysk i recykling krzemu odpadowego, pochodzącego na przykład z resztek pozostałych w tyglu oraz skrawków z górnej, dolnej i bocznej części bloku krzemowego.

Możliwy jest także odzysk krzemu z uszkodzonych modułów fotowoltaicznych wykonanych z mono- i polikrystalicznych ogniw krzemowych, wymaga on jednak zastosowania dodatkowej obróbki termicznej, co związane jest z większym wydatkiem energetycznym. Dodatkowo w trakcie recyklingu modułów PV, poza krzemem możliwe jest odzyskanie aluminium, miedzi, szkła, jak również tworzyw sztucznych. Procentowy odzysk materiałów w recyklingu modułów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Odzysk materiałów w recyklingu krzemowych modułów PV

Materiał	Ilość [kg/m²]	Udział masowy [%]	Stopień odzysku [%]
Szkło	10,00	74,16	90
Aluminium	1,39	10,30	100
Ogniwa PV	0,47	3,48	90
EVA, Tedlar	1,37	10,15	-
Kontakty elektryczne	0,10	0,75	95
Substancje spajające	0,16	1,16	-

Źródło: Appleyard D.: *Light Cycle: Recycling PV Materials*. Renewable Energy Word Magazine, Vol. 4, 2009.

Wysoki stopień recyklingu jest możliwy do realizacji przez odzysk szkła, metali oraz krzemu. Może to korzystnie wpłynąć na energo- i materiałochłonność przy wytwarzaniu nowych modułów. Recykling zużytych i wyeksploatowanych ogniw i modułów, jako kompleksowa metoda ochrony środowiska naturalnego, powinna być tak prowadzona, aby maksymalizować wykorzystania surowców wtórnych w produkcji nowych urządzeń, z uwzględnieniem minimalizacji nakładów na ich przetworzenie.

6. Podsumowanie

Temat utylizacji i recyklingu paneli jest dosyć często pomijany i nie do końca opracowany, ponieważ technologia ta jest w Polsce stosunkowo nowa. Środowiska fotowoltaiczne w Europie zobowiązały się do przedstawienia rozwiązań dotyczących utylizacji

odpadów powstałych z instalacji po ich wykorzystaniu i zobowiązanie to podtrzymują. Należy sobie jednak zdać sprawę, że w obecnej proekologicznej polityce, recykling paneli fotowoltaicznych wkrótce przestanie być problemem o małej skali. Prognozy wykonane dla całej Unii Europejskiej wskazują, że w przypadku ekspansji tej technologii, już za około 20 lat strumień odpadów może osiągnąć 3 mln ton rocznie, co oznacza ogromne obciążenie dla środowiska. Nie należy, więc tego problemu bagatelizować i także na szczeblu krajowym szukać odpowiednich rozwiązań w zakresie odzysku i ponownego wykorzystania zużytych ogniw fotowoltaicznych. Zarówno w kwestii metod technologicznych w obszarze recyklingu modułów jak i regulacji prawnych dotyczących tej sfery.

Literatura:

1. Ostrowski P., *Procesy termiczne i chemiczne w recyklingu ogniw i modułów fotowoltaicznych z krystalicznego krzemu*, Gdańsk 2009.
2. Miętus K., *Energia słońca – aspekty ekologiczne i ekonomiczne*, Opole 2011, <http://www.cire.pl/pliki/2/MientusKrzysztof.pdf>.
3. Klugmann – Radziemska E., *Efekty termiczne w konwersji energii w krzemowych ogniwach fotowoltaicznych*, Politechnika Gdańska, Monografie 64, Gdańsk 2005.
4. Vasilis M., Fthenakis, Hyung Chul Kim, Alsema E, *Emissions from Photovoltaic Life Cycles*, Environmental Science & Technology, 2008.
5. Jastrzębska G., *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, WTN, Warszawa 2007.
6. Miętus K., *Energia słońca – aspekty ekologiczne i ekonomiczne*, Opole 2011, <http://www.cire.pl/pliki/2/MientusKrzysztof.pdf>.
7. Ostrowski P., *Procesy termiczne i chemiczne w recyklingu ogniw i modułów fotowoltaicznych z krystalicznego krzemu*, Gdańsk 2009, http://pbc.gda.pl/Content/12850/phd_ostrowski_piotr.pdf.
8. Lewandowski W. M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, wydanie IV, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.
9. Mroziński A., *Recykling ogniw fotowoltaicznych*, Inżynieria i aparatura chemiczna, nr 5/2010, 49.
10. Śliwińska A., Czaplicka – Kolarz K., *Wybrane aspekty metodologii analizy cyklu życia odnawialnych źródeł energii*, Środowisko – Czasopismo Techniczne, Zeszyt 11, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009.
11. Radzewska E., Ostrowski P., *Proceedings of ECOpole*. 3, nr 1, 2009.

12. Radziemska E., *Możliwości i korzyści z likwidacji zużytych modułów PV*, Czysta Energia, Poznań 2007.
13. *Utylizacja paneli fotowoltaicznych – po ilu latach i w jaki sposób?*
<http://inzynierpv.pl/poradnik/utylizacja-paneli-fotowoltaicznych>.
14. Eberspacher Ch., Fthenakis V., *Disposal and recycling of end-of-life PV modules*, PVSC, Anaheim, CA 1997.
15. Ostrowski P., Procesy termiczne i chemiczne w recyklingu ogniw i modułów fotowoltaicznych z krystalicznego krzemu, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2010.
16. *Krzem dla ogniw słonecznych*, Chemic, nr 2, luty 2002, Nowiny Technologiczne.
17. Klugmann-Radziemska E., Ostrowski P., Lewandowski W. M., Ryms M., *Aspekty ekologiczne i ekonomiczne recyklingu krzemowych ogniw i modułów fotowoltaicznych*, Nafta – Gaz, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2010.

mgr inż. Joanna Czaja¹, mgr inż. Justyna Jaskowska-Lemańska²

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

e-mail: ¹czajaj@agh.edu.pl, ²lemanska@agh.edu.pl

Wpływ wybranych zanieczyszczeń kruszywa z recyklingu na zmianę parametrów technicznych betonu

Słowa kluczowe: *recykling, kruszywo wtórne, logistyka odzysku*

Streszczenie: Obecne megatrendy rozwojowe ukierunkowane są na odnajdywanie równowagi pomiędzy ekonomią, aspektami społecznymi oraz środowiskowymi. Rozwój społeczno-gospodarczy, dąży do zachowania równowagi pomiędzy wskazanymi ogniwami, co przejawia się w aktualnych strategiach UE. W wielu gałęziach gospodarki, zasady zrównoważonego rozwoju zostały szeroko zbadane i wdrożone. Komunikat Komisji Europejskiej opublikowany 1 lipca 2014 wskazuje jednak na wciąż nieefektywne gospodarowanie surowcami w budownictwie.

Znaczne ilości gruzu pochodzącego z rozbiórek obiektów budowlanych oraz nieustające zapotrzebowanie na mieszankę betonową podczas realizacji nowych inwestycji powoduje konieczność poszukiwania alternatywnych metod produkcji betonu z wykorzystaniem dostępnych zasobów. Gruz betonowy i ceglany stanowi procentowo największy udział w głównych materiałach roboczych. Celem recyklingu gruzu budowlanego jest ponowne wykorzystanie pokuszonego materiału, jako kruszywa do betonu. Zwraca się jednak uwagę, że tak pozyskane kruszywo należy przed zastosowaniem przebadać zgodnie z procedurą badań kruszyw naturalnych, gdyż jego właściwości fizyko-chemiczne zależą między innymi od pierwotnej klasy betonu, stopnia hydratacji ziaren cementu, poziomu skorodowania a także występujących w nim zanieczyszczeń.

Za szkodliwe zanieczyszczenia kruszywa uważa się materiały utrudniające wiązanie i twardnienie betonu, zmniejszające wytrzymałość i szczelność betonu, wywołujące odpryski, naruszające ochronę antykorozyjną zbrojenia. W pracy zidentyfikowano zanieczyszczenia występujące w kruszywie wtórnym pochodzącym z rozbiórek obiektów budowlanych oraz zbadano ich wpływ na parametry techniczne betonu.

1. Wstęp

Rozwój społeczno-gospodarczy oraz znaczący wzrost zapotrzebowania na kruszywa w budownictwie, powoduje konieczność poszukiwania innych źródeł kruszyw niż naturalne. Zarówno ze względów środowiskowych jak i ekonomicznych czy społecznych, atrakcyjnym rozwiązaniem staje się zastosowanie kruszyw pochodzących z odpadów przemysłowych lub z recyklingu gruzu budowlanego.

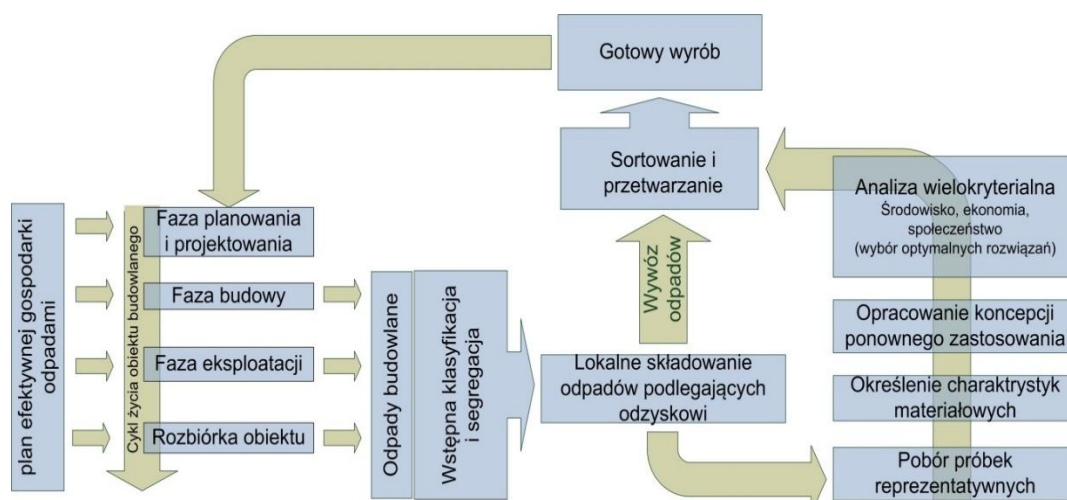
Kruszywa pochodzące z recyklingu gruzu budowlanego wydają się być rozwiązaniem najbardziej korzystnym zarówno ze względów ekonomicznych jak i środowiskowych, jednak przy szacowaniu kosztów, należy mieć na uwadze wzrost nakładów finansowych na etapie

rozbiórki obiektu oraz przetworzenia materiału rozbieranego. Znaczną energochłonnością cechuje się proces kruszenia materiału w celu uzyskania odpowiednich frakcji oraz selekcja zanieczyszczeń. Należy, więc prowadzić badania umożliwiające zwiększenie zakresu stosowania kruszywa z recyklingu poddanego mniej rygorystycznym procesom oczyszczania, w tym celu należy dokładnie rozpoznać wpływ poszczególnych zanieczyszczeń na parametry techniczne betonu w zależności od ich parametrów ilościowych jak i jakościowych.

Niezwykle istotne wydaje się być zidentyfikowanie typowych zanieczyszczeń w gruzie budowlanym w aspekcie jakościowym jak i ilościowym, a następnie ustalenie ich wpływu na mieszankę betonową oraz beton. Stosowanie kruszywa z recyklingu powinno stać się powszechną praktyką, niebudzącą obaw a co za tym idzie sprzeciwu inżynierów oraz inwestorów w implementację materiału z „odzysku” na potrzeby budowy nowego elementu bądź obiektu budowlanego.

2. Gospodarka kruszywami naturalnymi oraz pochodzącymi z recyklingu

Kruszywo z recyklingu pochodzi z gruzu budowlanego otrzymanego na drodze rozbiórki obiektu lub jego elementu wykonanego z betonu lub ceramiki budowlanej oraz jego kruszenia a następnie oczyszczania. Już na etapie planowania inwestycji, dobór materiałów, z jakich będzie wykonany obiekt budowlany, zdecyduje o możliwościach jego ponownego zastosowania. Analiza wielokryterialna doboru materiału powinna uwzględniać koszt materiału w całym cyklu życia LCA (life cycle assessment). Materiały tanie w produkcji ostatecznie mogą okazać się bardzo kosztowne w procesach przetwórczych celem odzyskania z nich wartości zarówno pod względem ekonomicznym, ale także ze względu na obciążenie środowiska np. emisją CO₂ oraz energochłonnością [1]. Koszt produkcji betonu jest wysoki oraz powoduje wysoką emisję dwutlenku węgla, lecz jego trwałość oraz możliwości jego ponownego użycia przemawiają za jego ostatecznym niskim wpływem na środowisko poprzez niewielką potrzebę przetwarzania, a także ograniczenie potrzeby wydobywania naturalnych surowców. Ideowe przepływy fizyczne w logistyce materiałów budowlanych obrazuje rysunek 1.



Rysunek 1. Przepływy fizyczne w logistyce odzysku materiałów budowlanych

Źródło: [1]

Rozbiórka obiektu budowlanego stanowi istotny - z punktu widzenia recyklingu - etap w cyklu jego życia. Dobór technologii rozbiórkowych oraz jakość prowadzenia robót w zakresie selektywnej zbiórki ręcznej odpadów, będzie warunkowała jakość gruzu - w myśl czego należy rozumieć jego czystość. W Polsce na dzień dzisiejszy brak jest dobrych praktyk w zakresie gospodarowania odpadami na budowie. O aktualnej świadomości społecznej w aspekcie gospodarki odpadami budowlanymi w Polsce świadczy spotykana niedbałość w segregacji gruzu budowlanego z bieżąco prowadzonych inwestycji, co zobrazowano na rysunku 2.



Rysunek 2. Gruz budowlany z rozbiórki obiektów kubaturowych w woj. Małopolskim (2014)

Źródło: [1]

Dbałość, o jakość gruzu betonowego będącego materiałem wyjściowym do pozyskania kruszywa z recyklingu, należy rozpocząć już na placu budowy. Sелеktywna zbiórka powinna być oparta na planie efektywnego gospodarowania odpadami, który powinien zawierać [1]:

- analizę przebiegu procesów budowlanych z punktu widzenia powstawania odpadów,
- klasyfikację odpadów zgodnie z ustawą,

- sposób segregacji,
- sposób lokalnego składowania,
- harmonogram wywozu odpadów.

Jakość prac segregacyjnych w obrębie placu budowy istotnie wpływa na stopień zanieczyszczenia asortymentu a w konsekwencji zadecyduje o potencjale materiału, jako surowca wtórnego.

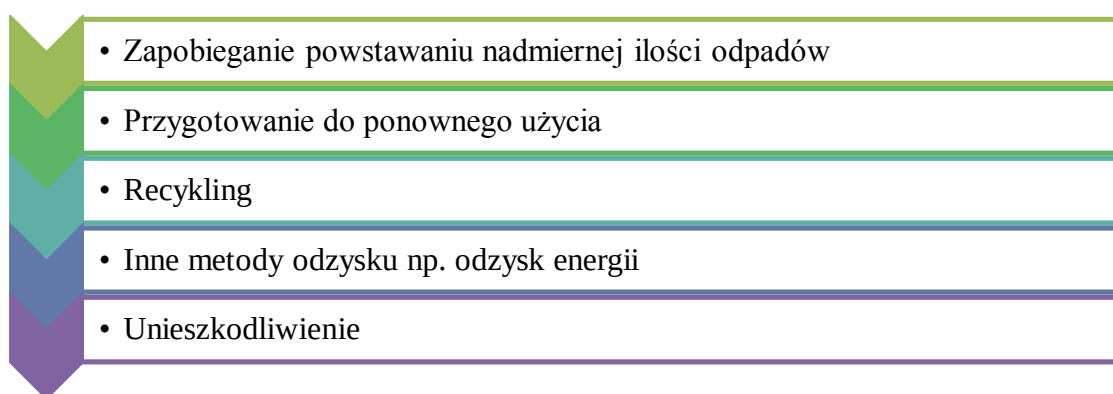
Sztandarową inwestycją, za którą należy iść przykładem jest Business Garden Poznań, w której jedna z firm podwykonawczych wdrożyła kompletny system gospodarowania odpadami na placu budowy. Jako sukcesy podaje się odzysk surowców budowlanych na poziomie 75%, niższy koszt inwestycji oraz wzrost świadomości ekologicznej pracowników. Deweloper uzyskał dla inwestycji certyfikat LEED na poziomie GOLD, gdzie jednym z kryteriów jest optymalna gospodarka odpadami już na etapie realizacji inwestycji [2]. Prawidłową organizację placu budowy pod kątem przygotowania materiału odpadowego do recyklingu przedstawia rysunek 3.



Rysunek 3. Rozwiązania w zakresie gospodarowania odpadami na budowie Business Garden Poznań

Źródło: [2]

Unia Europejska ustanawia ramy prawne, mające na celu kontrolowanie całego cyklu życia produktów, od ich wytwarzania po unieszkodliwianie, skupiając się na odzysku i recyklingu. Postępowanie z odpadami powinno odbywać się według hierarchii przedstawionej na rysunku 4, gdzie już na samym początku należy zapobiegać powstawaniu znacznych ilości odpadów [3].



Rysunek 4. Obowiązująca hierarchia postępowania z odpadami

Źródło: [3]

Zgodnie z wymaganiami Rady Europejskiej, Polska również podjęła środki legislacyjne w postaci Rozporządzenia Ministra Środowiska z 21 marca 2006 r. w sprawie odzysku lub unieszkodliwiania odpadów poza instalacjami i urządzeniami na mocy, którego odpady budowlane poddawane są procesom odzysku R14. Proces ten polega na wykorzystaniu w całości lub części odpadów wymienionych w załączniku 1 do ustawy. Gruz betonowy z rozbiórek i remontów znajduje się pod kodem 17 01 01, stanowi on procentowo największy udział w głównych materiałach rozbieralnych [4]. Najczęściej jednak materiał rozbiórkowy wykorzystywany jest jedynie, jako gruz budowlany niezależnie od jego właściwości. Spowodowane jest to niewielką świadomością możliwości ponownego wykorzystania a co za tym idzie niewłaściwym jego gospodarowaniem.

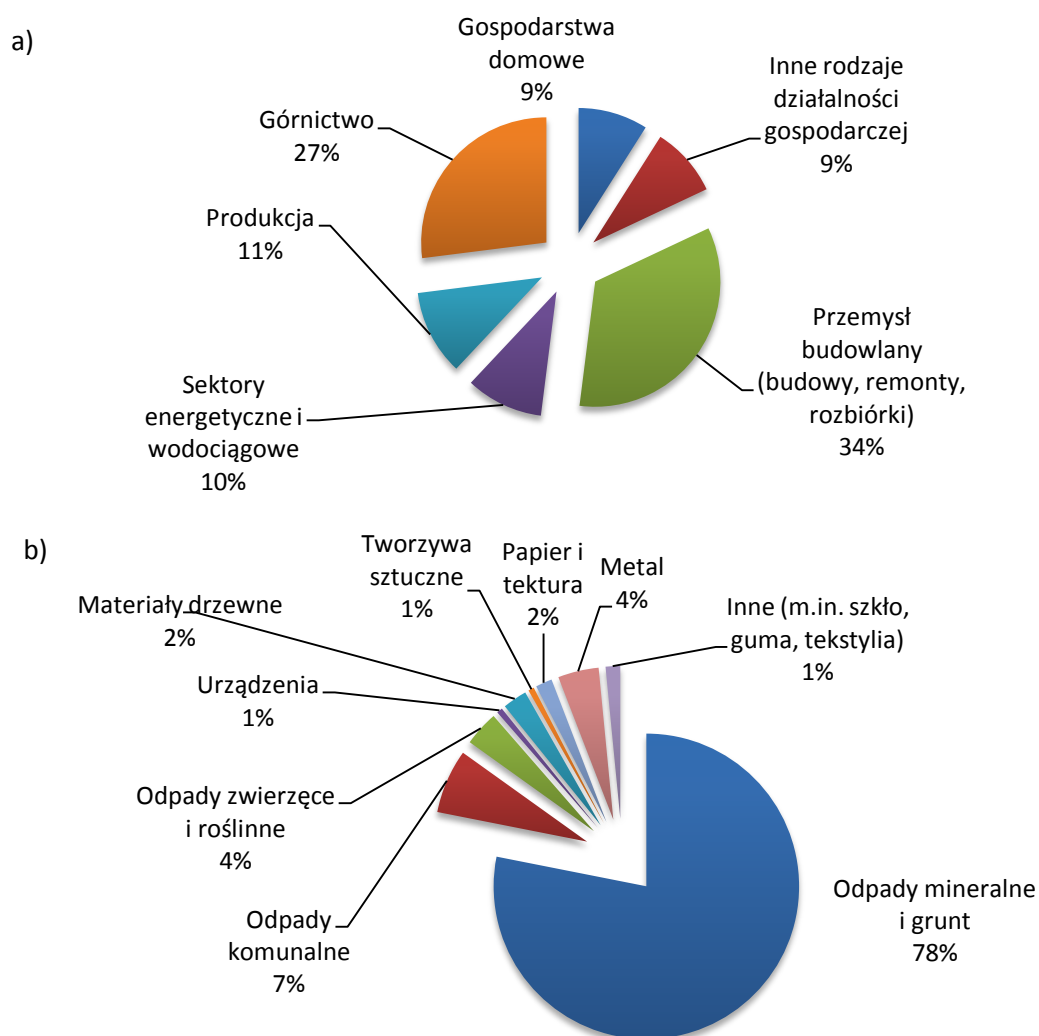
Szacuje się, że światowe zapotrzebowanie rynku na kruszywa wzrosło o 5,2% w roku 2014 i takim sam wzrost spodziewany jest w roku 2015 aż do 48,3 miliardów ton [5]. Statystyczna wystarczalność udokumentowanych złóż w Polsce przedstawiono w tabeli 1, prognozę sporządzono w roku 2010 [6].

Tabela 1. Statystyczna wystarczalność udokumentowanych złóż

Rodzaj złóż	Statystyczna wystarczalność zasobów (lata)
Kamienie łamane i bloczne	39,2
<u>Kruszywo żwirowo-piaskowe</u>	<u>9,9</u>
Dolomit	15,8
Wapienie i margle (dla cementu)	70,1
Wapienie (przemysł wapienniczy)	41,7
Gips. Anhydryt	52,3

Źródło: [6]

Uwzględniając coraz większe ograniczenia ekologiczne w postaci chociażby programu Natura 2000, w niedalekiej przyszłości możemy spodziewać się problemów w rozwoju wydobywania i produkcji kruszyw. Przykładowo w woj. małopolskim, w obszarach Natura 2000 jest 45% zasobów kruszyw żwirowo-piaskowych, 35% piasków podsadzkowych, ok. 9% zasobów wapieni i piaskowców i ponad 90% zasobów torfu [6]. Przytoczona statystyka zachęca i zobowiązuje do rozwoju rynku oraz technologii przetwórczych kruszyw wtórnych i pochodzących z recyklingu. Eurostat podaje, iż liczba odpadów generowanych w samej UE w roku 2010 przekroczyła 2,5 miliardów ton, z czego 35% a więc 860 milionów ton generuje przemysł budowlany w zakresie budowy i rozbiórki obiektów budowlanych. Wskazany sektor gospodarki generuje największą ilość odpadów mineralnych i gruntu w skład których wchodzi gruz betonowy (rys. 5) [5].



Rysunek 5. Statystyczne ujęcie generowanych odpadów w UE: (a) wg rodzaju działalności gospodarczej (b) wg kategorii odpadów

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5]

Recykling jest uważany za najlepszy sposób zarządzania odpadami budowlanymi i rozbiórkowymi. Należy jednak wymienić kilka przeszkód, stanowiących barierę implementacyjną:

- niskie zaufanie klientów i inżynierów do materiału z odzysku, co jest wynikiem braku certyfikacji kruszywa wtórnego,
- brak świadomości społecznej a zwłaszcza uczestników logistyki odzysku w odniesieniu do korzyści środowiskowych oraz finansowych wynikających z recyklingu materiałów budowlanych w tym gruzu budowlanego,
- niska jakość powstałych produktów wynikająca z niedostatecznie rozwiniętych technologii przetwórstwa tego typu odpadów,
- niedostateczny zasób informacji o jakości odpadu.

Świadomość skończonej ilości pokładów skał wykorzystywanych w przemyśle budowlanym oraz rosnąca ilość odpadów mineralnych, istotnie mobilizuje Rząd Polski oraz Radę UE do podjęcia działań w postaci rozporządzeń, programów itp. celem likwidacji barier implementacyjnych stojących na drodze wtórnego wykorzystania materiałów budowlanych a zwłaszcza gruzu betonowego. Warto więc przyjrzeć się wymaganiom, jakie stawiane są kruszywom naturalnym oraz w adaptacji tych wymagań do kruszyw pochodzących z recyklingu gruzu budowlanego.

3. Wymagania stawiane kruszywom do betonu

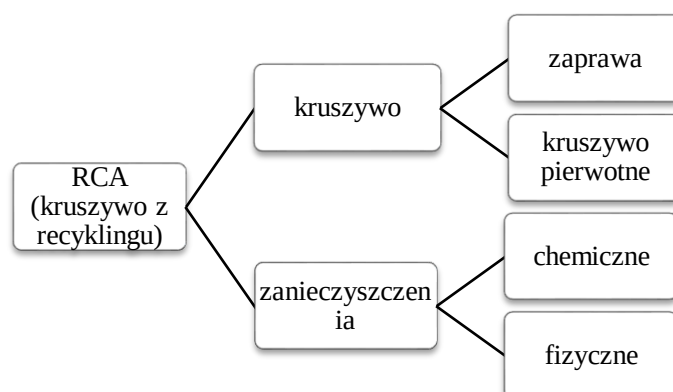
Norma PN-EN 12620 definiuje kruszywo z recyklingu, jako kruszywo, będące produktem przeróbki nieorganicznego materiału użytego poprzednio w budownictwie [7]. Aktualnie ukonstytuowało się przekonanie, aby wymagania stawiane kruszywom z recyklingu były tożsame z wymaganiami stawianymi kruszywom naturalnym. W zależności od wymiaru kruszywa, stosuje się podział:

- kruszywo drobne, gdzie D mniejsze lub równe 4 mm,
- kruszywo grube, gdzie D większe lub równe 4 mm, oraz d większe lub równe 2 mm,
- kruszywa uziarnione naturalnie pochodzenia lodowcowego lub rzeczno o D mniejszym lub równym 8 mm,
- inne kruszywa, jako mieszanki kruszywa drobnego i grubego.

Gdzie (d) określa wymiar dolny a (D) wymiar górny sita.

Podstawowymi składowymi gruzu budowlanego jest beton oraz cegła. W kruszywie z recyklingu mogą jednak występować szkodliwe zanieczyszczenia, a więc materiały, które

utrudniając wiązanie i twardnienie betonu, zmniejszające wytrzymałość i szczelność betonu, wywołujące odpryski czy też naruszają ochronę antykorozyjną zbrojenia.



Rysunek 6. Struktura kruszywa z recyklingu

Źródło: Opracowanie własne

W tabeli 2 zestawiono rodzaje zanieczyszczeń ujętych w polskich normach [7,8,9] w zależności od uziarnienia oraz ich dopuszczalne stężenie dla wszystkich kruszyw stosowanych w betonach. Zanieczyszczenia te mogą pochodzić z miejsca wydobycia kruszywa lub miejsca i warunków jego składowania. W kruszywach z recyklingu mogą występować dodatkowo zanieczyszczenia o innym charakterze (nie ujętym w wymienionych normach).

Tabela 2. Dopuszczalne stężenie zanieczyszczeń w kruszywie

Rodzaj zanieczyszczeń		Uziarnienie	Dopuszczalne stężenie masowe/Uwagi
Fizyczne	Gliniaste (A)	01/, 0/2, 0/4	4%
		0/8, 1/2, 1/4, 2/4	3%
		0/16, 0/32, 1/8, 4/8	2%
		0/63, 2/16, 4/16, 4/32	1%
		8/16, 8/32, 16/32, 32/63	0,5%
	Materiały pochodzenia organicznego	0/4	0,5%
		4/63	0,1%
	Materiały utrudniające twardnienie	-	Stężenie, przy którym próbka betonu wykazuje spadek wytrzymałości powyżej 15%
Chemiczne	Związki siarkowe	-	1%
	Chlorki	-	0,04% (żelbet, kablobeton) 0,02% (strunobeton)
	Alkalia	-	Brak jednoznacznych wytycznych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [8,9]

Odrębne zalecenie stworzone zostały przez International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM), według których kruszywo z recyklingu należy dzielić na trzy klasy [10]:

- RCAC I – kruszywo otrzymywane z gruzu ceglanego,
- RCAC II – kruszywo otrzymywane z gruzu betonowego,
- RCAC III – zmieszane kruszywo z recyklingu oraz naturalnego kruszywa.

Podział ten obejmuje frakcje powyżej 4 mm, gdyż przyjmuje się, że tradycyjne wymagania (normy europejskie) stawiane kruszywom drobnym są wystarczające. Wymagania stawiane kruszywom z recyklingu (o frakcji powyżej 4 mm) w zakresie dopuszczalnych zanieczyszczeń, zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wymagania stawiane kruszywom z recyklingu do betonu w zakresie dopuszczalnych zanieczyszczeń

Cecha kruszywa	RCAC [%]		
	I	II	III
Maksymalna zawartość materiałów obcych	5	1	1
Maksymalna zawartość metali	1	1	1
Maksymalna zawartość zanieczyszczeń organicznych	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość siarczanów rozpuszczalnych wyrażona jako SO ₃	1	1	1

Źródło: RILEM [10]

Dodatkowe wymagania stawia się kruszywom typu RCAC III:

- minimalna zawartość naturalnego kruszywa: co najmniej 80%,
- maksymalna zawartość kruszywa typu I: 10%.

Wg wytycznych RILEM kruszywo z recyklingu nie może zawierać żadnego materiału czy substancji w określonym stężeniu, przy którym wytrzymałość betonu spada poniżej 75% wytrzymałości próbki z czystym kruszywem. Co więcej, wszelkie inne wymagania nawiązujące do aspektów zdrowotnych i ochrony środowiska, ujętych odrębnymi przepisami, muszą być spełnione. W wytycznych określono również zakres możliwych zastosowań kruszywa w odniesieniu do klasy betonu (tabela 4) [10]. Należy zwrócić uwagę, że wymienione zalecenia nie są obowiązkowe, do czasu, gdy nie zostaną prawnie ustanowione w danym państwie.

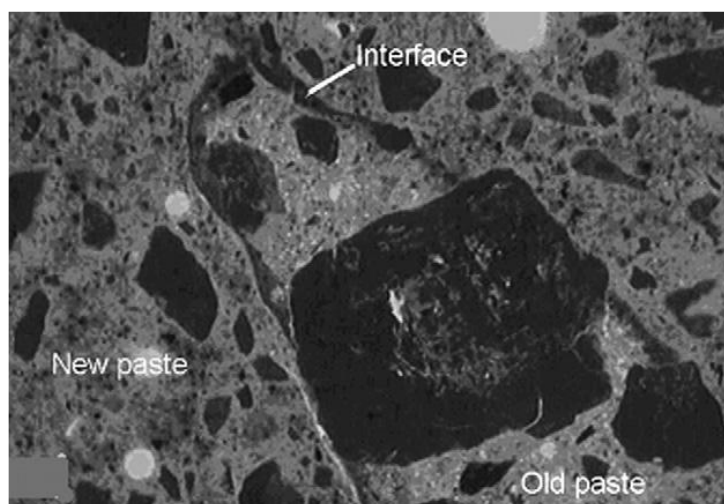
Tabela 4. Ograniczenia stosowania RCAC w odniesieniu do klasy betonu

	RCAC I	RCAC II	RCAC III
Maksymalna dopuszczalna klasa betonu	C16/20	C50/60	brak limitów

Źródło: RILEM [10]

3.1 Charakterystyka betonu z kruszywem z recyklingu

Beton jest kompozytem powstającym z cementu, wody, kruszywa, dodatków mineralnych i domieszek chemicznych. Zadaniem cementu i wody, czyli zaczynu cementowego poprzez ich wzajemną reakcję chemiczną jest połączenie ziaren kruszywa aż do utworzenia ciała stałego. Właściwości samego kruszywa lub zaczynu cementowego nie są tożsame z ich wypadkową w betonie. Ostateczną ocenę przydatności kruszywa można osiągnąć na podstawie łącznych badań składnika i kompozytu [11]. Sytuacja nie zmienia się w przypadku stosowania kruszywa z recyklingu, beton staje się wówczas jeszcze bardziej złożonym kompozytem (rys 7). Decydującym czynnikiem przesądzającym o parametrach wytrzymałości betonu na kruszywie z recyklingu jest jakość kontaktu starej i nowej matrycy betonu [12], istotny wpływ na spadek wytrzymałości betonu odgrywa również rodzaj i udział zanieczyszczeń kruszywa.

**Rysunek 7. Powierzchnia interakcji starej i nowej matrycy betonu [12]**

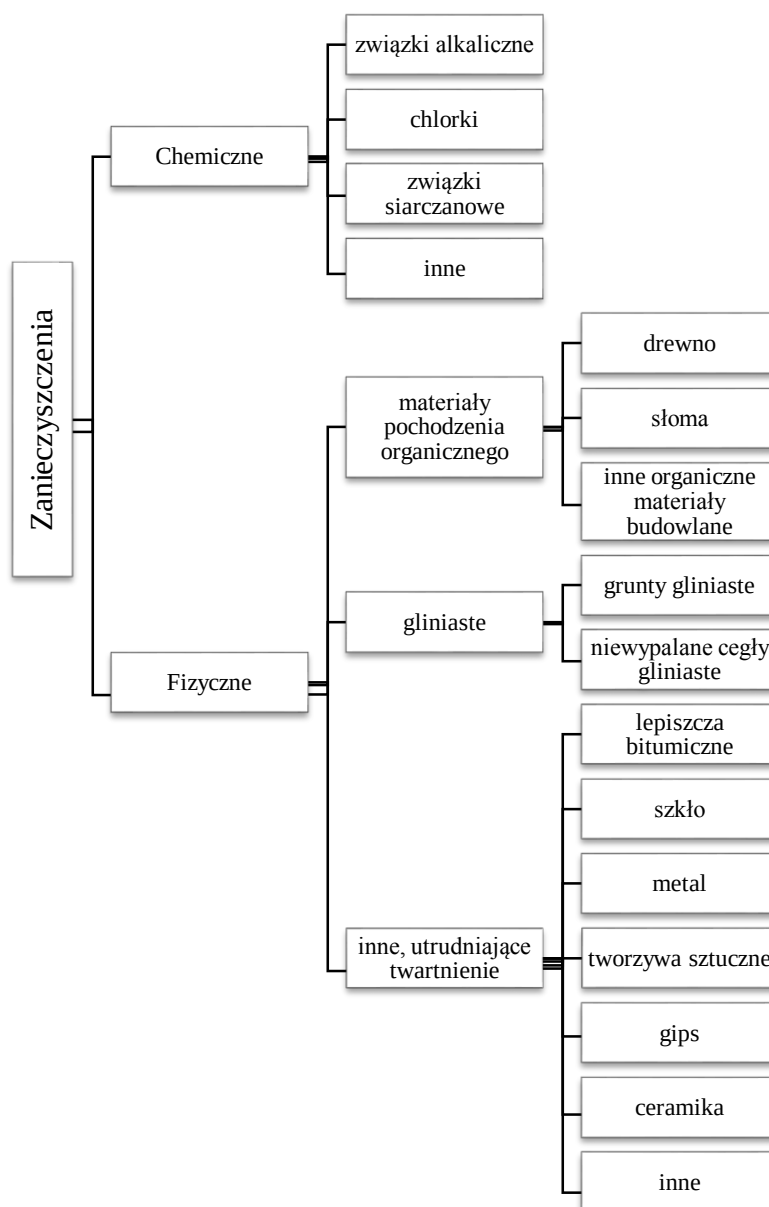
Źródło: [12]

Parametry techniczne betonu powstałe na bazie kruszywa z recyklingu trudno szacować na etapie ich projektowania – jest to możliwe jedynie w przypadku betonu pierwotnego. Na zaistniały stan rzeczy decydujący wpływ posiada szerokie zróżnicowanie parametrów

technicznych kruszywa z recyklingu, będącego wypadkową ilościową jak i jakościową zaprawy, kruszywa pierwotnego oraz zanieczyszczeń.

3.2 Podział zanieczyszczeń i ich wpływ na parametry techniczne betonu

W kruszywie z recyklingu mogą występować zanieczyszczenia fizyczne i chemiczne, ich rodzaj i ilość są znaczące dla ponownego zastosowania kruszywa do betonu.



Rysunek 8. Podział rodzajów zanieczyszczeń kruszywa z recyklingu

Źródło: Opracowanie własne

Możemy wyróżnić następujące źródła zanieczyszczeń:

- pierwotne zanieczyszczenia betonu,
- zanieczyszczenia betonu w fazie eksploatacji obiektu (zanieczyszczenia chemiczne),

- błędy lub niedbałość w selektywnej zbiórce odpadów na budowie,
- niewłaściwe składowanie odpadów,
- zanieczyszczenia nabyte podczas transportu.

3.3 Zanieczyszczenia fizyczne kruszywa wtórnego

Lepiszczą bitumiczne - materiały bitumiczne wpływają redukcyjnie na wytrzymałość betonu. Dodatek w ilości 30% objętości kruszywa z recyklingu powoduje trzydziestoprocentowy spadek wytrzymałości betonu w odniesieniu do czystego kruszywa z recyklingu [5]. Norma PN EN-12620 [7] dopuszcza do 10% zanieczyszczeń kruszywa materiałami bitumicznymi, jednak większość producentów stawia własny limit na poziomie 5% a nawet 1% masy kruszywa. Źródłem lepiszcza bitumicznego w kruszywie z recyklingu są: asfalt, smoła, papa, lepik.

Szkło - szkło powinno być usuwane w pierwszej fazie rozbiórek obiektu i nie powinno pojawić się w kruszywie. Restrykcyjne podejście do tego typu materiału wynika ze zbliżonej gęstości szkła do gęstości betonu oraz cegły, co powoduje trudności w ich separowaniu. Szkło ze względu na swoją budowę krystalograficzną łatwo wchodzi w reakcje z alkaliowymi pochodzącymi np. z cementu. W wyniku reakcji w obecności wilgoci tworzą się łatwo rozpuszczalne uwodnione krzemiany, które zwiększają swoją objętość, co prowadzi do rozsadzania struktury betonu i ostatecznie do jego destrukcji [5]. Jednym z rozwiązań ograniczających ewentualne wystąpienie reakcji alkalicznej jest zastosowanie cementów z grupy NA oraz ograniczenie ilości cementu w 1 m³ mieszanki betonowej. Zalecana, dopuszczalna ilość szkła nie powinna przekroczyć 1% masy kruszywa [7]. Źródłem szkła w kruszywie wtórnym mogą być: szyby okienne, kształtki szklane, szkło piankowe, wata szklana.

Drewno oraz tworzywa sztuczne – ze względu na niską gęstość, materiały te są łatwe do wyselekcjonowania. Dobrą praktyką jest separacja wspomnianych zanieczyszczeń w procesie wydmuchiwania lub wypłukiwania. Stosuje się również separacje ręczną pomiędzy pierwszym a drugim stopniem kruszenia [5]. Dopuszczalna zawartość drewna i plastiku w betonie wynosi maksymalnie 0,1% masy kruszywa [7]. Źródłem tego typu materiałów są: deski, bale, klepki podłogowe (parkiet), panele podłogowe, sklejka, płyty wiórowe, płyty pilśniowe, okna, drzwi, wykładziny, elementy instalacji sanitarnych.

Metal - metale ferromagnetyczne usuwane są z kruszywa za pośrednictwem pasów magnetycznych, pozostałe z nich usuwa się przy zastosowaniu prądów wirowych [5]. Metale również zostały zaklasyfikowane przez normę do grupy „pozostałe zanieczyszczenia”, stąd

dopuszczalna ich ilość nie powinna przekraczać 0,1% [7]. Przykłady materiałów stalowych budowlanych to: stal zbrojeniowa, kształtowniki, rury, blachy, zawory hydrauliczne, wanny, grzejniki, okucia budowlane (m.in. klamki, zawiasy, zamki).

Grunt - jak pozostałe materiały należące do grupy „inne zanieczyszczenia” w normie EN-12620, nie powinny znajdować się w betonie w większym udziale niż 0.1% masy kruszywa [7].

Gips - zanieczyszczenie gipsem wymaga restrykcyjnego podejścia, wynika to z zagrożenia ekspansji siarczanowej w betonie. Źródłem gipsu mogą być płyty gipsowo kartonowe, suchy jastrych, tynk gipsowy, obudowy przeciwpożarowe konstrukcji stalowych.

Wybrane wartości korelacji pomiędzy zawartością zanieczyszczeń fizycznych a spadkiem wytrzymałości betonu na ściskanie obrazuje tabela 5:

Tabela 5. Wpływ zanieczyszczeń fizycznych kruszywa wtórnego na parametry betonu

Material zanieczyszczający	Zawartość w mieszance kruszywowej [%]	Wpływ na wytrzymałość na ściskanie
Tynk wapienny	< 7	Redukcja wytrzymałości betonu na ściskanie o 15% w porównaniu do betonu opartego na mieszance mineralnej pozbawionej zanieczyszczeń
Grunt	< 5	
Gips	< 3	
Asfalt	< 2	
Farby na bazie winylu	< 0,2	

Źródło: [13]

3.4 Zanieczyszczenia chemiczne kruszywa wtórnego

Ocena zanieczyszczeń chemicznych występujących w kruszywie z recyklingu jest istotna ze względu na nieznane pierwotne parametry betonu, a także zawartość czynników korozyjnych będących wynikiem narażenia konstrukcji na niekorzystne czynniki zewnętrzne. Do tego rodzaju zanieczyszczeń należą: chlorki, siarczany, związki alkaiczne itp.

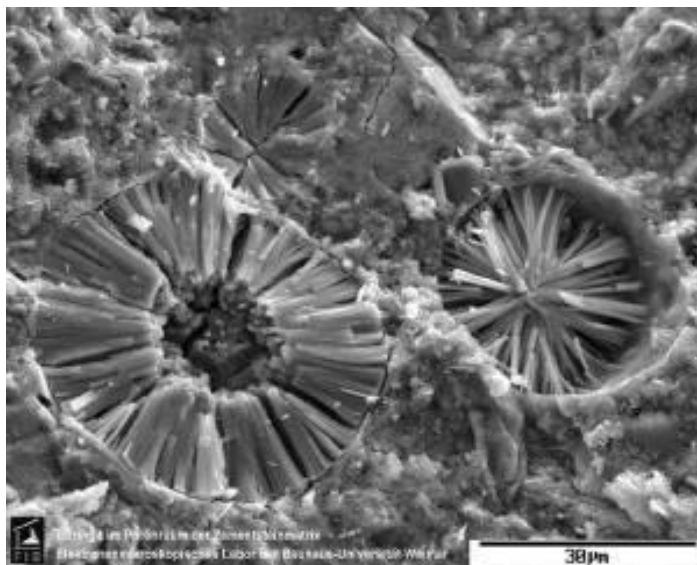
Związki alkaiczne mogą pochodzić z cementu portlandzkiego oraz dodatków mineralnych do betonu, które wywołują reakcje ASR (alkali silica reaction) w kontakcie z podatnym kruszywem tj. kruszywa zawierające reaktywne formy krzemionki, bezpostaciowy opał, włóknisty lub kryptokrystaliczny chalcedon, trydymit, krystobalit czy kwarc w stanie naprężeń. Stąd też maksymalne dopuszczalne stężenie alkaliów powinno być determinowane każdorazowo dla konkretnej mieszanki betonowej [14].



Rysunek 9. Wpływ związków alkalicznych na powierzchnię betonu

Źródło: [14]

Związki siarczanowe mogą być przyczyną korozji siarczanowej. Korozja siarczanowa jest procesem, w którym reakcje chemiczne między aktywnymi składnikami betonu a jonami siarczanowymi mogą prowadzić do powstania silnie ekspansywnego kryształu ettringitu. Podczas krystalizacji, po wypełnieniu swobodnej przestrzeni w porach betonu, ettringit zaczyna wywierać ciśnienie na otaczające go ścianki porów betonu. Ciśnienie to może prowadzić do powstania mikropęknięć w stwardniałej zaprawie cementowej, a w konsekwencji do zmniejszenia modułów sprężystych i osłabienia elementu konstrukcji. Stwierdzono, że ze składnikami betonu mogą reagować siarczany sodowy, magnezowy, potasowy i siarczan wapnia. Źródłem jonów siarczanowych mogą być zasiarczone wody gruntowe, kwaśne deszcze, itp. Jony siarczanowe obecne w otaczającym środowisku migrują w głąb betonu wskutek dyfuzji i reagują z aktywnymi chemicznie składnikami betonu [15].



Rysunek 10. Ekspansywne ziarna ettryngitu w betonie

Źródło: [16]

4. Recykling kruszywa w aspekcie środowiskowym

W krajach, w których zasoby kruszyw naturalnych są niskie od dłuższego czasu prowadzone są liczne prace nad zaawansowanymi metodami recyklingu gruzu betonowego. Nowoczesne metody recyklingu dzielą się na metody polegające na ścieraniu zaczynu z ziaren kruszywa betonowego, gdzie otrzymywane kruszywo ma zbliżone właściwości do kruszywa naturalnego oraz na metody polegające na impregnacji powierzchniowej kruszyw z recyklingu [17].

Metody mające na celu usunięcie z kruszywa naturalnego przylegającego zaczynu to: metoda ogrzewania i tarcia, metoda mechanicznego ścierania, metoda młyna śrubowego oraz metoda koncentracji grawimetrycznej. Najbardziej efektywna jest metoda obróbki cieplno-mechanicznej HRM (*ang. Heating and Rubbing Method*) [19]. Wszystkie powyższe metody wiążą się zarówno z dużą energochłonnością oraz produkcją dużych ilości pyłów, których jak do tej pory nie udało się zagospodarować i stanowią odpad nieużytkowy.

Metoda uszczelniania kruszywa polega na zanurzeniu w zaczynie cementowym kruszywa z recyklingu przygotowanego w sposób tradycyjny. Następnie kruszywo jest obtaczane oraz frakcjonowane. W wyniku tych procesów zmniejsza się wodożądność kruszywa, poprawia urabialność mieszanki [18].

Wszystkie przedstawiane powyżej metody prowadzą do całkowitego oczyszczenia kruszywa z zanieczyszczeń, co ze względów technicznych zdaje się być korzystne jednak aspekty środowiskowe skłaniają do prowadzenia badań nad wykorzystaniem kruszywa z recyklingu bez uprzedniego poddawania go energochłonnym procesom.

Mniej kosztowną, alternatywną metodą zastosowania kruszywa pochodzącego z recyklingu jest metoda *replacing*. Polega ona na częściowym zastąpieniu w mieszance naturalnego kruszywa grubego lub drobnego, kruszywem recyklingowym. Metoda *replacing* wymaga selektywnej rozbiórki obiektów oraz szczegółowych badań cech fizyko-mechanicznych kruszyw recyklingowych oraz mieszanki betonowej i betonu z tym kruszywem [19]. Metoda ta odpowiada zaleceniom RILEM [10].

W punkcie 5 przedstawiono badania parametrów technicznych betonu przeprowadzone na kruszywie z recyklingu z zanieczyszczeniami w ujęciu metody *replacing*, jako alternatywa poddawania gruzu betonowego kosztownym zabiegom uzdatniania. Warto wspomnieć, że w niektórych krajach użycie do 20% kruszywa pochodzącego z recyklingu nie wymaga dodatkowych badań i uzgodnień. Przeprowadzone badania przedstawiają parametry przy 50% użyciu kruszywa z recyklingu z zanieczyszczeniami zamiast kruszywa naturalnego.

5. Badania wpływu zanieczyszczeń na parametry techniczne betonu

Głównym celem przeprowadzonych badań było uzyskanie wyników doświadczalnych wybranych własności fizyko-mechanicznych betonów wykonanych na bazie kruszywa naturalnego jak i kruszywa pochodzącego z recyklingu wraz z zanieczyszczeniami. Należy zaznaczyć, że prowadzone były w ubiegłych latach liczne prace nad właściwościami kruszyw wtórnych jednak w większości dla założenia, że kruszywo nie zawiera zanieczyszczeń [17,20,21 i inne].

W celu określenia typowego składu gruzu budowlanego pobrano próbę kruszywa pochodzącego z rozbiórki obiektu kubaturowego. W pobranej próbce zidentyfikowano w sposób wizualny zanieczyszczenia fizyczne (styropian, cegła oraz szkło) na poziomie 5% objętości oraz inne w ilości mniejszej niż 0,1%. Następnie przeprowadzono badania wpływu głównych zanieczyszczeń na spadek wytrzymałości betonu na ściskanie oraz rozciąganie.

Do przeprowadzenia badań przygotowano 6 mieszanek betonowych o tej samej zawartości kruszywa grubego oraz stosunku w/c. Pierwsza mieszanka zawierała jedynie kruszywo naturalne żwirowe (rys. 11/6), w drugiej zastąpiono je w połowie kruszywem pochodzącym z recyklingu (rys. 11/5) a w kolejnych kruszywo z recyklingu w 5% objętości zamieniano kolejno na zanieczyszczenia: szkłem, cegłą, styropianem oraz mieszanką tych zanieczyszczeń (rys. 11/1-11/4). Zarówno zanieczyszczenia jak i kruszywo z recyklingu przygotowane zostało we frakcjach 2/8 mm. Kruszywo wtórne uzyskano w wyniku kruszenia gruzu betonowego bez zanieczyszczeń pochodzącego z betonu klasy C60/75 wykonanego na bazie diabazu. Składy mieszanek betonowych na 1 m³ zestawiono w tabeli 6.



Rysunek 11. Składniki kruszywa grubego w badanych próbkach betonowych. Zanieczyszczenia: cegła 1, szkło 2, styropian 3, mieszanka zanieczyszczeń 4, kruszywo wtórne 5, kruszywo naturalne 6.

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 6. Skład mieszanek betonowych

	Składnik	[kg]
Mieszanka I	Cement portlandzki CEM I 32,5R Małogoszcz	6,25
	Kruszywo grube - żwir	14,3
	Kruszywo drobne - piasek	8,13
	Woda	2,80
Mieszanka II	Cement portlandzki CEM I 32,5R Małogoszcz	6,25
	Kruszywo grube - żwir	7,15
	Kruszywo grube - recykling	7,15
	Kruszywo drobne - piasek	8,13
	Woda	2,80
Mieszanka III	Cement portlandzki CEM I 32,5R Małogoszcz	6,25
	Kruszywo grube - żwir	7,15
	Kruszywo grube - recykling	6,8
	Kruszywo grube – zanieczyszczenie: szkło (5% obj.)	0,35
	Kruszywo drobne - piasek	8,13
	Woda	2,80
Mieszanka IV	Cement portlandzki CEM I 32,5R Małogoszcz	6,25
	Kruszywo grube - żwir	7,15
	Kruszywo grube - recykling	6,8
	Kruszywo grube – zanieczyszczenie: cegła (5% obj.)	0,35
	Kruszywo drobne - piasek	8,13
	Woda	2,80
Mieszanka V	Cement portlandzki CEM I 32,5R Małogoszcz	6,25
	Kruszywo grube - żwir	7,15
	Kruszywo grube - recykling	6,8
	Kruszywo grube – zanieczyszczenie: styropian (5% obj.)	0,024
	Kruszywo drobne - piasek	8,13
	Woda	2,80
Mieszanka VI	Cement portlandzki CEM I 32,5R Małogoszcz	6,25
	Kruszywo grube - żwir	7,15
	Kruszywo grube - recykling	6,8
	Kruszywo grube – zanieczyszczenie: cegła, szkło, styropian (5% obj.)	0,257
	Kruszywo drobne - piasek	8,13
	Woda	2,80

Zródło: Opracowanie własne

Mieszanki charakteryzowały się jednakowym wskaźnikiem wodno-cementowym na poziomie 0,44. Ze względu na różną zawartość kruszywa naturalnego oraz kruszywa

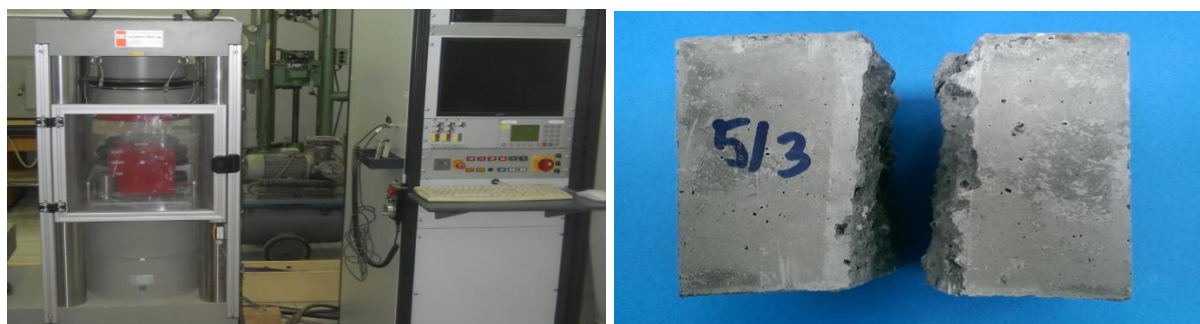
pochodzącego z recyklingu, a także różnorodność zanieczyszczeń w poszczególnych mieszankach betonowych, zaroby odznaczały się zróżnicowaną wodożądnością a tym samym odmienną konsystencją i urabialnością. Wszystkie mieszanki przygotowano w identycznych warunkach laboratoryjnych, poszczególne składniki odważano z dokładnością 1 g, składniki połączono zgodnie ze sztuką budowlaną i przy użyciu mieszarki mechanicznej (rys. 12). W badaniach stosowano próbki kostkowe o boku 100 mm, wykonywane w formach stalowych pokrytych środkiem adhezyjnym i zagęszczane na stoliku wibracyjnym.



Rysunek 12. Stanowiska laboratoryjne. Po lewej wykorzystywana mieszarka po prawej jedna z mieszanek w trakcie wykonywania

Źródło: Opracowanie własne

Wszystkie próbki przebadano po 28 dniach dojrzewania w jednakowych warunkach klimatycznych. W odniesieniu do badanych betonów określono w sposób normowy wytrzymałość na ściskanie f_{cm} na 6 próbkach dla każdej mieszanki, analogicznie wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu $f_{ctm,sp}$ na 3 próbkach dla każdej mieszanki. Badania przeprowadzono przy użyciu prasy hydraulicznej (rys. 13), powierzchnie próbek przed badaniem zostały oczyszczone.



Rysunek 13. Stanowisko laboratoryjne. Prasa hydrauliczna po lewej oraz jedna z próbek zniszczonych w wyniku rozciągania przy rozłupywaniu po prawej

Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 14. Przelom próbki rozciąganej

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawia tabela 7, w której zawarto wartości średnie: gęstości objętościowej, wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie oraz odchylenia standardowe tych wyników. Wyniki w sposób graficzny zaprezentowano na rysunkach 15 i 16.

Tabela 7. Zestawienie wyników badanych parametrów materiałowych

Oznaczenie	Średnia gęstość objętościowa [kg/m ³]	Średnia wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]	Średnia wytrzymałość na rozciąganie $f_{ctm,sp}$ [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]
Mieszanka I	2315	46,17	1,03	3,32	0,12
Mieszanka II	2308	43,13	2,57	3,68	0,22
Mieszanka III	2311	38,70	1,25	2,75	0,28
Mieszanka IV	2303	42,41	1,57	2,75	0,35
Mieszanka V	2283	38,65	2,84	2,71	0,54
Mieszanka VI	2279	41,28	1,48	2,59	0,22

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych badań, stwierdzono spadek średniej wytrzymałości na ściskanie o 3 MPa tj. 6,5% betonu wykonanego z 50% udziałem kruszywa pochodzącego z recyklingu (mieszanka II), w stosunku do betonu wykonanego wyłącznie na kruszywie

naturalnym (mieszanka I). Należy zwrócić uwagę, że kruszywo pochodzące z recyklingu posiadało bardzo dobre parametry wytrzymałościowe (kruszywo pierwotne diabazowe). Mieszanki I i II zostały potraktowane, jako referencyjne i do nich odnoszone są dalsze wyniki badań. Największe spadki wytrzymałości zarejestrowano w przypadku zanieczyszczenia kruszywa z recyklingu szkłem oraz styropianem (mieszanki III i V), spadek wyniósł 16,2% w stosunku do betonu wykonanego na kruszywie naturalnym (mieszanka I) oraz 10,3% w stosunku do betonu wykonanego z 50% udziałem kruszywa z recyklingu (mieszanka II). Najmniejsze spadki zarejestrowano w przypadku zanieczyszczenia kruszywa cegłą (mieszanka IV) – odpowiednio 8,2% w stosunku do mieszanki I oraz 1,7% w stosunku do mieszanki II. Mieszanka VI zawierająca wymieszane zanieczyszczenia odznaczała się spadkiem na poziomie 10,6% w stosunku do mieszanki I oraz 4,3% w stosunku do mieszanki II.

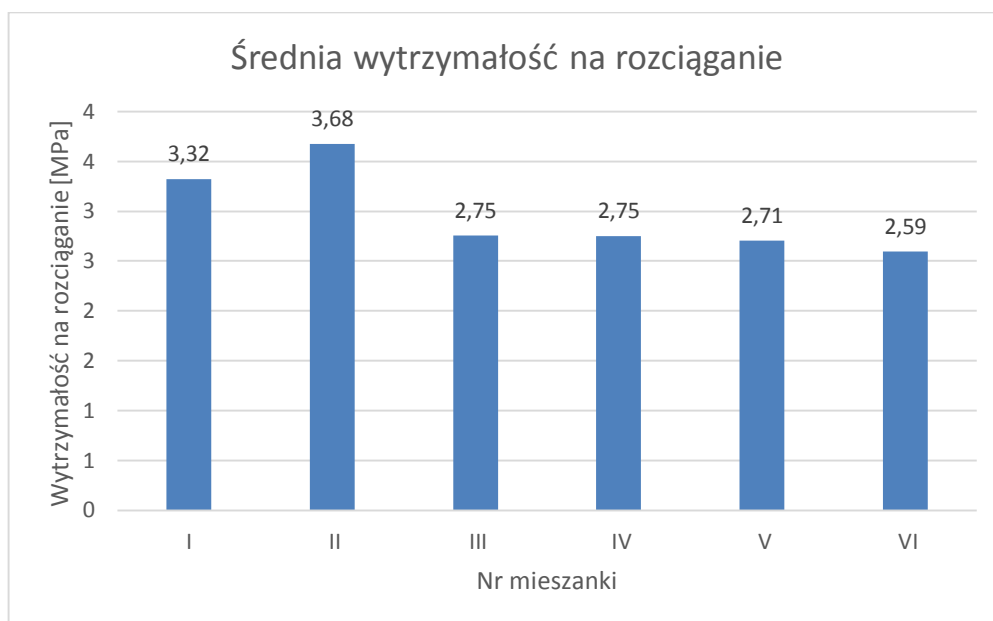


Rysunek 15. Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek referencyjnych oraz zawierających zanieczyszczenia

Źródło: Opracowanie własne

W odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie nie odnotowano jednoznacznych wyników. Może to wynikać z mechanizmu niszczenia się betonów wysokowartościowych (a do takich można zaliczyć zastosowany beton, z którego pochodziło kruszywo z recyklingu). Na co zwraca uwagę Wałach (2014), w odróżnieniu do betonów zwykłych płaszczyzna zniszczenia w BWW przebiega zarówno przez matrycę jak i przez ziarna kruszywa [17], co widoczne jest na przełomie rozciąganej próbki betonu (rys.13). W związku z tym, zarejestrowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie mieszanki II w skład której wchodziło kruszywo pochodzące

z recyklingu. Zarejestrowano natomiast znaczny spadek wytrzymałości na rozciąganie w przypadku mieszanek posiadających zanieczyszczenia, wynosi on około 20% i nie uwidacznia zależności od rodzaju zanieczyszczenia.



Rysunek 16. Średnia wytrzymałość na rozciąganie próbek referencyjnych oraz zawierających zanieczyszczenia

Źródło: Opracowanie własne

6. Podsumowanie

Przeprowadzone wyniki badań wskazują, jak duży wpływ odgrywa typ zanieczyszczenia występującego w kruszywie z recyklingu gruzu budowlanego na parametry techniczne betonu. Najczęściej występujące zanieczyszczenie gruzu betonowego, za jakie można uznać cegłę, nie powoduje znacznych spadków wytrzymałości na ściskanie. Najgorsze parametry uwidoczniły się w betonie, w którym zastąpiono 5% objętości kruszywa z recyklingu, zanieczyszczeniami szkłem oraz styropianem. Szkło jest dodatkowo niekorzystnym zanieczyszczeniem z punktu widzenia chemii betonu, gdyż silnie reaguje z alkaliarnymi, w wyniku czego powstają ekspansywne sole, stąd w przypadku obecności szkła w kruszywie należy zastosować odpowiedni rodzaj cementu aby uniknąć zjawiska ekspansji. Należy przy tym pamiętać, że szkło jest materiałem trudnym do odsiania, stąd zaleca się uważną selekcję tego materiału na placu budowy.

Mieszanka sporządzona na kruszywie z recyklingu, zawierającym objętościowo 5% wymieszanych zanieczyszczeń (cegła, szkło, styropian), posiadała nieznacznie gorsze parametry wytrzymałościowe niż mieszanka na kruszywie z recyklingu bez zanieczyszczeń. Zarejestrowany spadek wytrzymałości nie odpowiada jednak przewidywanym wynikom i nie

jest determinowany przez największy spadek jaki, został zarejestrowany, nie jest też superpozycją tych spadków.

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie nie pozwalają na przedstawienie jednoznacznych wniosków najprawdopodobniej ze względu na zastosowany typ kruszywa z recyklingu (beton wysoko wartościowy). Wytrzymałość betonu na rozciąganie nie będzie jednak kluczowym parametrem technicznym ze względu na charakter pracy elementów betonowych, które projektowane są, jako elementy ściskane.

Zasadne zdaje się użycie technologii *replacing* nawet w 50%, uzupełniając kruszywo naturalne kruszywem pochodzącym z recyklingu. Technologia oczyszczania kruszywa powinna być dostosowana do wymagań stawianych kruszywom naturalnym, jednakże badania wykazały, że nie ma konieczności całkowitego oczyszczania kruszywa z zanieczyszczeń gdyż energochłonność tych procesów nie jest warta korzyści, jakie można uzyskać. Wskazana może być natomiast technologia płukania kruszywa, w procesie tym likwiduje się frakcję pyłową występującą w gruzie oraz odsiewa lekkie zanieczyszczenia jak styropian.

Literatura:

1. Sobotka A., Czaja J.: *Logistyka odzysku w cyklu życia obiektu budowlanego*. Logistyka 6/2014.
2. <http://stenarecycling.pl/Biuro-prasowe/Archiwum/Stena-Recycling-w-Business-Garden-Pozna---rozwizania-na-miar-systemu-LEED-Gold/> dostęp 14.01.2015 r.
3. Ustawa z dnia 14.12.2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21).
4. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 marca 2006 r. w sprawie odzysku lub unieszkodliwiania odpadów poza instalacjami i urządzeniami (Dz.U.2006 nr 49 poz. 356).
5. Silva R.V., Brito J., *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*, Construction and Building Materials 65 (2014), 201-217
6. Kozioł W., Czaja P., *Górnictwo skalne w Polsce – stan obecny, perspektywy i uwarunkowania rozwoju*, Górnictwo i Geologia 2010, Zeszyt 3/Tom 5.
7. Norma PN-EN 12620:2004 Kruszywa do betonów
8. PN-76/B-06714 *Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczenia zawartości zanieczyszczeń obcych*.
9. PN-78/B-06714/13 *Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczenia zawartości pyłów mineralnych*

10. RILEM, *Specifications for concrete with recycled aggregates*, Materials and Structures, 1994, 27, 557-559
11. Piasta J., Piasta W., *Rodzaje i znaczenie kruszywa w betonie*, XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji Ustroń 20-23 luty 2002 r.
12. Etxeberria M., Vazquez E., *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*, Cement and Concrete Research 37 (2007) 735 – 742
13. Nagasaki S., Gokce A., Saeki T., *Effects of Recycled Aggregate Characteristics on Performance of recycled Aggregate Concrete*, International Conference Duability of Concrete, pp. 51-62, Spain
14. Drożdż W., *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych nr 7*, Warszawa-Opole 2011
15. Węglewski W., *Modelowanie zniszczenia betonu wywołanego korozją siarczanową*, Rozprawa doktorska, Warszawa 2008.
16. <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/beton/beton.htm/> dostęp 22.01.2015 r.
17. Wałach D., *Możliwości powtórnego wykorzystania kruszywa pochodzącego z recyklingu betonów wysokowartościowych*, Logistyka 6/2014
18. Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., *Recykling betonu konstrukcyjnego cz. I*. Inżynier Budownictwa 2009, nr 2.
19. Zając B. Gołębiewska I., *Nowoczesne metody recyklingu betonu*, Inż. Ap. Chem. 2010, nr 49 (5).
20. Sadowska-Buraczewska B., Rutkowski P., *Betony z użyciem kruszywa recyklingowego wysokiej wytrzymałości – dziedzina zrównoważonego rozwoju*. Rocznik Ochrona Środowiska 2013, tom 15.
21. Dworzańczyk-Krzywiec D., *Wpływ zawartości kruszywa z recyklingu na wybrane właściwości betonów*. Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2011, nr 2.

inż. Jakub Frankowski¹, dr inż. Damian Janczak¹,
mgr inż. Hanna Waliszewska², inż. Anna Olszewska³, inż. Kamil Kozłowski¹,

¹Instytut Inżynierii Biosystemów

²Instytut Chemicznej Technologii Drewna

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań

³Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

e-mail: ¹jakubfrankowski2@gmail.com

Zagospodarowanie frakcji biodegradowalnej odpadów pochodzących z hodowli zwierząt egzotycznych

Słowa kluczowe: odpady, frakcja biodegradowalna, biopaliwo, zwierzęta egzotyczne

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono charakterystykę frakcji biodegradowalnej odpadów pochodzących z hodowli zwierząt egzotycznych. Analiza obejmowała surowce, które są wykorzystywane jako podłoża w terrariach: siano łąkowe, słomę różnych gatunków zbóż, trociny z drzew liściastych oraz mieszanki traw i roślin zielnych. Określono między innymi ich odczyn, zawartość suchej masy, suchej masy organicznej, a także wartość opałową, która kształtowała się w granicach od 17,5 MJ·kg⁻¹ do 18,8 MJ·kg⁻¹. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań omówiono proponowany sposób zagospodarowania tych odpadów.

1. Wstęp

Coraz bardziej restrykcyjne uregulowania prawne związane z ochroną środowiska, a także wzrost cen wywozu odpadów powodują konieczność poszukiwania rozwiązań prowadzących do ich zagospodarowania. Jakkolwiek problem pozostałości z hodowli zwierząt egzotycznych dotyczy jedynie niewielkiej części społeczeństwa, to zazwyczaj obejmuje duże zakłady oraz instytucje takie jak ogrody zoologiczne czy wyspecjalizowane ферmy, produkujące znaczne ilości tych nietypowych odpadów. Z tego powodu określenie ich właściwości może pozwolić na racjonalne spożytkowanie dużej ilości biomasy.

2. Cel i zakres badań

Celem niniejszych badań było przeanalizowanie właściwości odpadów powstających po wykorzystaniu podłoży organicznych jako ściółki w terrariach. Przebadano je w zakresie ponownego wykorzystania jako potencjalny substrat do produkcji biopaliwa stałego.

3. Przegląd literatury

3.1. Podstawowe definicje

Przez frakcję odpadów ulegających biodegradacji należy rozumieć wszystkie substancje, które ulegają rozkładowi tlenowemu lub beztlenowemu przy udziale mikroorganizmów [1]. W omawianych hodowlach zawierają się w niej przede wszystkim wykorzystane organiczne podłoża oraz resztki pożywienia. Do zwierząt egzotycznych zalicza się wszystkie te gatunki, które nie występują w środowisku naturalnym danego kraju. Niekiedy tym terminem określa się także trzymany w niewoli przedstawicieli rodzimej fauny, które nie są jednak powszechnie uznawane za zwierzęta hodowlane [2].

Różne rodzaje ściółek, będące przedmiotem badań, stosuje się najczęściej w terrariach. Określenie terrarium pochodzi od łac. *terra* – ziemia. Obecnie potocznie nazywa się w ten sposób wszelkie zamknięte pomieszczenia i pojemniki służące do chowu i hodowli zwierząt w sztucznie stworzonym środowisku [3]. Najczęściej są one zrobione ze szkła i posiadają pokrywę z tworzywa sztucznego; jednak terrarium to także kuweta z umieszczonymi po bokach kratkami, które są powszechnie stosowane jako pojemniki dla chomików i innych niedużych ssaków [4].

Do zwierząt terraryjnych, czyli gatunków hodowanych w terrariach, zalicza się płazy, gady, a także bezkręgowce (ślimaki, skorpiony, pająki, wiję i owady). Oprócz tego tym terminem określa się również drobne ssaki, takie jak świnki morskie, chomiki czy jeże pigmejskie [5].

3.2. Ogólna charakterystyka surowców

W hodowli zwierząt egzotycznych używa się różnorodnych materiałów, zależnie od optymalnych wymagań dla danego gatunku. Oprócz żwirku czy piasku bardzo często stosuje się materiały organiczne. Naturalną wyściółkę w terrariach stanowi najczęściej siano łukowe, słoma, trociny lub ich mieszanki. Mimo że wszystkie te surowce są pochodzenia roślinnego, różnią się jednak między sobą znacząco składem chemicznym i właściwościami fizycznymi, przez co dany rodzaj podłoża nie jest odpowiedni dla wszystkich gatunków. Istotne jest natomiast aby żadne substraty przeznaczone dla zwierząt nie były konserwowane chemicznie i aby były one wolne od grzybów i pasożytów [6].

3.2.1. Siano

Ze względu na różnorodność gatunków występujących na łąkach, skąd roślinność jest pozyskiwana na ściólkę do hodowli zwierząt, skład botaniczny produktu może być bardzo różny. Odmierna zawartość gatunkowa i ilościowa w materiale pochodzącym od tego samego producenta wynika z nierównomiernego rozwoju poszczególnych roślin. Także termin zbioru biomasy z łąki ma istotny wpływ na jej skład, a szczególnie ilościowy udział poszczególnych gatunków w końcowym produkcie.

Głównym składnikiem siana łąkowego są jednak różne gatunki traw. Najliczniej występuje w nim kłosówka wełnista (*Holcus lanatus* L.), mozga trzcinowata (*Phalaris arundinacea* L.), wyczyniec łąkowy (*Alopecurus pratensis* L.) kostrzewa czerwona (*Festuca rubra* L.) i rajgras wyniosły (*Arrhenatherum elatius* L.). Oprócz tych gatunków sporadycznie w sianie mogą występować perz właściwy (*Agropyron repens* L.), śmiełek darniowy (*Deschampsia caespitosa* L.), kostrzewa trzcinowa (*Festuca arundinacea* Schleb.) czy mietlica biaława (*Agrostis alba* L.). Z pozostałych gatunków roślin, nie będących trawami, w sianie może znajdować się dość licznie szczaw kędzierzawy (*Rumex crispus* L.), sit skupiony (*Juncus conglomeratus* L.), komonica błotna (*Lotus uliginosus* Schkhur) i wyka ptasia (*Vicia cracca* L.) [7]. Poza wyżej wymienionymi gatunkami, elementem składowym produktu może być wiele innych roślin, które jednak nie mają większego wpływu na właściwości fizykochemiczne siana łąkowego.

Według różnych producentów siano łąkowe może stanowić doskonałą ściólkę dla świnek morskich, królików, szynszyli, koszatniczki czy innych gryzoni. Z własnych obserwacji wynika ponadto, że stanowi ono dobre schronienie oraz element pożywienia także dla żółwi stepowych i greckich oraz innych gadów.

3.2.2. Słoma

Słoma to dojrzałe i wysuszone źdźbła roślin zbożowych [8]. W przeciwieństwie do siana pozyskiwanego z łąk jest to produkt o jednorodnym składzie i nie zawiera domieszek innych gatunków. Rozróżnia się słomę świeżą, zwaną żółtą, oraz słomę szarą, która po ścięciu jest pozostawiana na polu, gdzie pod wpływem zmiennych warunków atmosferycznych zmienia swoją barwę, a przede wszystkim skład chemiczny. Dzięki opadom ze źdźbeł wymywane są związki chloru oraz metale alkaliczne, przez co jest ona bardziej przydatna do celów energetycznych [9].

Jednakże do chowu zwierząt częściej przeznacza się słomę żółtą, która pozyskiwana jest jako odpad z uprawy roślin zbożowych na ziarno [10]. Źdźbła bezpośrednio po zbiorze

nasion są rozdrabniane na kilkucentymetrowe kawałki, dosuszane i odpylane. W ten sposób powstaje produkt, który może być wykorzystywany w hodowli gryzoni, węży czy innych gadów. Słoma nie nadaje się jednak na ściółkę dla królików, gdyż jest zbyt sztywna. Jej ostre końce mogą uszkadzać oczy i uszy zwierząt [6].

3.2.3. Trociny

Trociny, jako odpad powstający przy pilowaniu i cięciu drewna, mają nieregularny kształt i długość, która wynosi najczęściej kilka milimetrów [11]. Zbyt drobna frakcja surowca może powodować podrażnienie nozdrzy i uszu u drobnych ssaków [6]. Z tego powodu trociny przeznaczone jako ściółka dla zwierząt są zazwyczaj frakcjonowane, odpylane i dosuszane. Tak jak w przypadku słomy w ich skład wchodzi najczęściej tylko jeden gatunek. Trociny na cele terrarystyki są pozyskiwane głównie z drewna bukowego lub innego gatunku drzew liściastych [11].

3.2.4. Rośliny zielne

Są to wszystkie rośliny, których pędy naziemne w klimacie umiarkowanym są nietrwale i obumierają z końcem sezonu wegetacyjnego [12]. Ze względu na niezdrewniałą lub zdrewniałą w niewielkim stopniu łodygę, ich właściwości fizyko – chemiczne różnią się znacząco od innych substratów stosowanych jako ściółki w terrariach [2,13]. Najczęściej stanowią one jedynie domieszkę do powyżej opisanych surowców i nie będą szerzej omawiane w niniejszej pracy jako odrębny odpad z hodowli zwierząt egzotycznych.

3.3. Skład chemiczny ściólek

Zarówno słoma, siano, jak i trociny składają się głównie z substancji szkieletowych, do których zalicza się celulozę, hemicelulozy i ligninę. Budowa łańcuchowa i wysoki stopień polimeryzacji cząstek celulozy zwiększają wytrzymałość włókien, a obecność obszarów krystalicznych determinuje wzrost ich odporności na wodę. Lignina wbudowana w łańcuchy celulozy dodatkowo usztywnia tkanki roślinne i zwiększa ich wytrzymałość na ściskanie. Z kolei hemicelulozy mają stosunkowo niski stopień polimeryzacji, a duża ilość wolnych grup – OH ułatwia dostęp wody. Pomimo to, dzięki zawartości wosków, w porównaniu z trocinami, słoma jest bardziej hydrofobowa, co wpływa na jej higroskopijność [11].

Z badań wynika, iż największą zawartością celulozy i ligniny cechuje się słoma żytnia, jednak w porównaniu z innymi zbożami skład chemiczny źdźbeł nie różni się istotnie [14]. Słoma zbóż i siano łąkowe mają skład chemiczny zbliżony do liściastych gatunków drzew,

zwłaszcza jeśli chodzi o zawartość lignin. Związki te są substancjami amorficznymi, co sprawia, iż w podwyższonej temperaturze zachowują się jak materiał termoplastyczny. Jednakże lignina występująca w tych dwóch grupach roślin ma inną budowę. Z tego względu lignina zawarta w słomie jest polimerem trudniej topliwym niż lignina z drewna [15].

Oprócz substancji szkieletowych w skład siana, słomy czy trocin wchodzi substancje towarzyszące (niestrukturalne). Należą do nich woski, żywice, tłuszcze, garbniki, barwniki czy alkaloidy [11]. Ich skład w substracie może się różnić nie tylko w zależności od gatunku czy odmiany, ale także od stanowiska, warunków atmosferycznych czy pory roku. Niemniej opisane substancje wchodzące w skład badanego materiału mają istotny wpływ na późniejsze zagospodarowanie zużytego materiału i determinują konieczność zastosowania określonych procesów technologicznych w celu przetwórstwa tejże frakcji odpadów przed ich ponownym wykorzystaniem. Ponadto, skład chemiczny substancji decyduje o jej właściwościach fizykomechanicznych.

3.4. Fizykomechaniczne właściwości ściółek

Większość materiałów stosowanych jako ściółka w terrariach to materiały higroskopijne odznaczające się zjawiskiem histerezy wilgotnościowej. Mają one dużą zdolność do wymiany pary wodnej z otaczającym powietrzem, dzięki czemu tworzy się pomiędzy nimi wilgotność równoważna [11]. Jest to cenna cecha, ponieważ zapewnia pochłanianie wilgoci oraz nieprzyjemnych zapachów z produktów przemiany materii zwierząt. Jednakże na ogół odpad z terrariów odznacza się niską wilgotnością z uwagi na charakterystyczne warunki mikroklimatyczne panujące w terrariach [2]. Przy wilgotności poniżej 15% panują okoliczności niesprzyjające dla rozwoju mikroorganizmów, a podłoże nie gnije. Dzięki temu ogranicza się możliwość rozwoju niektórych chorób u zwierząt [6,16].

Uśredniając wartości charakteryzujące właściwości mechaniczne słomy pochodzącej od różnych gatunków roślin, odznacza się ona wytrzymałością na rozciąganie na poziomie około 25 MPa, wytrzymałością na ścinanie wynoszącą 6 MPa oraz modułem Younga w granicach 5 – 6 GPa. Siano natomiast charakteryzuje się mniejszymi właściwościami wytrzymałościowymi [17].

Istotne znaczenie dla przebiegu procesu rozdrabniania, który jest konieczny przed wykorzystaniem zużytej ściółki na cele energetyczne, ma twardość i związana z tym ścieralność oraz łupliwość. Rodzaje drewna liściastego, takie jak buk czy brzoza, odznaczają się dużą twardością i jednocześnie małą ścieralnością i łupliwością. Jednakowoż w przypadku hodowli zwierząt egzotycznych używany jest materiał już na tyle rozdrobniony, iż przygotowanie trocin

czy drobnej frakcji kory do ciśnieniowej aglomeracji biomasy nie jest pracochłonne. Wymagane jest zaś pocięcie siana czy słomy, niemniej ich parametry związane z właściwościami mechanicznymi powodują, iż możliwy jest duży stopień ich rozdrobnienia przy niedużych nakładach energii [11].

3.5. Zagospodarowanie odpadów z hodowli zwierząt egzotycznych

Ze względu na ograniczoną liczbę osób, które zajmują się hodowlą zwierząt egzotycznych oraz stosunkowo niewielką liczbą ogrodów zoologicznych na terenie Polski, zagadnienie odpadów powstających z tego rodzaju działalności nie jest opisany w literaturze. Istnieją wprawdzie liczne publikacje przedstawiające dane dotyczące właściwości słomy, trocin czy siana, jednak w głównej mierze opierają się one na substratach pozyskiwanych do badań na drodze intensywnej uprawy gruntów rolnych, w których wymienione surowce stanowią odpad w innych procesach produkcyjnych. W niniejszym przypadku określono natomiast cechy ściółek produkowanych w ekologiczny sposób, co może pozwolić skonfrontować otrzymane wartości z dotychczas opublikowanymi wynikami. Dzięki temu możliwe jest porównanie wpływu sposobu pozyskiwania surowców i ich obróbki na parametry produktu.

Oprócz tego określenie wartości opałowej różnych ściółek pozwala określić potencjał odpadów powstających z hodowli zwierząt egzotycznych w celu ich ponownego wykorzystania w celach energetycznych.

4. Metodyka badań

4.1. Materiał badawczy

Materiał badawczy (rys. 1.) stanowiły podłoża będące odpadem od kilkunastu różnych gatunków: ssaków (m.in. jeż pigmejski, myszokoczek mongolski, koszatniczka zwyczajna), gadów (żółw stepowy i grecki, wąż zbożowy, kilka gatunków jaszczurek) i pajęczaków.

Dla łatwiejszego rozróżnienia substratów przyjęto nazewnictwo stosowane przez wytwórców danych podłoży. Choć z uwagi na specyfikę prowadzenia hodowli dane podłoża po wykorzystaniu mogą zawierać domieszki pożywienia i ekskrementy to dla uniwersalnego zestawienia danych do badań pobrano próby jedynie niezanieczyszczonych ściółek.



Rysunek 1. Materiał badawczy

Źródło: Jakub Frankowski

Z uwagi na swoisty charakter siana łąkowego, a mianowicie jego różnorodny skład gatunkowy i ilościowy, zależny nie tylko od lokalizacji pola, ale także od pory roku, w której materiał był pozyskany, do badań wykorzystano siano od dwóch producentów. Na rynku dostępnych jest wiele produktów o tej samej lub podobnej nazwie, jednak ze względu na odmienny skład i stopień ich rozdrobnienia odznaczają się one często rozbieżnymi właściwościami.

Siano z górskich łąk, w stosunku do łąkowego, składa się ze źdźbeł o mniejszej średnicy, a po wyjęciu z opakowania odznacza się większą wilgotnością, co świadczy o różnej metodzie obróbki skoszonej biomasy.

Ogród ziołowy jest to natomiast mieszanka rozdrobnionego drewna bukowego oraz różnych roślin zielnych, która stanowi ściółkę uzupełniającą dla gryzoni i niektórych ssaków czy gadów. Oprócz zrębków drewna i trocin zawiera ona suszone liście pietruszki, pokrzywy, młodego owsa oraz babkę lancetowatą. Producent zaleca mieszanie tego podłoża wraz z innymi ściółkami, głównie z tymi zawierającymi siano czy słomę, dla zapewnienia optymalnych warunków hodowli.

4.2. Oznaczenie parametrów materiału badawczego

W celu określenia podstawowych właściwości badanego materiału oraz analizy przydatności podłoża będącego odpadem z hodowli zwierząt egzotycznych, wymieszano ściółki danego rodzaju pochodzące z różnych terrariów i pobrano z każdej po trzy reprezentacyjne próby (rys. 2.) dla uzyskania uśrednionych wyników każdego podłoża.

W Pracowni Ekotechnologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu wykonano pomiary odczynu z użyciem pH-metru opierając się na normie PN-90C-04540/01 i konduktywności, czyli przewodności elektrycznej właściwej, za pomocą miernika konduktancji zgodnie z normą PN-EN 27888:1999. Oprócz tego przeanalizowano zawartość suchej masy i suchej masy organicznej w pięciu substratach zgodnie z obowiązującymi normami. Dla określenia suchej masy substratów postępowano według wytycznych normy PN-75 C-04616/01, a dla suchej masy organicznej zastosowano normę PN-Z-15011-3:2001.



Rysunek 2. Próby przygotowane do oznaczenia zawartości suchej masy.

Źródło: Jakub Frankowski

Aby dana substancja mogła być wykorzystana jako substrat do produkcji biopaliwa stałego musi odznaczać się odpowiednią wilgotnością. Istotna jest także wartość opałowa, która w dużej mierze warunkuje opłacalność produkcji peletu bądź brykietu z danego odpadu. Na podstawie doświadczeń przeprowadzonych w Instytucie Chemicznej Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu na kalorymetrze KL-12Mn w atmosferze tlenu przy

podciśnieniu 3 bar według normy PN-81/G-04513 określono wartość opałową kilku rodzajów ściółek.

5. Wyniki badań i dyskusja

W tabeli 1. zestawiono uśrednione wartości odczynu i konduktywności badanych substratów uzyskane z pomiarów dwóch prób pobranych z każdego rodzaju substratu.

Tabela 1. Uśrednione wartości odczynu i konduktywności w badanych substratach

Nazwa substratu	Odczyn	Konduktywność [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]
Siano łąkowe	5,9	85,32
Siano z górskich łąk	6,2	21,65
Słoma pszenna	6,9	84,89
Trociny bukowe	5,2	21,93
Ziołowy ogród	6,2	21,85

Źródło: Opracowanie własne

Najniższą wartością odczynu charakteryzowały się trociny bukowe, natomiast najwyższą słoma pszenna. Kwasowość siana z górskich łąk oraz mieszanki „ziołowy ogród” była na tym samym poziomie i wynosiła 6,2.

Konduktywność siana z górskich łąk, trocin bukowych oraz mieszanki trocin i roślin zielnych była na podobnym, lecz znacznie niższym poziomie, w porównaniu z przewodnością właściwą siana łąkowego czy słomy pszennej. Na podstawie powyższych wyników można wywnioskować, iż pomimo podobnej nazwy właściwości siana łąkowego znacznie różnią się od siana z górskich łąk.

W tabeli 2. zamieszczono wyniki analizy suchej masy i suchej masy organicznej kilku rodzajów ściółek stosowanych w hodowli zwierząt egzotycznych. Dane dla każdego podłoża uzyskano uśredniając otrzymane rezultaty z trzech reprezentacyjnych prób.

Tabela 2. Uśredniona zawartość suchej masy i suchej masy organicznej w badanych substratach

Nazwa substratu	Sucha masa [%]	Sucha masa organiczna [%]
Siano łąkowe	46,74	92,19
Siano z górskich łąk	88,40	92,31
Słoma pszenna	91,95	95,99
Trociny bukowe	89,24	99,79
Ziołowy ogród	87,88	92,08

Źródło: Opracowanie własne

Prawie wszystkie substraty charakteryzowały się wysoką zawartością suchej masy, oscylującą w granicach 88 – 92 %. Jedynie siano łąkowe wyróżniało się znacznie wyższą wilgotnością w stosunku do innych ściółek. Jest to zapewne związane z odmiennym procesem produkcyjnym, w którym produkt nie jest długotrwale suszony. Wysoka wilgotność substratu jest wyczuwalna podczas wyjmowania siana z opakowania i skutkuje trudnościami z rozdrobnieniem biomasy. W odpowiednich warunkach otoczenia można także zaobserwować skraplającą się parę wodną od wewnątrz szczelnie zamkniętego worka, co przy nieodpowiednim i długotrwałym przechowywaniu może prowadzić do gnicia żdzbeł.

Sucha masa organiczna wszystkich badanych ściółek była na bardzo wysokim poziomie i wynosiła od 92,08 % dla „ziołowego ogrodu” do 99,79 % dla trocin bukowych. Przebadane substancje stanowią przez to frakcję biodegradowalną odpadów komunalnych, jedynie w niewielkim stopniu zanieczyszczoną materią nieorganiczną.

Wartość energetyczna to jeden z najistotniejszych parametrów termofizycznych opisujących biomasę stanowiącą potencjalny substrat do produkcji biopaliw stałych. Rezultaty badań uzyskano poprzez całkowite spalanie odważki paliwa stałego w atmosferze tlenu i pomiar przyrostu temperatury wody w naczyniu kalorymetrycznym, a także po wyznaczeniu poprawek na ciepło wydzielające się przy spalaniu drutu oporowego. Badanie powtarzano dla każdego substratu tak długo, aż różnica pomiędzy wynikami dwóch najbardziej zbliżonych do siebie prób nie wynosiła więcej niż $120 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$. Następnie na podstawie tych dwóch podobnych pomiarów obliczano średnią wartość opałową ściółki. Poniżej, w tabeli 3., zamieszczono uśrednione wyniki obliczone na podstawie pomiarów przeprowadzonych na kalorymetrze KL – 12Mn.

Tabela 3. Uśredniona wartość opałowa badanych substratów

Nazwa substratu	Wartość opałowa [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
Siano łąkowe	18 640
Siano z górskich łąk	17 880
Słoma pszenna	17 770
Trociny bukowe	18 790
Ziołowy ogród	17 490

Źródło: Opracowanie własne

Najwyższą wartością opałową odznaczały się trociny bukowe. Nieco mniejszą wartość wyznaczono dla siana łąkowego, a najniższą dla „ziołowego ogrodu”. Niemniej jednak różnice

między ściółkami nie są duże, choć wszystkie przebadane substraty mają mniejszą wartość opałową niż węgiel kamienny (średnio około $21\ 000\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) [9,10].

Pomimo to pozyskane próbki miały wyższą kaloryczność w stosunku do danych zawartych w literaturze odnoszących się do tych samych substratów. Według autorów innych publikacji wartość opałowa słomy pszennej w stanie suchym wynosi około $17\ 300\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [18], natomiast siana łąkowego zawiera się w granicach od $16\ 600$ do $17\ 100\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [19].

W związku z dużymi zmianami właściwości biomasy, zależnie od warunków jej wzrostu, sposobu zbioru czy metody przechowywania i obróbki, bardzo trudno jest porównać otrzymane wyniki wartości opałowej trocin bukowych czy mieszanki trocin z roślinami zielnymi do wartości zamieszczonych w innych publikacjach.

Jednakże dzięki stosunkowo wysokiej wartości opałowej wszystkich rodzajów przebadanych substancji wykorzystywanych jako ściółki w hodowli zwierząt egzotycznych można stwierdzić, iż trociny, siano łąkowe czy słoma są wartościowymi substratami do konwersji energii. Należy jednak mieć na uwadze, iż tego rodzaju odpady charakteryzują się dużą zmiennością. Skład ilościowy i jakościowy poszczególnych resztek organicznych zależy od wielu czynników i dla każdej hodowli wykorzystana ściółka może odznaczać się innymi parametrami.

Dodatkowo, przy okazji ponownego wykorzystania podłoża z hodowli zwierząt egzotycznych, możliwe jest niwelowanie ewentualnych szkodliwych właściwości tychże odpadów z uwagi na możliwość występowania w nich domieszki ekskrementów i resztek pożywienia. Przetwarzanie ściółki mogłoby się odbywać poprzez ciśnieniową aglomerację zanieczyszczonej ściółki w brykietarce ślimakowej, która prasuje materiał w sposób ciągły, pod ciśnieniem przekraczającym $100\ \text{MPa}$ i w temperaturze powyżej 200°C . Na rynku dostępnych jest wiele urządzeń, które charakteryzują się dużą rozpiętością wydajności. Dzięki temu możliwy jest zakup maszyny dostosowanej do potrzeb każdego zakładu przetwarzającego biomasę [20].

6. Wnioski

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań sformułowano poniższe wnioski:

1. Siano łąkowe, słoma oraz trociny, będące odpadem z hodowli zwierząt egzotycznych stanowią dobry substrat do produkcji biopaliw stałych.
2. Ściółka stanowiąca odpad odznaczała się najniższą wartością opałową dla „ziołowego ogrodu”, a najwyższą dla trocin bukowych.

3. Niska wilgotność, a także wysoka zawartość masy organicznej, umożliwiają ciśnieniową aglomerację ściółki w celu jej zagęszczenia oraz trwałego scalenia bez konieczności uprzedniego dosuszania biomasy.
4. Wtórne zagospodarowanie odpadów z hodowli zwierząt pozwala na wykorzystanie ich potencjału energetycznego. Ich przerób, a nie składowanie ma pozytywny wpływ na ochronę środowiska.

Literatura:

1. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach; Dz.U. 2013 poz. 21; Rozdział 2., Art. 3., Poz. 10.
2. Mitchell M. A., Tully T. N.: *Manual of exotic pet practice*. Wyd. Saunders, Collingwood, Kanada 2008.
3. Gorazdowski M. J., Kaczorowski M.: *Leksykon zwierząt terraryjnych*. Wyd. MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2005, str. 7-11.
4. Fistein L.: *Goldhamster*. Wyd. Falken Verlag, München, Niemcy, 2000, str. 32-35.
5. Schmitz S.: *Zwierzęta w terrarium*. Wyd. MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1998, str. 7-10. Przekład z j. niem.: Floriańczyk B.
6. Leewood H.: *Pet Owner's Guide: Dwarf Rabbit*. Wyd. Interpet Publishing, Dorking Surrey, Wielka Brytania 2002.
7. Kotlarz A., Stankiewicz S., Biel W.: *Skład botaniczny i chemiczny siana z półnaturalnej łąki oraz jego wartość pokarmowa dla koni*. Acta Sci. Pol. Zootechnica 9 (4), 2010, str. 119-128.
8. Głowacki J., Berger S.: *Mała encyklopedia rolnicza*. Wyd. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1963.
9. Grzybek A., Gradziuk P., Kowalczyk K.: *Słoma. Energetyczne paliwo*. Wyd. Wieś Jutra, Warszawa 2001.
10. Denisiuk W.: *Słoma jako paliwo*. Inżynieria Rolnicza. Nr 1 (110), 2009, str. 83-89.
11. Kozakiewicz P., Nicewicz D.: *Surowce włókniste i sposoby ich rozdrabniania*. Wyd. SGGW, Warszawa 2003.
12. Szweykowski J. (red.): *Słownik botaniczny*. Wyd. Wiedza Powszechna, Warszawa 2003.
13. Lack A. J., Evans D. E.: *Biologia roślin. Krótkie wykłady*. Wyd. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005, str. 37-38.
14. Kowalczyk P. i in.: *Słoma jako surowiec lignocelulozowy*. Biuletyn Informacyjny OBRPPD w Czarnej Wodzie 1, 2000, str. 12-14.

15. Pan X.- J., Sano Y.: *Comparison of acetitic acid lignin with milled Wood and alkaline lignins from wheat straw*. *Holzforschung* v.54,1, 2000, str. 61-65.
16. Rowell R. M., Young R. A., Rowell J. K.: *Paper and composites from agro-based resources*. Lewis Publishers Boca Raton, Nowy Jork, 1997.
17. O'Dogherty M. J. i in.: *A study of the physical and mechanical properties of weat straw*. *Wyd. J. Agric. Engng. Res.* v. 62, 1995, str. 133-142.
18. Niedziółka I., Zuchniarz A.: *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*. *MOTROL*, 8A, 2006, str.232–237.
19. Niedziółka I. i in.: *Analiza cech fizycznych brykietów z biomasy roślinnej*. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 2 (143), 2013, str. 233-243.
20. Niedziółka I., Szpryngiel M.: *Ocena energetyczna procesu zagęszczania wybranych surowców roślinnych w brykieciarce ślimakowej*. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 9 (134), 2011, str. 153-159.

mgr inż. Katarzyna Kalinowska-Wichrowska¹
Katedra Materiałów, Technologii i Organizacji Budownictwa
Politechnika Białostocka Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
ul. Wiejska 45E
email: ¹katarzyna.wichrowska@op.pl

Wybrane zagadnienia z recyklingu betonu

Słowa kluczowe: *recykling, beton, cement, kruszywo recyklingowe*

Streszczenie: Rozwój przemysłu w tym i budowlanego sprawił, iż obecnie beton jest powszechnie stosowanym materiałem konstrukcyjnym – przy budowie dróg, wznoszeniu mostów, w budownictwie przemysłowym i mieszkaniowym. Jednak wraz z tak szerokim wykorzystaniem, z czasem pojawia się problem, co zrobić z gruzem powstałym z rozbioru wymienionych konstrukcji, a także jak zapobiec wyczerpaniu surowców naturalnych będących składnikami betonu (szczególnie kruszywa). W odpowiedzi pojawiło się rozwiązanie, które pozwala na ponowne zastosowanie użytych w betonie składników, a mianowicie - recykling betonu, jako odzysk z gruzu i wtórne wykorzystanie kruszywa, spoiwa, czy też stali. W artykule oprócz genezy betonu jako budulca konstrukcji oraz głównego jego składnika jakim jest cement, omówiono także proces recyklingu i niektóre właściwości kruszywa wtórnego (recyklingowego).

1. Historia betonu

Beton był już w czasach starożytnych powszechnie stosowanym materiałem budowlanym. To mieszanina kruszywa (drobno- i gruboziarnistego), piasku i cementu, która w wyniku hydratacji cementu ulega wiązaniu, następnie twardnieniu, stając się materiałem o właściwościach bliskich właściwościom skał naturalnych. Wynalezienie oraz rozpowszechnienie betonu, jako materiału budowlanego przypisywane jest starożytnym Rzymianom. Już w IV w. p.n.e. wznosili oni konstrukcje z betonu. Proces ten polegał na wlewaniu rzadkiej zaprawy między dwie murowane z kamienia ściany (pełniące także rolę szalunku traconego) oraz wrzucaniu do środka gruzu kamienno-ceramicznego. Natomiast już wiek później wytwarzano beton odpowiadający z definicji betonom współczesnym [1].

Zasadniczym składnikiem betonu jest cement. Prawdopodobnie pierwszym cementem stosowanym był cement Parkera (wypalany z wapienia marglistego wydobywanego na klifach Brytanii) opatentowany w 1796 r. przez Josepha Parkera. Nosił on też nazwę cementu rzymskiego z racji koloru przypominającego stare cementy rzymskie z wapna i pucolany. pierwsze ośrodki produkcji cementu rzymskiego zlokalizowane były w Anglii i Francji, ale szybko powstały kolejne w Niemczech, Szwajcarii, Czechach i Polsce. Stosowanym powszechnie aż do dziś (choć według zmienionej receptury) jest cement portlandzki [1].

Szczycić się można tym, iż Polska należy do nielicznych krajów, które jako pierwsze na świecie zaczęły w skali przemysłowej produkcję cementu. Należy podkreślić, iż historia przemysłu cementowego zaczyna się w okresie, kiedy ziemie polskie objęte były trzema zaborami. Pierwszą fabrykę cementu uruchomiono na ziemiach polskich w 1857 r. w Grodźcu koło Będzina. Była to dopiero piąta z kolei fabryka cementu na świecie. Pod koniec lat osiemdziesiątych przemysł cementowy osiągnął wielkość produkcji rocznej na poziomie ponad 21 mln ton cementu i znalazł się w czołówce światowych producentów, zajmując dziesiąte miejsce w świecie i szóste w Europie. Czasy świetności cementu w Polsce nie mogły trwać jednak wiecznie. Od roku 1979 zaczął się trudny okres dla polskiego przemysłu cementowego, spowodowany załamaniem gospodarczym kraju. Kryzys odbił piętno na produkcji cementu, której wielkość w latach 1981-89 spadła już do poziomu 15 – 17 mln ton. Po transformacji gospodarki planowej na gospodarkę rynkową (rok 1990), produkcja cementu wyniosła około 12 mln ton. W roku 1993 zużycie cementu w Polsce obniżyło się do 10 mln ton cementu. Poprawa sytuacji przemysłu nastąpiła w latach 1994 – 95 [2].

2. Recykling betonu

Niestety rozwój właściwie w każdej dziedzinie przemysłu wiąże się z oddziaływaniem w mniejszym bądź większym stopniu na środowisko naturalne. Oczywistym jest, iż należy dążyć, aby te wpływy były jak najmniej dotkliwe, a najlepszym rozwiązaniem byłoby je całkowicie wykluczyć. Im więcej konstrukcji powstaje, tym więcej potencjalnych odpadów w postaci gruzu budowlanego w przyszłości. Obecnie głównie rozbiórce poddawane są budynki wznoszone w latach 50 – tych. Stąd też ilość odpadów budowlanych, a głównie gruzu z rozbiórki obiektów ciągle wzrasta. Powstaje problem ich zagospodarowywania i składowania, co jest uciążliwe i kosztowne. Ponadto zalegający gruz nie jest walorem estetycznym krajobrazu. Dochodzi także aspekt wyczerpujących się zasobów naturalnych używanych do produkcji betonu – kruszywa. Rozwiązaniem jest tu coraz bardziej popularne zjawisko recyklingu betonu – czyli odzysku i wtórnego wykorzystania użytych wcześniej do stworzenia konstrukcji materiałów. Oprócz kruszywa może to być zaprawa, woda lub stal.

W Polskim prawie wg ustawy o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku pod pojęciem recyklingu *"rozumie się przez to odzysk, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach; obejmuje to ponowne przetwarzanie materiału organicznego (recykling organiczny), ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do celów wypełniania wyrobisk"* [3].

Sama koncepcja stosowania materiałów pochodzących ze starych obiektów budowlanych w nowych projektach sięga jeszcze czasów starożytnych. Już wtedy do budowy nowych dróg często wykorzystywano kamienie pochodzące z rozbiórki wcześniej istniejących, a do budowy części akweduktów rzymskich stosowano gruzobeton ceglany [4]. Szczególnie zauważalne odzyskiwanie odpadów budowlanych w Europie obserwuje się od końca II wojny światowej [5]. Z jednej strony wiąże się to z nagromadzeniem ogromnych ilości gruzu budowlanego, z drugiej zaś – z kurczeniem się zasobów naturalnych Ziemi. W 1947 r. powołano do życia międzynarodowe stowarzyszenie laboratoriów pod nazwą RILEM (*The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials Systems and Structures*; z fr. *RILEM*) skupiające ekspertów z kilkunastu krajów całego świata w dziedzinie konstrukcji i struktury materiałów. W związku ze wzrostem masy odpadów pochodzących z remontów i rozbiórki obiektów budowlanych w 1981r. część jego członków utworzyła pierwszy komitet techniczny zajmujący się rozbiórką i recyklingiem konstrukcji betonowych. Zaczątek „nowych czasów” w recyklingu gruzu budowlanego w połowie lat siedemdziesiątych zbiegł się z powstaniem licznych ruchów ekologicznych. W tym też okresie opracowano w Japonii pierwszą na świecie normę [6] regulującą zasady wykorzystania kruszywa z recyklingu i wykonywania na jego bazie betonu. W krótkim czasie zadziałały także czynniki ekonomiczne - kruszywo otrzymane z recyklingu stało się produktem handlowym. Obecnie szacuje się, że w samej Europie produkowanych jest ponad 200 mln ton odpadów budowlanych rocznie, z czego tylko średnio 30 % poddawanych jest recyklingowi [7].

Koszty wydobycia i transportu naturalnych kruszyw budowlanych są wysokie i mają tendencję ciągłego wzrostu. Duże obszary południowej Polski są praktycznie pozbawione łatwo dostępnych, polodowcowych złóż kruszyw budowlanych. Członkostwo w Unii Europejskiej nałożyło na nasz kraj obowiązek odpowiedniej gospodarki odpadami, także budowlanymi. Wprowadzono także obowiązek sporządzania planów gospodarki odpadami na szczeblach krajowym i wojewódzkich. Powstały przedsiębiorstwa profesjonalnie zajmujące się przetwarzaniem gruzu rozbiórkowego.

3. Przetwarzanie gruzu budowlanego jako wstępny etap recyklingu

W celu ułatwienia recyklingu odpadów betonowych konieczne jest sortowanie materiałów już w czasie rozbiórki. Wymaga to odpowiedniego zorganizowania oraz zaplanowania procesu rozbiórki. Taki sposób postępowania znacznie ułatwia proces przetworzenia surowców wtórnych w różnych grupach materiałowych. Na rysunku

przedstawiono pracę koparki, której zadaniem jest wstępne rozdrobnienie gruzu znajdującego się na placu rozbiórki obiektu, co przedstawia rysunek 1.

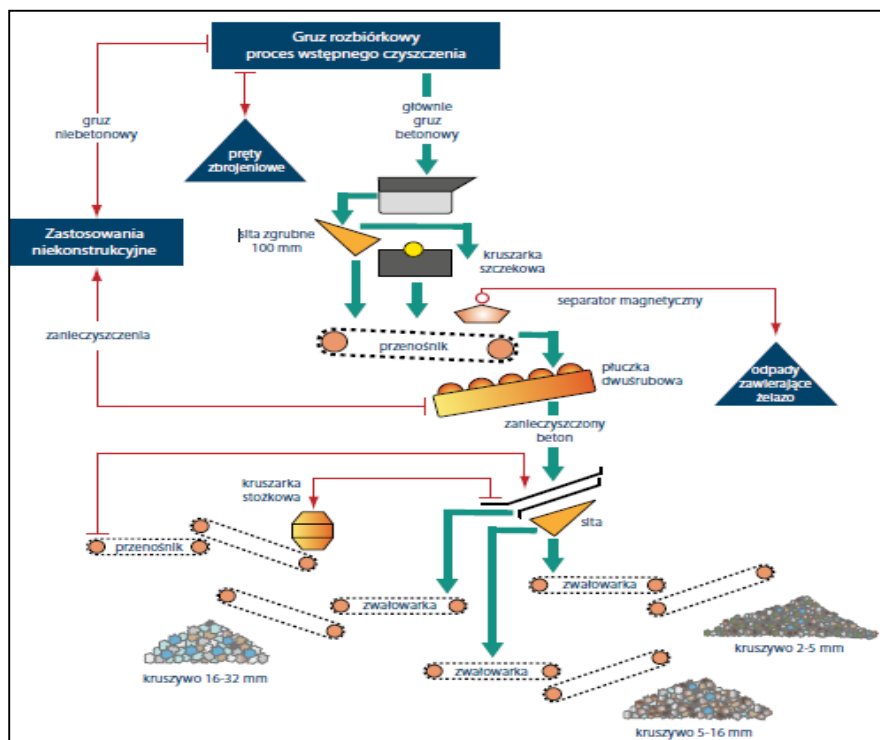


Rysunek 1. Rozdrabnianie i kruszenie gruzu przy obiekcie

Źródło: Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.: *Recykling betonu konstrukcyjnego*, Inżynier Budownictwa, luty 2009.

Gruz rozbiórkowy dzieli się na trzy kategorie pod względem stopnia zanieczyszczenia:

- Nieobciążony – jest to materiał mineralny powstający podczas selektywnie przeprowadzanych pracach rozbiórkowych, zawiera niewielkie ilości substancji organicznych i nieorganicznych takich jak ziemia, piasek, beton bez stali zbrojeniowej, cegła czy kamienie naturalne.
- Obciążony – powstaje przy pracach prowadzonych bez systematycznej selekcji. Zawarte w nim zanieczyszczenia (np. instalacje, okładziny podłóg) mogą przez sortowanie zostać odseparowane i unieszkodliwione.
- Zanieczyszczony substancjami szkodliwymi – powstaje z masy porozbiórkowej, która zawiera substancje zagrażające wodzie, glebie i zdrowiu oraz może prowadzić do niepożądanych skutków dla środowiska (np. budynki po pożarach). Jedynie gruz nieobciążony może swobodnie zostać poddany recyklingowi. Gruz obciążony nadaje się do dalszej obróbki, jeżeli zawartość zanieczyszczeń nie przekracza 10% całkowitej objętości gruzu. Natomiast odpady zanieczyszczone substancjami stanowiącymi zagrożenie muszą być w odpowiedni sposób unieszkodliwione. Główne etapy przetwarzania gruzu betonowego przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Schemat linii produkcyjnej

Źródło: Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.: *Recykling betonu konstrukcyjnego*, Inżynier Budownictwa, luty 2009.

Jakość kruszywa recyklingowego i jego przydatność do użycia w nowym betonie zależy przede wszystkim od właściwości betonu oryginalnego i od metody obróbki technologicznej gruzu betonowego. Obecnie najbardziej popularnymi i rozpowszechnionymi metodami odzysku kruszyw wtórnych są metody mechaniczne oraz metody mechaniczno - termiczne. Metody mechaniczne polegają na należytych przetworzeniu gruzu rozbiórkowego, za pomocą następujących czynności:

- rozdrabniania wcześniej dostarczonych bloków betonowych za pomocą kruszarki szczękowej,
- oddzielenia stali zbrojeniowej przy użyciu separatora magnetycznego,
- przesiania materiału przez odpowiednie sita wibracyjne,
- powtórne kruszenie niedostatecznie rozdrobnionych frakcji za pomocą kruszarki udarowej,
- powtórne oddzielenie stali zbrojeniowej za pomocą separatora magnetycznego [7].

Metody mechaniczne mogą być uzupełnione przemylaniem. Dzięki takiemu zabiegowi możliwe jest oddzielenie frakcji poniżej 0,063 mm, znajdujących się na powierzchni kruszywa grubego. Podczas odzysku kruszyw metodą mechaniczną zwraca się szczególną uwagę na zanieczyszczenia gruzu w postaci gipsu, materiałów bitumicznych, szkła oraz drewna, które stanowią popularny materiał konstrukcyjny i wykończeniowy budynków. Zanieczyszczenia takie negatywnie wpływają na właściwości

betonu. Materiały takie jak szkło bądź gips można eliminować praktycznie wyłącznie za pomocą selektywnej rozbiórki obiektów budowlanych. Próby usunięcia ich podczas dalszej przeróbki są bardzo kosztowne i przede wszystkim mało skuteczne [7].

Metoda mechaniczno – termiczna produkcji kruszyw wtórnych stanowi rozszerzenie metody mechanicznej, poprzez uzupełnienie jej o obróbkę termiczną. Istotą tej metody jest poddawanie gruzu betonowego dwóm procesom obróbki: ogrzaniu do temperatury ok. 300°C oraz otaczaniu w specjalnych młynach kulowych, z częściowym ścieraniem zaczynu cementowego z powierzchni pierwotnego kruszywa [7].

Duża ilość zaczynu cementowego wprowadzanego wraz z kruszywem recyklingowym powoduje niebezpieczeństwo wystąpienia korozji betonu. Gruz betonowy może stanowić źródło chlorków będących zagrożeniem dla stwardniałego zaczynu cementowego, jak również dla stali znajdującej się w żelbecie ze względu na powszechne stosowanie domieszek przyspieszających wiązanie. Chlorki powodują powstawanie zasadowych soli, rozkład fazy C – S – H, a w przypadku zbrojenia stwarzają warunki dla powstania mikroogniw korozyjnych. [8].

Poza właściwościami fizyko-mechanicznymi wyrobów uzyskanych na bazie kruszywa recyklingowego należy zwrócić uwagę na wpływ uzyskanego materiału na jakość środowiska naturalnego. Beton zawierający kruszywo z recyklingu wprowadzony do środowiska pozostaje w kontakcie ze wszystkimi jego komponentami, a w szczególności z glebą oraz wodami powierzchniowymi. Jest to istotne, zwłaszcza kiedy kruszywo pochodzi z obiektów przemysłowych. Beton po kilkudziesięciu latach eksploatacji może być nośnikiem metali ciężkich. Przed przystąpieniem do wykorzystania gruzu betonowego należy określić, jak duża jest zawartość metali ciężkich i jaki jest ich poziom wymywania do środowiska naturalnego. Ilość metali ciężkich uwalnianych z gruzu betonowego oraz dla porównania dopuszczalne graniczne wartości wymywania dla odpadów przeznaczonych na składowiskach odpadów obojętnych przedstawiono w tab.1. [8].

Tabela 1. Ilość uwalnianych metali ciężkich z gruzu budowlanego

Metal ciężki	Uwalniania ilość [mg/kg]	Dopuszczalne graniczne wartości wymywania dla odpadów przeznaczonych na składowiskach odpadów obojętnych [mg/kg]
Miedź	0,1	2,0
Nikiel	0,3	0,4
Cynk	0,1	4,0
Chrom	0,27	0,5
Kadm	0,03	0,04
Ołów	0,45	0,5
Mangan	< 0,01	-
Kobalt	< 0,01	-
Arsen	0,43	0,5
Rtęć	0,007	0,01

Źródło: [8]

W Polsce brak jest dokładnych danych na temat ilości gromadzonych i przetwarzanych odpadów budowlanych, lecz według prognoz gospodarczych ich produkcja, zarówno w Polsce jak i w Unii Europejskiej będzie miała tendencję wzrostową. Gruz budowlany można ponownie zagospodarować jako np. substytut kruszywa do betonu, do wymiany lub stabilizacji i wzmocnienia gruntu, na nasypy lub podbudowy drogowe, do budowy dróg lokalnych i leśnych, do rekultywacji składowisk i zapełniania wyrobisk, do warstw drenujących i wyrównawczych. Wykorzystanie gruzu betonowego do produkcji betonu konstrukcyjnego i wbudowanie przetworzonego odpadu w nowe obiekty budowlane nie jest proste. Nie należy zapominać, iż gruz budowlany jest materiałem o bardzo dużej zmienności cech chemicznych i fizycznych. Stwarza to trudności w doborze odpowiedniej metody przetwarzania, pozwalającej otrzymać materiał, który będzie nadawać się do stosowania przy produkcji betonu.

4. Kruszywo z recyklingu i jego właściwości

Kruszywa pochodzące z odpadów budowlanych nazywa się *kruszywami z recyklingu*. W normie PN-EN 12620 [9] sprecyzowano je jako kruszywa powstałe w wyniku przeróbki nieorganicznego materiału zastosowanego uprzednio w budownictwie.

Głównym jak dotąd obszarem zastosowania odpadów betonowych w Polsce była niwelacja terenów i drogownictwo (podbudowa dróg). Tam, gdzie nie można było zastosować odpadów w tym celu, składowano je na wysypiskach odpadów komunalnych lub specjalnych

wysypiskach gruzu rozbiórkowego. Od pewnego czasu, coraz większym zainteresowaniem cieszy się utylizacja gruzu betonowego w celu pozyskania wartościowego surowca do betonu. Problem recyklingu narasta z dwóch zasadniczych powodów – przyrostu ilości odpadów z rozbiórki obiektów betonowych oraz stałego wzrostu zużycia betonu w budownictwie. Pozyskiwanie odpowiedniej jakości wtórnego kruszywa z gruzu betonowego do produkcji nowych betonów konstrukcyjnych wymaga odpowiednich urządzeń i technologii przetwarzania zanieczyszczonego odpadami gruzu. Etapy przetwarzania gruzu betonowego w kruszywa wtórne ogólnie można przedstawić następująco:

- selektywna rozbiórka obiektu, z podziałem na grupy materiałowe,
- wstępne rozbijanie dużych elementów i segregacja materiałów,
- transport gruzu do zakładu przetwórczego lub w przypadku dużego obiektu, zlokalizowanie linii przetwarzania bezpośrednio w sąsiedztwie rozbieranego obiektu,
- wstępne kruszenie i oddzielenie stali zbrojeniowej i innych zanieczyszczeń,
- kruszenie zasadnicze,
- frakcjonowanie kruszywa,
- pakowanie kruszywa,
- dystrybucja kruszywa.

Stosowanie kruszywa z recyklingu jako składnika betonu umożliwia oszczędność zasobów naturalnych, czasu i środków finansowych, jednak jego jakość jest zwykle niższa w porównaniu z kruszywem naturalnym. Główną tego przyczyną jest wysoka porowatość kruszywa z recyklingu wynikająca z obecności w jego składzie znacznej ilości zaprawy cementowej (25 – 60 % objętości w zależności od wielkości frakcji). Fakt ten stwarza trudności zarówno w ustaleniu rzeczywistych właściwości kruszywa jak i w projektowaniu mieszanki betonowej oraz kontrolowaniu jej urabialności.

Właściwości kruszywa z recyklingu różnią się od właściwości kruszyw naturalnych. Powodem tych różnic jest obecność stwardniałego zaczynu cementowego wahającego się w granicach 20 – 60%. Zaprawa cementowa jest jednym z podstawowych składników kruszyw z recyklingu. W tab. 2 i tab. 3 porównano podstawowe właściwości kruszyw naturalnych i kruszyw z recyklingu [7]. Na pogorszenie mrozoodporności kruszyw oraz zmniejszenie gęstości przede wszystkim wpływa wysoka porowatość stwardniałego zaczynu [7].

Tabela 2. Właściwości kruszyw naturalnych i kruszyw z recyklingu

Właściwości			Kruszywo naturalne	Kruszywo z recyklingu
			Frakcja 4/16 mm	
Gęstość	Objętościowa	mg/m ³	2,66	2,64
	Ziaren wysuszonych w suszarce		2,62	2,33
	Ziaren nasyconych i powierzchniowo osuszonych		2,65	2,45
	Nasypowa		1,38	1,17
Mrozoodporność		%	1,0	3,4

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [7]

Tabela 3. Nasiąkliwość wagowa poszczególnych frakcji kruszyw

Frakcja [mm]	Kruszywo naturalne		Kruszywo z recyklingu		
	2/8	8/16	2/4	4/16	16/31,5
Nasiąkliwość wagowa [%]	1,1	0,8	10,2	6,9	4,8

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [7]

Nasiąkliwość kruszyw z recyklingu w znacznym stopniu przekracza średnie nasiąkliwości kruszyw naturalnych. W przypadku frakcji drobnych nasiąkliwość wzrasta nawet dziesięciokrotnie. Właściwości kruszyw wtórnych zmieniają się wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia kruszyw. Ma to związek ze wzrostem zawartości stwardniałego zaczynu cementowego we frakcjach drobnych. W tab. 4. przedstawiono procentową zawartość stwardniałego zaczynu bądź zaprawy w zależności od frakcji kruszywa z recyklingu [7].

Tabela 4. Zawartość zaczynu oraz zaprawy w poszczególnych frakcjach kruszywa z recyklingu

Frakcja[mm]	% Zawartość stwardniałego zaczynu cementowego/zaprawy cementowej
0/0,3	65 zaczyn
0/4	20 zaczynu
4/8	60 zaprawy
8/16	40 zaprawy
16/31,5	20 zaprawy

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

Można stwierdzić, że najbardziej korzystne jest zastąpienie kruszywem z recyklingu frakcji grubych. Kruszywa z recyklingu powyżej 16 mm mają zbliżone właściwości do kruszyw naturalnych. Większa część wytycznych dotyczących stosowania kruszyw z recyklingu

ogranicza użycie frakcji poniżej 4 mm do minimum, co zapobiega zwiększeniu wodożądności kruszywa oraz pogorszeniu parametrów jakościowych otrzymanego betonu. Jednym z problemów nieodłącznie związanych z wykorzystaniem kruszyw z odzysku jest możliwość przeniesienia zanieczyszczeń z gruzu do nowego betonu. Zanieczyszczeniami takimi mogą być kawałki stali, szkło, gips, grudki gliny, beton lekki, ogniotrwała cegła, chlorki itp. Badania prowadzone w Japonii wykazały, że zanieczyszczenia zawarte w kruszywie recyklingowym mają negatywny wpływ na właściwości betonu, między innymi na wytrzymałość na ściskanie. Istotnym czynnikiem wpływającym na właściwości betonu jest ilość, jakość oraz rodzaj zanieczyszczeń. Wpływ na wytrzymałość najbardziej szkodliwych zanieczyszczeń, które spowodują spadek wytrzymałości betonu na ściskanie o 15%, według badań przeprowadzonych w Japonii, przedstawiono w tab.5. [8]

Tabela. 5. Wpływ zanieczyszczeń na wytrzymałość betonu

Rodzaj składnika	Zawartość w kruszywie (%)	Wpływ na wytrzymałość na ściskanie
Tynk wapienny	7	Redukcja wytrzymałości na ściskanie o 15% w porównaniu do betonu opartego na mieszance mineralnej pozbawionej zanieczyszczeń
Grunt	5	
Drewno	4	
Gips	3	
Asfalt	2	
Farby na bazie octanu winylu	0,2	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [8]

Norma PN-EN 933-11:2009 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 11: Klasyfikacja składników kruszywa grubego z recyklingu” [11] wprowadza podział szkodliwych składników kruszywa na sześć podstawowych klas oraz osiem podklas.

Według instrukcji RILEM [7,12] kruszywa z recyklingu można podzielić na trzy kategorie:

- RCAC I – materiał pochodzący z elementów murowych,
- RCAC II – materiał pochodzący z elementów betonowych,

- RCAC III – materiał stanowiący mieszaninę co najmniej 80% kruszywa naturalnego oraz maksymalnie 20% kruszywa z recyklingu.

Ze względu na właściwości materiału recyklingowego zakres stosowania grupy RCAC I ogranicza się wyłącznie do stabilizacji i podbudów, natomiast grupę RCAC II można użyć w bardzo ograniczonych ilościach wraz z kruszywem naturalnym do produkcji betonu, który nie będzie narażony na działanie czynników zewnętrznych. Najbardziej uniwersalną grupą w zastosowaniu jest grupa RCAC III, ponieważ kruszywo odpowiadające jej wytycznym można w większości przypadków stosować jako samodzielne kruszywo do betonów narażonych na wszelkie działanie środowiska zewnętrznego – tabela 6,7 [8].

Tabela 6. Wymagania stawiane kruszywom z recyklingu do produkcji betonu

Cecha kruszywa		RCAC I	RCAC II	RCAC III
Minimalna gęstość w stanie suchym	kg/dm ³	1500	2000	2400
Maksymalna nasiąkliwość wagowa	%	20	10	3
Maksymalna zawartość materiału o gęstości < 2 200 kg/dm ³	%	-	10	10
Maksymalna zawartość materiału o gęstości < 1 800 kg/dm ³	%	10	1	1
Maksymalna zawartość materiału o gęstości < 1 000 kg/dm ³	%	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość materiałów obcych	%	5	1	1
Maksymalna zawartość metali	%	1	1	1
Maksymalna zawartość zanieczyszczeń organicznych	%	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość ziaren < 0,063 mm	%	3	2	2
Maksymalna zawartość ziaren < 4 mm	%	5	5	5
Maksymalna zawartość siarczanów rozpuszczalnych wyrażona jako SO ₂	%	1	1	1

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [8,12]

Tabela 7. Parametry oraz zawartości kruszywa z recyklingu wg wytycznych niemieckich

Rodzaj kruszywa	Zawartość [%]					Maksymalna zawartość rozpuszczalnych chlorków[%] masy	Maksymalna gęstość w stanie suchym kg/dm ³	Maksymalna zawartość frakcji grubych kruszyw z recyklingu w zawartości całkowitej kruszyw [%]			
								Beton zbrojony		Podbudowy stabilizacje ³	
	Elementy zewnętrzne	Elementy wewnętrzne									
TYP I Kruszywo z betonu	≤ 0,2	≤ 1	≤ 2	≤ 10	≤ 10	≤ 0,4	2000	10	40	50	100
	≤ 0,5	≤ 1	≤ 3	≤ 30	≤ 30		2000	15	-	40	100
	≤ 0,5	≤ 1	≤ 5	≤ 5	≤ 80		1800	20	-	40	100
	≤ 1	≤ 20	≥ 80				1500	-	-	-	100
Np. beton lekki, zaprawa budowlana, pumeks, beton komórkowy											
Np. szkło, ceramika, papier, gips, plastik, metal, drewno											
Obejmuje również frakcje drobne											

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [8,12]

Wytyczne niemieckie, jak również RILEM, ograniczają zastosowanie frakcji drobnych kruszyw pochodzących z recyklingu. Powyższe zalecenia dotyczą kruszyw o frakcji powyżej 4 mm. Japoński Komitet Normalizacyjny Kruszywa Recyklingowego wprowadził klasyfikacje kruszywa wtórnego uzyskanego dzięki usunięciu zaczynu z ziaren kruszywa według wskaźnika absorpcji wody co zostało przedstawione w tab.8. [13].

Tabela8. Klasyfikacja kruszyw wtórnych według absorpcji wody

Klasa jakość	KRUSZYWO GRUBE		KRUSZYWO DROBNE
	Wskaźnik absorpcji	Przeznaczenie	Wskaźnik absorpcji
L – niska jakość	$\leq 7 \%$	Beton do zasypek, beton osłonowy, beton wyrównawczy	$\leq 13 \%$
M – średnia jakość	$\leq 5 \%$	Elementy nie poddawane cyklicznemu za- i odmrażaniu, beton wypełniający rury stalowe	$\leq 7 \%$
H – wysoka jakość	$\leq 3 \%$	Bez ograniczeń do produkcji betonu konstrukcyjnego o wytrzymałości nominalnej $\leq 36 \text{ MPa}$	$\leq 3,5 \%$

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [13]

Klasyfikacja (tab.8) uwzględnia również podział na kruszywo grube i drobne. Według powyższej tabelki najwyższą jakością charakteryzuje się kruszywo o najniższej absorpcji wody. Istnieje wiele wymagań co do właściwości i stosowania kruszywa z recyklingu. Wszystkie opracowania potrzebują żmudnych i długotrwałych badań. Mimo iż Unia Europejska ujednoliciła system oceny właściwości kruszyw z recyklingu, kraje europejskie nadal stosują własne wytyczne wykorzystania kruszyw recyklingowych.

Dodatek kruszywa recyklingowego wpływa na zmianę właściwości reologicznych mieszanki betonowej, jak również na właściwości stwardniałego betonu. Już na etapie projektowania mieszanki betonowej konieczne jest uwzględnienie udziału kruszywa z recyklingu. Projektując skład mieszanki betonowej z kruszywem recyklingowym należy liczyć się z podwyższoną wodożądnością stosu okruszowego. Ilość wody wynikające ze wskaźnika w/s należy odpowiednio powiększyć o ilość wody, która zostanie zaabsorbowana w porach kruszywa i nie będzie brała udziału w procesie hydratacji cementu. Dodatkowa ilość wody wpływa negatywnie tylko na ognioodporność, szczególnie w betonach o niskim wskaźniku w/s. Jednak nie pogarsza większości właściwości betonu, takich jak wytrzymałość na ściskanie czy wodoszczelność. Stosując suche kruszywa należy liczyć się z dużą utratą konsystencji mieszanki betonowej w pierwszych 10 minutach od kontaktu kruszywa z wodą. Kruszywa z recyklingu powodują zmiany właściwości stwardniałego betonu, które również należy uwzględnić już na etapie projektowania mieszanki betonowej. Kruszywo recyklingowe w betonie powoduje redukcję modułu sprężystości, pogorszenie przyczepności pomiędzy kruszywem i zaprawą oraz zwiększenie pełzania. Głównie dlatego tego typu kruszywa nie powinny być stosowane w konstrukcjach sprężonych. W elementach takich jak fundamenty,

ściany, stropy nawet do 100% kruszywa grubego można zastąpić kruszywem z recyklingu, bez konieczności korekty projektu konstrukcji [14].

Ze względu na różnorodne pochodzenie kruszyw recyklingowych nie istnieje precyzyjne określenie zależności między jego ilością a zmianami parametrów stwardniałego betonu. Badania przeprowadzone przez naukowców z Wielkiej Brytanii i Hiszpanii potwierdziły, że istnieje zależność pomiędzy niektórymi cechami kruszywa z recyklingu, a właściwościami betonu otrzymanego z tego kruszywa. Na takie właściwości betonu jak: wytrzymałość na ściskanie, skurcz i moduł Younga największy wpływ miały poniższe cechy zastosowanego kruszywa: absorpcja wody, gęstość, stałość objętości, wytrzymałość [2].

Wytrzymałość betonu zmniejsza się wraz ze wzrostem proporcji kruszywa z recyklingu i spadkiem jego wytrzymałości. Ogólne trendy zmian spowodowanych wprowadzeniem kruszyw z recyklingu w odpowiednio zaprojektowanych mieszankach przedstawiono w tab. 9. W pierwszych badaniach porównujących betony na kruszywach wtórnych z analogicznymi betonami na kruszywach naturalnych otrzymano dla betonów z kruszywami recyklingowymi:

- niższe wytrzymałości na ściskanie (5 – 30%),
- niższe wytrzymałości na rozciąganie (10 – 20%),
- niższe współczynniki sprężystości (10 – 40%),
- większy skurcz (do 55%),
- większą wodoprzepuszczalność (2 – 5 razy),
- niewiele niższą mrozoodporność,
- wyższą prędkość procesów karbonatyzacji betonu (do 65%),
- silne uzależnienie od w/c procesów chlorków i korozji zbrojenia,
- nieznacznie krótszy czas wiązania betonu,
- szybszą utratę urabialności [14,2].

Tabela 9. Ogólne trendy zmian w betonach z kruszywem z recyklingu¹⁾

Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł Younga	Skurcz betonu	Penetracja wody pod ciśnieniem	Mrozoodporność
Spadek			Wzrost		Brak zmian
1)W porównaniu do mieszanek betonowych opartych na kruszywie naturalnym					

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [14]

Uzyskanie betonu z kruszywem recyklingowym o wytrzymałości porównywalnej z wytrzymałością betonu wytworzonego z kruszyw naturalnych jest możliwe dzięki zastosowaniu właściwych domieszek chemicznych i dodatków mineralnych oraz dobór odpowiedniego:

- udziału procentowego kruszyw z recyklingu w stosie okruszowym,
- stopnia zmielenia,
- stosunku w/c w betonie,
- stosunku piasek naturalny – kruszywo recyklingowe [2,14].

Wysokie właściwości betonów na kruszywach z recyklingu można poprawić, opracowując składy mieszanek o niskim w/c, a także zastępując frakcje drobne kruszywa recyklingowego dobrej jakości piaskami naturalnymi, ewentualnie stosując kruszywa ulepszone [2,14].

5. Podsumowanie

Recykling betonu to dość nowe pojęcie w Polsce, ale od dawna znane już na świecie. Większa świadomość w aspekcie ochrony środowiska i wymogi Wspólnotowe przyczyniły się do zwrócenia uwagi na korzyści płynące z odzyskiwania i ponownego użytku wykorzystanych pierwotnie do budowy materiałów. Dzięki procesowi recyklingu wydłużamy i oszczędzamy naturalne zasoby Ziemi (np. kruszywa). Ponowna obróbka gruzu, umożliwia pozbycie się go i uniknięcie kosztów składowania. Jeśli chodzi o kruszywo recyklingowe, to ma ono słabsze właściwości w porównaniu do naturalnego, lecz po odpowiednim zaprojektowaniu mieszanki betonowej, może być z powodzeniem wykorzystane. Stosowanie kruszyw z recyklingu będzie w przyszłości zjawiskiem coraz bardziej popularnym, podyktowanym względami zarówno ekologicznymi jak i ekonomicznymi. Stały rozwój technologii umożliwia stosowanie kruszyw wtórnych w betonach narażonych na działanie środowiska zewnętrznego, przez co stają się one bardziej uniwersalne i atrakcyjne dla projektantów, konstruktorów i producentów betonu towarowego. Wzrost zainteresowania recyklingiem może doprowadzić także do powstania nowych technologii i dalszego rozwoju w dziedzinie budownictwa. Wszystkie wymienione aspekty powodują, iż recykling betonu jest procesem pożądanym zarówno w dziedzinie budownictwa jak i gospodarki odpadami.

Literatura:

1. Raczkiewicz W.: *Beton- materiał budowlany znany od wieków*. Przegląd Budowlany 10'2012, s.13-14.
2. Szeląg H., Garbacik, A., Pichniarczyk P., Baran T.: *Cement romański i jego właściwości*. Surowce i Maszyny Budowlane, Styczeń 2008.
3. Ustawa (Dz. U. z 2013 r. poz. 21, z późn. zm.) o odpadach z dnia 14 grudnia 2012r., z późniejszymi zmianami.
4. Tabsh S.W., Abdelfath A.S.: *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*. Construction and Building Materials, vol. 23, Nr 2' 2009, p. 1163-1167.
5. Buck A.D.: *Recycled concrete as a source of aggregate*. American Concrete Institute, vol. 74, No. 5' 1977, p. 212-219.
6. B.C.S.J., *Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete*. Building Contractors Society of Japan. Committee of Disposal and Reuse of Construction Waste, 1977 r.
7. Wolska-Kotańska Cz.: *Właściwości i zastosowanie kruszywa z recyklingu betonu*. Magazyn Autostrady 3' 2005, s. 18-22.
8. Golda A., Król A.: *Drugie życie betonu*. Budownictwo, technologie, architektura 4'2006, 44 – 47.
9. PN-EN 12620:2004 - Kruszywa do betonu.
10. Golda A.: *Beton przyjazny środowisku*. Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce, Kraków 2008, s. 91 – 99.
11. PN-EN 933-11:2009 - Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 1-1: Klasyfikacja składników kruszywa grubego z recyklingu.
12. RILEM Recommendation,: *Specification for concrete with recycled aggregates*. Materials and Structures, 27' 1994, p. 557-559.
13. Zając B., Gołębiowska I.: *Ewolucja technologii recyklingu betonu*. Inż. Ap. Chem. 2010, s. 134 – 135.
14. Adjukiewicz A., Kliszczewicz A.: *Recykling betonu konstrukcyjnego – cz. I*, Inżynier Budownictwa, luty 2009, s. 65 – 69.

dr hab. Grażyna Łaska, prof. PB, mgr inż. Bożena Nazaruk¹

Politechnika Białostocka

Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska

ul. Wiejska 45A 15-351 Białystok

e-mail: ¹bozena.naz@wp.pl

Odpady komunalne – charakterystyka ilościowa i wybrane metody ich unieszkodliwiania

Słowa kluczowe: *odpady komunalne, recykling, odzyski, unieszkodliwianie, odgazowanie*

Streszczenie: W pracy zaprezentowano stan gospodarki odpadami w roku wprowadzenia nowej Ustawy o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 r. (Dz.U. z 2013 r., poz. 21). Z danych Głównego Urzędu Statystycznego wynika, że w 2013 roku, ilość wytworzonych odpadów zmniejszyła się o 792 tys. ton w porównaniu z rokiem 2012. W 2013 roku, na jednego mieszkańca Polski przypadało około 293 kg wytworzonych odpadów komunalnych, a w 2012 roku o 21 kg na mieszkańca więcej.

W 2013 roku, notowano wzrost udziału odpadów zebranych selektywnie w ogólnej ilości zebranych odpadów komunalnych z 10,5% w 2012 roku do 13,5% w 2013 roku. W okresie jednego roku zebrano 9 473,8 tys. ton odpadów komunalnych, z których 3 292,1 tys. ton przeznaczono do odzysku (ok. 35% ilości zebranych odpadów komunalnych), a 1 499 tys. ton odpadów komunalnych poddano recyklingowi (15,8% ilości odpadów komunalnych zebranych). Są to zarówno odpady komunalne zebrane selektywnie, jak i surowce wysortowane ze zmieszanych odpadów komunalnych. W 2012 roku ilość odpadów komunalnych poddanych recyklingowi była mniejsza i wynosiła 1 243,7 tys. ton. Spadek ilości wytwarzanych odpadów oraz wzrost selektywnej zbiórki odpadów komunalnych sugerują pozytywny wpływ wprowadzonej nowej ustawy na stan gospodarki odpadami w kraju.

1. Wstęp

Dynamiczny wzrost zaludnienia, postęp cywilizacji oraz konieczność zaspokojenia coraz to większych potrzeb ludzkości sprawia, że rośnie liczba wytwarzanych odpadów [7].

Wieloletnie dane ilości wytwarzanych odpadów wskazują, że każdy mieszkaniec pozostawia po sobie rocznie około 300 kg odpadów, najczęściej wymieszanych i zawierających różne substancje niebezpieczne (np. baterie, rtęć z termometrów) [7]. Narastający problem zagospodarowania odpadów skłania kraje Unii Europejskiej do wprowadzenia szeregu przepisów regulujących sposób postępowania z odpadami [16].

Po wstąpieniu Polski do Unii Europejskiej polskie prawodawstwo również uwzględnia najważniejsze regulacje unijne. Do najważniejszych regulacji prawnych dotyczących gospodarki odpadami należą [16]:

- Ramowa dyrektywa dotycząca odpadów (dyrektywa 75/442/EWG zmieniona dyrektywą 91/156/EWG i dyrektywą 91/689/EWG);
- Dyrektywa 99/31/WE dotycząca składowisk odpadów (zalecenia zostały odzwierciedlone w prawodawstwie polskim);
- Dyrektywy 89/429/EWG, 94/67/WE oraz 2000/76/WE dotyczące spalania odpadów zostały transponowane do prawa polskiego poprzez ustawę o odpadach oraz szereg aktów wykonawczych do tej ustawy;
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 stycznia 2015 r. w sprawie rodzajów odpadów, które mogą być składowane na składowisku odpadów w sposób nieselektywny;
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014 poz. 1923);
- Ustawa o opakowaniach i odpadach opakowaniowych (Dz.U. z 2001r. Nr 63 z późn. zm.);
- Ustawa o odpadach z 14 grudnia 2012 roku (Dz.U. z 2013 r., poz. 21).

Wyżej wymienione dokumenty prawne zawierają szereg wymagań dotyczących gospodarki odpadami. Podobne regulacje zawierają plany gospodarki odpadami [9]. Artykuł 86 Konstytucji RP zakłada, że ktokolwiek, kto powoduje jakąkolwiek uciążliwość dla środowiska, jest za nią odpowiedzialny w tym sensie, że powinien powstrzymać powstanie takiej uciążliwości przede wszystkim zapobiegać, starać się ją ograniczyć, bądź też usuwać skutki, jakie jego działanie dla środowiska sprawiło. Powodowaniem uciążliwości dla środowiska jest także wytwarzanie odpadów, wobec czego podmiot wytwarzający odpady powinien dążyć co najmniej do ograniczenia ich ilości, jeżeli nie eliminowania, a w odniesieniu do powstałych odpadów odpowiada za to, aby gospodarować nimi zgodnie z prawem. Założenia te dotyczą wszelkiego rodzaju odpadów, a więc w ich generalnym podziale zarówno odpadów gospodarczych, czyli powstających w związku z prowadzeniem działalności gospodarczej, jak i odpadów komunalnych, wytwarzanych w związku z zaspokajaniem potrzeb przez inne podmioty [1].

2. Klasyfikacja odpadów komunalnych

Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 (Dz.U. 2013, poz. 21) roku definiuje odpady jako nieprzydatne substancje i przedmioty, których posiadacz pozbywa się, zamierza pozbyć się, lub do ich pozbycia się jest zobowiązany. Odpady to wszystkie przedmioty oraz substancje stałe, również te nie będące ściekami substancje ciekłe, powstałe w wyniku działalności

przemysłowej, gospodarczej lub bytowania człowieka i nieprzydatne w miejscu lub w czasie, w którym powstały [1].

Odpady komunalne są to odpady związane z bytowaniem człowieka [1]. Stałe i ciekłe odpady powstające w gospodarstwach domowych, obiektach użyteczności publicznej, obiektach obsługi ludności z wyłączeniem zakładów opieki zdrowotnej i weterynaryjnej, nieczystości gromadzone w zbiornikach bezodpływowych, wraki pojazdów mechanicznych, odpady uliczne. Typowe komunalne odpady stałe (KOS) składają się z odpadów organicznych, szkła, papieru, tworzyw sztucznych, tekstyliów, gumy, żelaza, metali niezależnych, kartonów z wielu różnorodnych materiałów, wyrobów „brunatnych”, wyrobów „białych” oraz drobnych odpadów chemicznych z gospodarstw domowych [6]. Odpady komunalne powstają w gospodarstwach domowych, z wyłączeniem pojazdów wycofanych z eksploatacji, a także odpady niezawierające odpadów niebezpiecznych pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów powstających w gospodarstwach domowych. Źródłami powstawania odpadów komunalnych są gospodarstwa domowe, obiekty infrastruktury (handel, usługi, rzemiosło, szkolnictwo, przemysł w części „socjalnej” i inne) [3].

Komunalne odpady stałe można podzielić na trzy rodzaje [10]:

- komunalne (powstają w gospodarstwach domowych).
- komunalnopodobne (posiadają cechy jak komunalne lub zbliżone, ale powstają poza gospodarstwami domowymi), które można traktować jak komunalne i poddawać segregacji.
- przemysłowe (powstają w wyniku procesów produkcji).

Do odpadów komunalnych należą [6]:

- odpady domowe – związane z przebywaniem ludzi w miejscach zamieszkania, odpady gromadzone w mieszkaniach w koszach na śmieci resztki żywności opakowania, zużyte przedmioty domowe odpady z obiektów użyteczności publicznej,
- odpady wielkogabarytowe (wraki samochodowe, meble, telewizory, pralki, lodówki),
- odpady uliczne – śmieci zbierane w koszach ulicznych oraz zmiotki z ulic i placów miejskich,
- odpady zielone – odpady z pielęgnacji terenów zieleni miejskiej i ogrodów przydomowych, gruz i ziemia z prac budowlanych i remontowych, śnieg i lód usuwany z ulic i placów w okresie zimowym.

Do określenia rodzajów odpadów i sposobów ich utylizacji wprowadzono klasyfikację odpadów. Klasyfikacja ta odzwierciedla genezę sposobu powstawania odpadów, ekologiczną

szkodliwość, właściwości odpadów, ich potencjalną użyteczność oraz masowa wytwarzania. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów następująco klasyfikuje odpady komunalne (Tab. 1).

Tabela 1. Klasyfikacja odpadów komunalnych

20	Odpady komunalne łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie
20 01	Odpady komunalne segregowane i gromadzone selektywnie (z wyłączeniem 15 01)
20 01 01	Papier i tektura
20 01 02	Szkło
20 01 08	Odpady kuchenne ulegające biodegradacji
20 01 10	Odzież
20 01 11	Tekstylia
20 01 13	Rozpuszczalniki
20 01 14	Kwasy
20 01 15	Alkalia
20 01 17	Odczynniki fotograficzne
20 01 19	Środki ochrony roślin
20 01 21	Lampy fluorescencyjne i inne odpady zawierające rtęć
20 01 23	Urządzenia zawierające freony
20 01 25	Oleje i tłuszcze jadalne
20 01 26	Oleje i tłuszcze inne niż wymienione w 20 01 25
20 01 27	Farby, tusze, farby drukarskie, kleje, lepiszcze i żywice zawierające substancje niebezpieczne
20 01 28	Farby, tusze, farby drukarskie, kleje, lepiszcze i żywice inne niż wymienione w 20 01 27
20 01 29	Detergenty zawierające substancje niebezpieczne
20 01 30	Detergenty inne niż wymienione w 20 01 29
20 01 31	Leki cytotoksyczne i cytostatyczne
20 01 32	Leki inne niż wymienione w 20 01 31
20 01 33	Baterie i akumulatory łącznie z bateriami i akumulatorami wymienionymi w 16 06 01, 16 06 02 lub 16 06 03 oraz niesortowane baterie i akumulatory zawierające te baterie
20 01 34	Baterie i akumulatory inne niż wymienione w 20 01 33
20 01 35	Zużyte urządzenia elektryczne i elektroniczne inne niż wymienione w 20 01 21 i 20 01 23 zawierające niebezpieczne składniki
20 01 36	Zużyte urządzenia elektryczne i elektroniczne inne niż wymienione w 20 01 21, 20 01 23 i 20 01 35
20 01 37	Drewno zawierające substancje niebezpieczne
20 01 38	Drewno inne niż wymienione w 20 01 37
20 01 39	Tworzywa sztuczne
20 01 40	Metale
20 01 41	Odpady z czyszczenia kominów (w tym zmiotki wentylacyjne)
20 01 80	Środki ochrony roślin inne niż wymienione w 20 01 19
20 01 99	Inne niewymienione frakcje zbierane w sposób selektywny
20 02	Odpady z ogrodów i parków (w tym z cmentarzy)

20 02 01	Odpady ulegające biodegradacji
20 02 02	Gleba i ziemia, w tym kamienie
20 02 03	Inne odpady nieulegające biodegradacji
20 03	Inne odpady komunalne
20 03 01	Niesegregowane (zmieszane) odpady komunalne
20 03 02	Odpady z targowisk
20 03 03	Odpady z czyszczenia ulic i placów
20 03 04	Szlamy ze zbiorników bezodpływowych służących do gromadzenia nieczystości
20 03 06	Odpady ze studzienek kanalizacyjnych
20 03 07	Odpady wielkogabarytowe
20 03 99	Odpady komunalne niewymienione w innych podgrupach

Źródło: Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. (Dz.U. 2014 poz. 1923) w sprawie katalogu odpadów

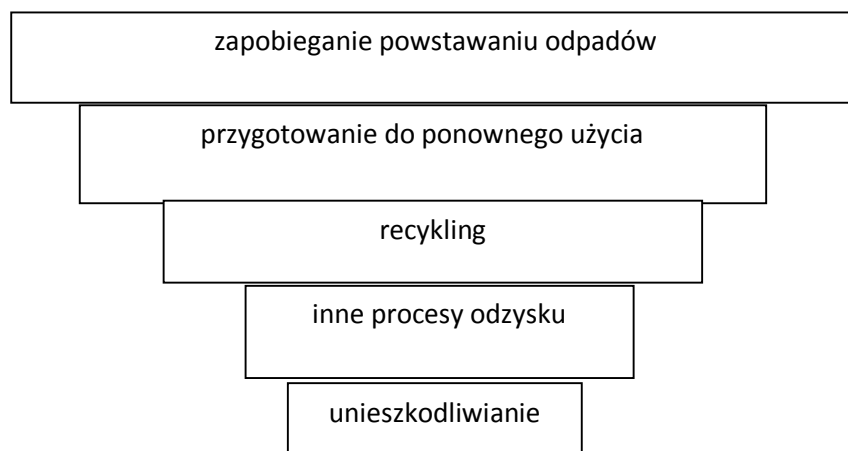
Odpady klasyfikuje się w zależności od źródeł powstawania, stopnia uciążliwości bądź stwarzania zagrożeń dla życia lub zdrowia ludzi i środowiska. Podstawą klasyfikacji wszystkich typów odpadów mogą być kryteria fizykochemiczne i biologiczne. Klasyfikację można także prowadzić pod kątem technologicznym, czy też ekonomicznym. W klasyfikacji bierze się pod uwagę [5]:

- źródło pochodzenia odpadów,
- rodzaj surowca z jakiego powstał odpad,
- stan skupienia odpadu,
- skład chemiczny odpadu,
- stopień toksyczności,
- stopień w jakim odpad może zagrażać środowisku,
- potencjał do dalszego wykorzystania np. w przemyśle.

Pojęcie odpadu jest kategorią względną, ponieważ większość produktów ubocznych może być wykorzystywana, jako surowce towarzyszące i wtórne. Na ogół definiujemy je, jako zużyte przedmioty oraz substancje powstające w wyniku bytowania człowieka lub jego działalności przemysłowej, przeznaczone do usunięcia lub składowania z powodu braku możliwości ich wykorzystania [5]. Część z nich ulega rozkładowi, reszta to odpady stałe, czyli takie, które nie ulegają lub proces ten trwa bardzo długo.

Każdy, kto podejmuje działania powodujące lub mogące powodować powstanie odpadów, powinien takie działania planować, projektować i prowadzić przy użyciu takich sposobów produkcji lub form usług oraz surowców i materiałów, aby w pierwszej kolejności zapobiegać powstawaniu odpadów lub ograniczać ich ilość i negatywne oddziaływanie na życie i zdrowie ludzi oraz na środowisko, w tym przy wytwarzaniu produktów, podczas i po

zakończeniu ich użycia [1]. Taki sposób postępowania jest zgodny z przyjętą hierarchią postępowania z odpadami (Rys. 1).



Rysunek 1. Hierarchia postępowania z odpadami

Źródło: Opracowanie na podstawie [1]

Odpady, których powstaniu nie udało się zapobiec, posiadacz odpadów w pierwszej kolejności jest obowiązany poddać odzyskowi. Odzysk, polega na przygotowaniu odpadów przez ich posiadacza do ponownego użycia lub poddania recyklingowi, a jeżeli nie jest to możliwe z przyczyn technologicznych lub nie jest uzasadnione z przyczyn ekologicznych lub ekonomicznych – poddaniu innym procesom odzysku. Recykling organiczny polega na obróbce tlenowej lub na obróbce beztlenowej odpadów, które ulegają rozkładowi biologicznemu w kontrolowanych warunkach przy wykorzystaniu mikroorganizmów. W obróbce beztlenowej odpadów powstaje materia organiczna lub metan. Należy zaznaczyć, że składowanie na składowisku odpadów nie jest traktowane jako recykling organiczny. Odpady, których poddanie odzyskowi nie było możliwe z przyczyn technicznych, posiadacz odpadów jest obowiązany unieszkodliwić. Składowane powinny być wyłącznie te odpady, których unieszkodliwienie w inny sposób było niemożliwe z różnych przyczyn. Unieszkodliwianiu poddaje się te odpady, z których uprzednio wysegregowano odpady nadające się do odzysku [1].

3. Charakterystyka ilościowa odpadów komunalnych w Polsce

Ilość oraz skład morfologiczny odpadów komunalnych w bardzo dużym stopniu zależą od miejsca ich powstawania, a szczególnie od zamożności społeczności lokalnej. Ilość odpadów komunalnych zebranych, w przeliczeniu na jednego mieszkańca, zależy również od kondycji ekonomicznej poszczególnych regionów kraju.

Ilość odpadów komunalnych dla każdego regionu Polski przedstawia znaczne różnice liczbowe. Bilans odpadów komunalnych dla całego kraju w 2013 roku przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Odpady ogółem i odpady komunalne wytworzone w Polsce w 2013 roku

Wyszczególnienie	2000	2005	2010	2012	2013
Odpady ogółem	1377100	133956	125517	135209	141888
Odpady (z wyłączeniem odpadów komunalnych)	125484	124602	113479	123124	130593
Odpady komunalne	-	12169	12038	12085	11295

Źródło: [3]

Z danych GUS-u wynika, że w 2012 roku ilość odpadów wytworzonych wynosiła 12 084,5 tys. ton, natomiast w 2013 roku było to 11 294,9 tys. ton. Na jednego mieszkańca Polski w 2013 roku przypadało około 293 kg wytworzonych odpadów komunalnych (odpowiednio w 2012 r. – 314 kg, przy przeciętnej dla krajów Unii Europejskiej – 492 kg).

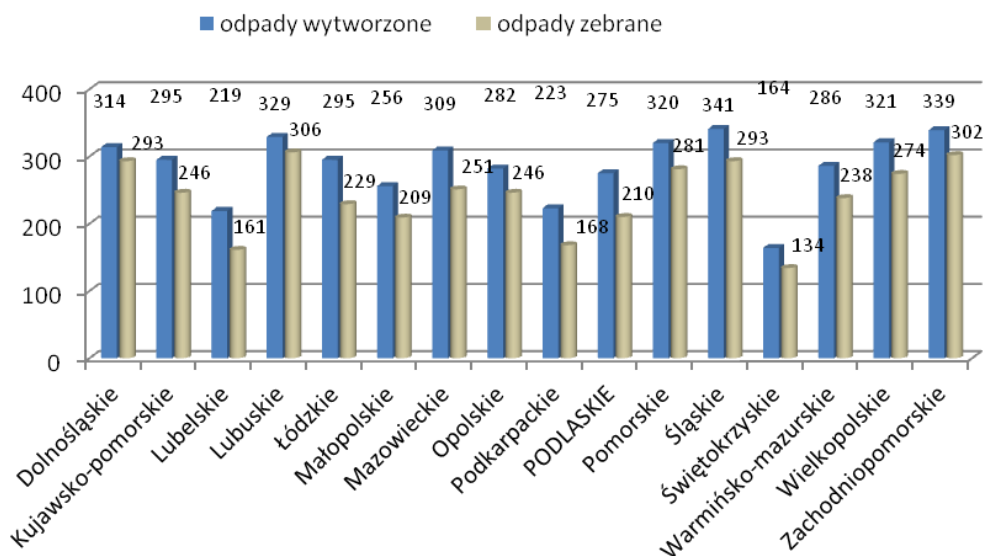
W 2013 roku, w Polsce, zebrano 9 474 tys. ton odpadów komunalnych (spadek o 1,1% w porównaniu z 2012 r.) (Tab. 3). Na jednego mieszkańca Polski przypadało średnio 246 kg zebranych odpadów komunalnych, z tego najwięcej w województwach: lubuskim (306 kg), zachodniopomorskim (302 kg), śląskim (293 kg) i dolnośląskim (293 kg); najmniej natomiast w województwach: świętokrzyskim (134 kg), lubelskim (161 kg) i podkarpackim (168 kg) [2]. W województwie podlaskim na jednego mieszkańca zebrano 210 kg odpadów (Rys. 2).

Tabela 3. Odpady komunalne wytworzone i zebrane według województw w 2013 roku

WOJEWÓDZTWA VOIVODSHIPS	Wytworzone Generated		Zebrane Collected	
	w tys. ton in thous. tonnes	na 1 mieszkańca w kg per capita in kg	w tys. ton in thous. tonnes	na 1 mieszkańca w kg per capita in kg
POLSKA..... 2005	12169	319	9352	245
POLAND 2010	12038	315	10044	263
2012	12085	314	9581	249
2013	11295	293	9474	246
Dolnośląskie.....	914	314	854	293
Kujawsko-pomorskie.....	618	295	515	246
Lubelskie.....	473	219	348	161
Lubuskie.....	336	329	313	306
Łódzkie.....	741	295	576	229
Małopolskie.....	861	256	702	209
Mazowieckie.....	1643	309	1332	251
Opolskie.....	284	282	248	246
Podkarpackie.....	475	223	358	168
Podlaskie.....	328	275	252	210
Pomorskie.....	735	320	645	281
Śląskie.....	1570	341	1348	293
Świętokrzyskie.....	208	164	170	134
Warmińsko-mazurskie.....	414	286	345	238
Wielkopolskie.....	1111	321	950	274
Zachodniopomorskie.....	583	339	520	302

a Dane szacunkowe. a Estimated data.

Źródło: [3]

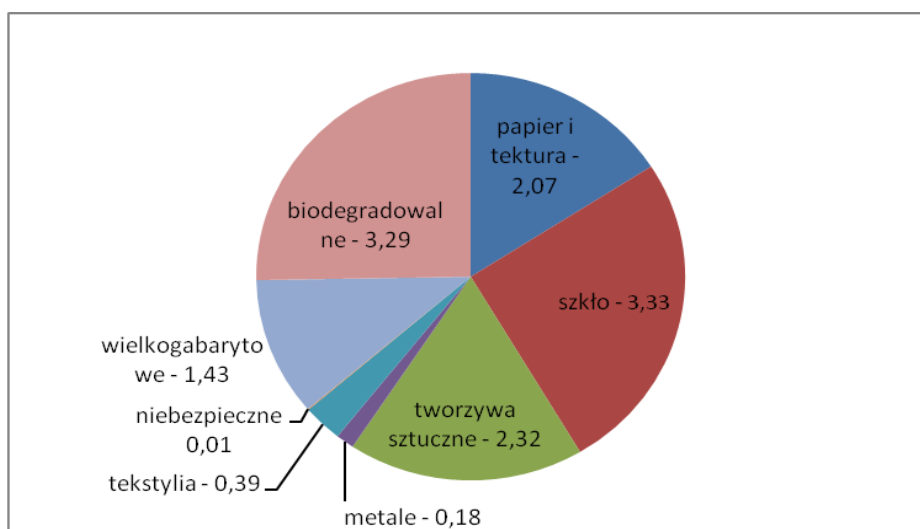


Rysunek 2. Odpady komunalne wytworzone i zebrane według województw w 2013 roku

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3]

W 2013 roku, selektywną zbiórkę odpadów komunalnych prowadzono w 2 468 gminach (w 2012 r. w 2410 gminach). Największy udział (93%) odzysku z odpadów wytworzonych zebrano w województwie dolnośląskim, a najmniejszy (75%) w województwie podkarpackim [2].

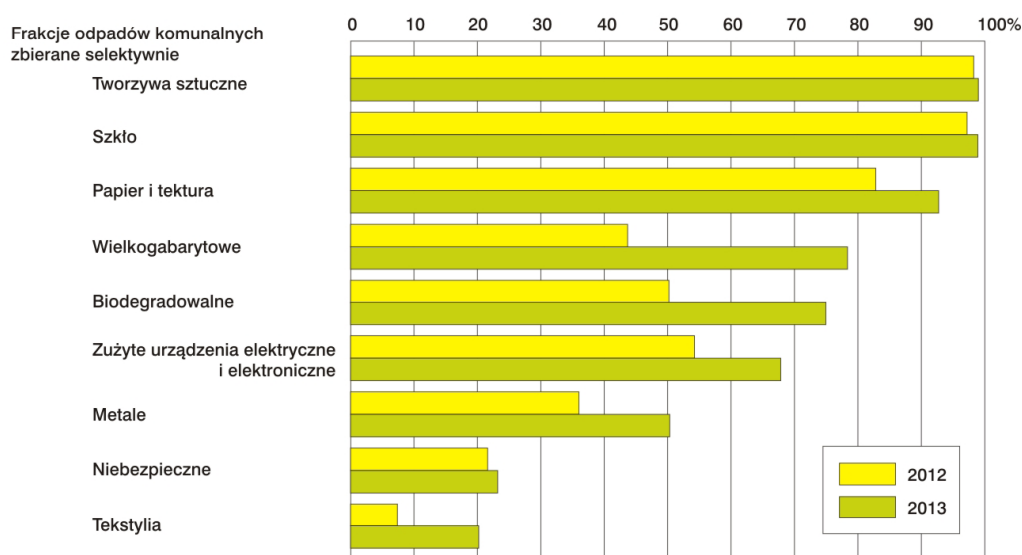
W 2013 roku, znacząco zwiększył się odsetek gmin, w których odbierano frakcje odpadów komunalnych w postaci odpadów wielkogabarytowych (wzrost udziału gmin o 35 punktów procentowych) i biodegradowalne (wzrost o 25 punktów procentowych). Zwiększył się również udział gmin, w których zbierano selektywnie zużyte urządzenia elektryczne i elektroniczne oraz metale (po 14 punktów procentowych), tekstylia (13 punktów procentowych) papier i tekturę (10 punktów procentowych) (Rys. 3). Udział gmin, w których zbierano pozostałe frakcje odpadów (szkło, tworzywa sztuczne, odpady niebezpieczne) pozostał na prawie niezmiennym poziomie (wzrost o ok. 1 punkt procentowy) [2,14].



Rysunek 3. Odpady komunalne według rodzajów zebrane w 2013 r. w [%]

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [3]

W 2013 r., odnotowano zwiększenie się udziału odpadów zebranych selektywnie w ogólnej ilości zebranych odpadów komunalnych z 10,5% w 2012 r. do 13,5% w 2013 roku. Całkowita waga zebranych selektywnie odpadów zwiększyła się z około 1 005 tys. ton w 2012 r. do około 1 275 tys. ton w 2013 roku. Odnotowano zwiększenie o 40% selektywnej zbiórki niektórych frakcji odpadów, np. odpadów wielkogabarytowych (Rys. 4). Na jednego mieszkańca Polski w 2013 roku przypadało około 33 kg zebranych selektywnie odpadów komunalnych w porównaniu z 26 kg w 2012 roku [2].

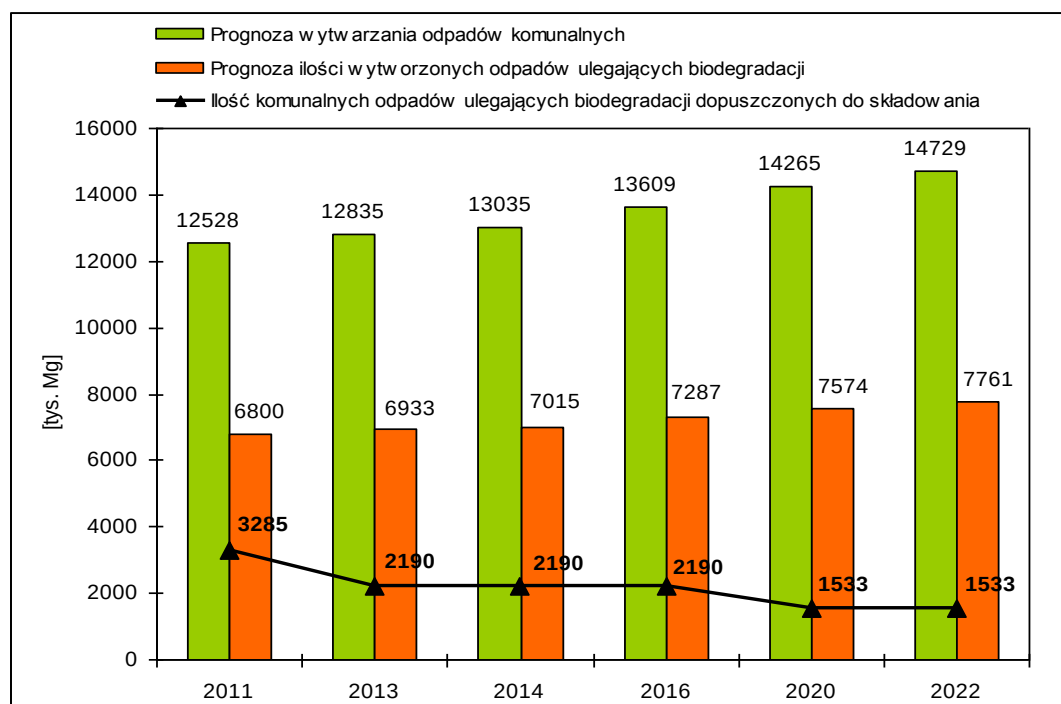


Rysunek 4. Frakcje odpadów komunalnych zbierane selektywnie w 2012 i 2013 roku [%]

Źródło: [2]

Analizy Krajowego planu gospodarki odpadami z 2010 zakładały wzrost ilości wytwarzanych odpadów w przeliczeniu na jednego mieszkańca do poziomu 329 kg/M w 2013

roku i 377 kg/M w 2020 roku (Rys. 5). Wielkości te zostały przeszacowane, ponieważ od 2012 roku zauważa się tendencję do zmniejszania ilości wytwarzanych odpadów komunalnych.

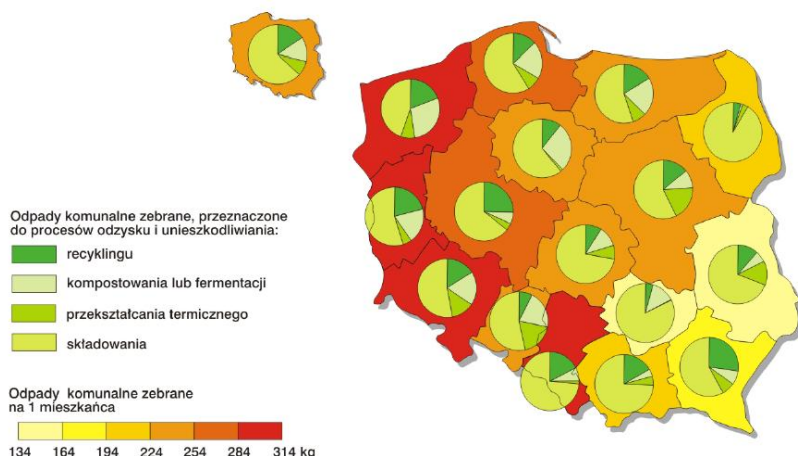


Rysunek 5. Prognozowane ilości wytwarzanych odpadów komunalnych, w tym odpadów komunalnych ulegających biodegradacji w latach 2011-2022

Źródło: Krajowy plan gospodarki odpadami 2014, Warszawa 2010

W 2013 r. zebrano 9 473,8 tys. ton odpadów komunalnych, z których 3 292,1 tys. ton przeznaczono do odzysku (ok. 35% ilości zebranych odpadów komunalnych). Prawie 1 499 tys. ton odpadów komunalnych poddano recyklingowi (15,8% ilości odpadów komunalnych zebranych) (Rys. 6). Są to zarówno odpady komunalne zebrane selektywnie, jak i surowce wysortowane ze zmieszanych odpadów komunalnych. W 2012 roku wielkości te wyniosły 1 243,7 tys. ton (13,0%) [2].

Okolo 1 230 tys. ton odpadów komunalnych (13,0%) skierowano do biologicznych procesów przetwarzania (kompostowania lub fermentacji). Są to głównie odpady zielone z ogrodów, parków i cmentarzy, odpady z targowisk, biodegradowalne odpady z gospodarstw domowych i odpady z gastronomii. W porównaniu z rokiem 2012 ich udział w ogólnej ilości zebranych odpadów komunalnych zwiększył się o 1,2 punktów procentowych do poziomu 13,0%. Obok tego, około 563 tys. ton odpadów komunalnych (ok. 6%) przeznaczono do przekształcenia termicznego z odzyskiem energii [2].

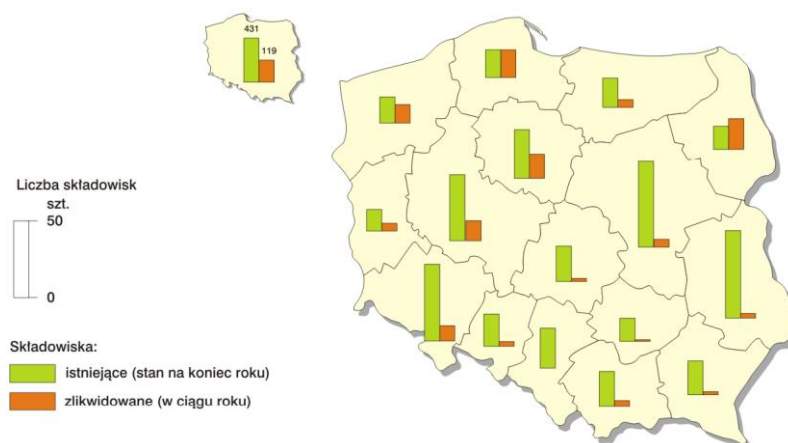


Rysunek 6. Gospodarka zebranymi odpadami komunalnymi w 2013 r.

Źródło: [2]

Do unieszkodliwienia odpadów skierowano łącznie 6 181,7 tys. ton, z czego 5 978,7 tys. ton (63,1%) przeznaczono do unieszkodliwiania przez składowanie, a 203,0 tys. ton (2,1%) do unieszkodliwiania poprzez przekształcenie termiczne bez odzysku energii. W porównaniu z 2012 rokiem odnotowano znaczący spadek udziału odpadów komunalnych przeznaczonych do składowania. W 2012 roku odpady te stanowiły prawie 75% całkowitej ilości zebranych odpadów komunalnych (7 158,2 tys. ton) [2].

Na koniec 2013 roku funkcjonowało 431 składowisk przyjmujących odpady komunalne o łącznej powierzchni ponad 1 944 ha. W 2013 roku na terenie naszego kraju zamknięto 119 tego typu składowisk o powierzchni 365 ha. W 2013 roku w województwie podlaskim zamknięto 20 składowisk, które nie spełniały wymagań technicznych i obecnie na obszarze województwa podlaskiego funkcjonuje 15 składowisk odpadów (Rys. 7). W województwie podlaskim w jako jedynym województwie w kraju zostało zamkniętych więcej składowisk niż obecnie istnieje. Najwięcej, 57 składowisk odpadów znajduje się w województwie mazowieckim (Tab. 4).



Rysunek 7. Składowiska kontrolowane w 2013 roku

Źródło: [2]

Tabela 4. Składowiska odpadów według województw w 2013 roku

WOJEWÓDZTWA VOIVODSHIPS	Składowiska kontrolowane Controlled landfill sites						
	czynne in operation				o zakończonej eksploatacji not operational		
	ogółem grand total	powierzchnia w ha area in ha		w tym części składowisk / kwater zamkniętych w ciągu roku of which landfill sections / cells closed during the year	ogółem grand total	powierzchnia w ha area in ha	
		razem total				razem total	w tym zrekultywowa- wana w ciągu roku of which reclaimed during the year
	stan w dniu 31 XII as of 31 XII		razem total	w tym zrekultywowana of which reclaimed	stan w dniu 31 XII as of 31 XII		
P O L S K A.....	431	1944,3	100,4	24,9	119	364,8	32,9
P O L A N D							
Dolnośląskie	30	168,7	15,2	–	10	45,3	–
Kujawsko-pomorskie	32	168,0	5,6	–	16	22,0	–
Lubelskie	56	122,4	–	–	3	3,6	1,7
Lubuskie	14	80,0	3,0	2,0	5	19,6	–
Łódzkie	23	113,6	6,5	4,0	2	2,6	–
Małopolskie	23	84,5	10,2	–	4	8,9	–
Mazowieckie	57	200,2	9,1	1,4	5	8,0	–
Opolskie	21	128,0	2,8	2,8	3	12,0	1,9
Podkarpackie	22	58,9	1,4	1,4	2	4,5	–
Podlaskie	15	46,6	7,9	6,9	20	45,5	8,1
Pomorskie	18	89,2	9,0	–	18	79,1	8,4
Śląskie	26	147,5	7,6	1,8	–	–	–
Świętokrzyskie	15	52,7	–	–	1	4,7	–
Warmińsko-mazurskie	19	71,5	1,0	–	5	16,3	2,0
Wielkopolskie	43	242,9	16,5	2,4	13	35,0	8,7
Zachodniopomorskie	17	169,6	4,6	2,2	12	57,7	2,1

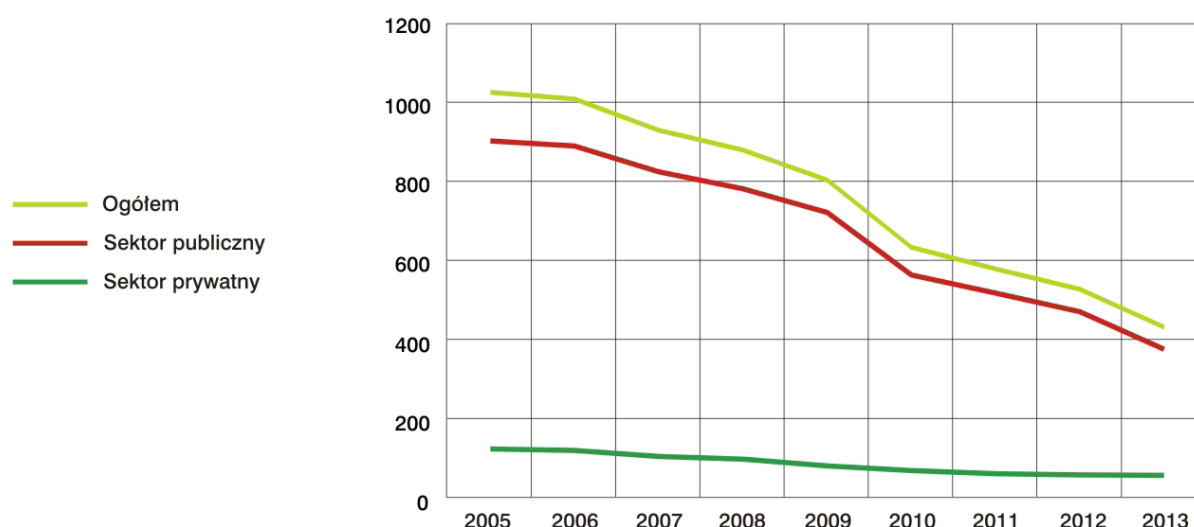
Źródło: [3]

W 2013 r. nieznacznie wzrósł odsetek (95,8%) składowisk wyposażonych w wagi (w 2012 roku - 95,3%), natomiast udział składowisk wyposażonych w instalacje odgazowywania wyniósł 84,2% (w 2012 roku - 81,6%) [2].

W związku z koniecznością dostosowania składowisk odpadów komunalnych do wymagań technicznych i organizacyjnych wynikających z przepisów prawa liczba czynnych

składowisk od kilkunastu lat systematycznie spada. W odniesieniu do składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne, na których są składowane odpady komunalne do końca 2014 roku przyjęto priorytet, aby w poszczególnych województwach postępowała stopniowa redukcja liczby małych nieefektywnych składowisk lokalnych. Ważne jest także zapewnienie funkcjonowania składowisk gminnych w liczbie od 5 do 15 obiektów w skali województwa [2].

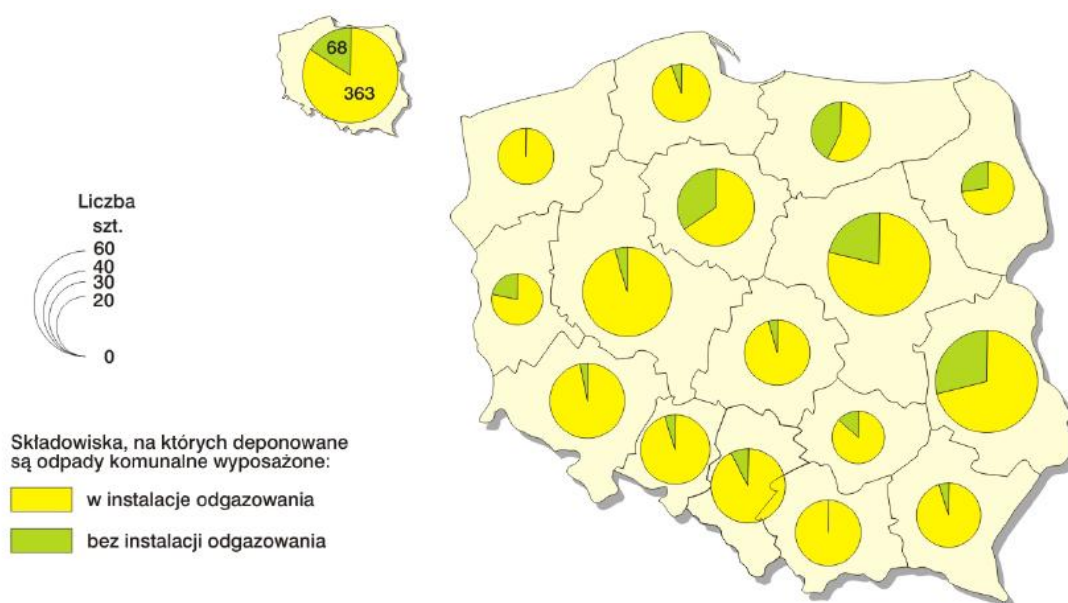
Od 2005 roku, w Polsce, systematycznie spada liczba składowisk z około 1000 sztuk do 431 funkcjonujących w 2013 roku (Rys. 8).



Rysunek 8. Składowiska czynne w latach 2005-2013

Źródło: [2]

Odgazowywanie jest procesem wymaganym przez prawo Unii Europejskiej [7]. Biogaz powinien być ujmowany z każdego składowiska, na którym umieszczono odpady biodegradowalne. Ujęty gaz musi być poddany obróbce i wykorzystaniu, a jeśli jego ilość jest zbyt mała dla efektywnej produkcji energii, należy go unieszkodliwić, np. poprzez spalanie w palnikach lub pochodniach. W 2013 r., w Polsce, na 363 składowiska z instalacjami służącymi do odgazowywania, 55% stanowiły takie, gdzie ujmowany gaz składowiskowy uchodził bezpośrednio do atmosfery (Rys. 9) [2].



Rysunek 9. Odgazowywanie składowisk odpadów w 2013 r.

Źródło: [2]

4. Odzysk i wybrane metody unieszkodliwiania odpadów

Przez odzysk rozumie się proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym przypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygotowywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarce [1]. Odpady, których powstaniu nie udało się zapobiec, posiadacz odpadów w pierwszej kolejności jest obowiązany poddać odzyskowi.

Maksymalizacja odzysku wymaga między innymi [13]:

- zapewnienia, że odpowiednia przepustowość instalacji będzie dostępna, aby przetworzyć wszystkie selektywnie zebrane odpady, poprzez monitorowanie zrealizowanych i planowanych inwestycji,
- stymulowania rozwoju rynku surowców wtórnych i produktów zawierających surowce wtórne poprzez wspieranie współpracy organizacji odzysku, przemysłu i samorządu terytorialnego oraz konsekwentne egzekwowanie obowiązków w zakresie odzysku i recyklingu,
- promowania produktów wytwarzanych z materiałów odpadowych poprzez odpowiednie działania promocyjne i edukacyjne, jak również zamówienia publiczne.

W celu właściwego zagospodarowania odpadów ważna jest ich właściwa segregacja. Strumień odpadów należy podzielić na następujące kategorie: odpady podlegające biodegradacji, niepodlegające biodegradacji, niebezpieczne oraz wielkogabarytowe i

budowlane [18]. Dyrektywa składowiskowa zawiera przepisy mające na celu zapewnienie, że odpady w większym stopniu będą wykorzystywane (zamiast składowane) [1]. Składowanie niektórych odpadów (np. płynnych, niektórych odpadów niebezpiecznych) jest niedopuszczalne, natomiast składowanie odpadów podlegających biodegradacji powinno być stopniowo ograniczane. Odpady ulegające biodegradacji to odpady podlegające tlenowemu lub beztlenowemu rozkładowi, takie jak resztki pożywienia, odpady roślinne, papier i tektura.

Podstawowymi formami zagospodarowania odpadów są [1]:

- Recykling rozumie się przez to odzysk, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach; obejmuje to ponowne przetwarzanie materiału organicznego (recykling organiczny), ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do celów wypełniania wyrobisk [1].
- Termiczne przekształcanie odpadów czyli spalanie odpadów przez ich utlenianie lub inne procesy termicznego przetwarzania odpadów, w tym pirolizę, zgazowanie i proces plazmowy, o ile substancje powstające podczas tych procesów są następnie spalane. Spalanie to proces termiczny przebiegający powyżej temperatury zapłonu substancji organicznych przy określonym nadmiarze tlenu. Spalarnia to zakład lub jego część przeznaczona do termicznego przekształcania odpadów z odzyskiem lub bez odzysku wytwarzanej energii cieplnej, obejmujące instalacje i urządzenia służące do prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów wraz z oczyszczaniem gazów odlotowych i wprowadzaniem ich do atmosfery, kontrolą, sterowaniem i monitorowaniem procesów oraz instalacjami związanymi z przyjmowaniem, wstępnym przetwarzaniem i magazynowaniem odpadów dostarczonych do termicznego przekształcania oraz instalacjami związanymi z magazynowaniem i przetwarzaniem substancji otrzymanych w wyniku spalania i oczyszczania gazów odlotowych [1]. Współspalarnia natomiast to zakład lub jego część, których głównym przedmiotem działalności jest wytwarzanie energii lub produktów, w których wraz z paliwami są przekształcane termicznie odpady w celu odzyskania zawartej w nich energii lub w celu ich unieszkodliwiania, obejmujące instalacje i urządzenia służące do prowadzenia procesu termicznego przekształcania wraz z oczyszczaniem gazów odlotowych i wprowadzaniem ich do atmosfery, kontrolą, sterowaniem i monitorowaniem procesów, instalacjami związanymi z przyjmowaniem, wstępnym przetwarzaniem i magazynowaniem odpadów dostarczonych do termicznego przekształcania oraz instalacjami związanymi z magazynowaniem i przetwarzaniem substancji otrzymanych w wyniku spalania i oczyszczania gazów odlotowych) [1].

- Składowanie odpadów może odbywać się wyłącznie w miejscu do tego wyznaczonym czyli na składowisku odpadów. Niekiedy w tym samym miejscu prowadzi się też selekcję i częściowy odzysk surowców wtórnych. Właścicielem składowiska jest zazwyczaj miejscowy samorząd terytorialny [1].

Jednym z zasadniczych kierunków działań jest intensywny wzrost zastosowania zarówno biologicznych, jak i termicznych metod przekształcania zmieszanych odpadów komunalnych. Ograniczenie składowania odpadów ulegających biodegradacji związane jest z koniecznością budowy linii technologicznych do ich przetwarzania, a mianowicie [5]:

- kompostowni odpadów organicznych,
- instalacji fermentacji odpadów organicznych,
- instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych,
- zakładów termicznego przekształcania zmieszanych odpadów komunalnych.

Osiągnięcie zakładanych celów w zakresie gospodarki odpadami komunalnymi ulegającymi biodegradacji wymaga realizacji następujących działań [6]:

- promowania i wspierania selektywnego zbierania odpadów oraz kompostowania odpadów z gospodarstw domowych i zielonych na obszarach wiejskich, podmiejskich i peryferyjnych miast, poprzez edukację ekologiczną, finansowanie lub współfinansowanie zakupu przydomowych kompostowników,
- budowy kompostowni odpadów zielonych z parków i ogrodów,
- budowy regionalnych instalacji termicznego i mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych.

5. Cele gospodarki odpadowej

Gospodarkę odpadami należy prowadzić w sposób zapewniający ochronę życia i zdrowia ludzi oraz środowiska. Gospodarka odpadami nie może: 1) powodować zagrożenia dla wody, powietrza, gleby, roślin lub zwierząt; 2) powodować uciążliwości przez hałas lub zapach; 3) wywoływać niekorzystnych skutków dla terenów wiejskich lub miejsc o szczególnym znaczeniu, w tym kulturowym i przyrodniczym [1]. W gospodarce odpadami komunalnymi przyjęto następujące cele [3]:

- objęcie zorganizowanym systemem odbierania odpadów komunalnych 100% mieszkańców najpóźniej do 2015 r.,
- zapewnienie objęcia wszystkich mieszkańców systemem selektywnego zbierania odpadów najpóźniej do 2015 r.,

- zmniejszenie ilości odpadów komunalnych ulegających biodegradacji kierowanych na składowiska odpadów, aby do 2020 r. nie było składowanych więcej niż 35% masy tych odpadów wytworzonych w 1995 r.,
- przygotowanie do ponownego wykorzystania i recyklingu do 2020 roku minimum 50 % masy materiałów odpadowych, przynajmniej takich jak papier, metal, tworzywa sztuczne i szkło z gospodarstw domowych i w miarę możliwości odpadów innego pochodzenia podobnych do odpadów z gospodarstw domowych.

Zapobieganie powstawaniu odpadów jest priorytetem w ustanowionej w prawie wspólnotowym hierarchii postępowania z odpadami, stanowiąc jednocześnie cel, dla osiągnięcia którego kraje członkowskie Unii Europejskiej mają obowiązek podejmować odpowiednie działania. Osiągnięcie tego celu jest uzależnione od wielu czynników, które nie dotyczą bezpośrednio gospodarowania odpadami lecz powiązane są np. ze wzrostem gospodarczym, stopniem wdrażania przez przedsiębiorców najlepszych dostępnych technik (BAT), czy zamożnością społeczeństwa. Decyzje o zapobieganiu powstawaniu odpadów zapadają już na etapie fazy projektowej wyrobu, a także na etapie jego wytwarzania, użytkowania oraz są związane z ostatecznym zagospodarowaniem odpadów powstających z tych wyrobów po zakończonym ich cyklu życia. W związku z tym na szczeblu krajowym będą podejmowane przede wszystkim następujące działania [3]:

- wspieranie wprowadzania niskoodpadowych technologii produkcji oraz zapewniających wykorzystanie możliwie wszystkich składników stosowanych surowców,
- promowanie zarządzania środowiskowego,
- intensywna edukacja ekologiczna promująca zapobieganie powstawaniu odpadów,
- podniesienie stawek opłat za składowanie odpadów, a szczególnie zmieszanych odpadów komunalnych, odpadów ulegających biodegradacji oraz odpadów wcześniej nieprzetworzonych,
- objęcie 100% mieszkańców systemem selektywnego odbierania odpadów komunalnych,
- rozwój czystych technologii.

Dla osiągnięcia celów założonych w polityce ochrony środowiska, oddzielenia tendencji wzrostu ilości wytwarzanych odpadów i ich wpływu na środowisko od tendencji wzrostu gospodarczego kraju, wdrażania hierarchii sposobów postępowania z odpadami oraz zasady samowystarczalności i bliskości, a także utworzenia i utrzymania w kraju zintegrowanej i wystarczającej sieci instalacji gospodarowania odpadami, spełniających wymagania ochrony środowiska, opracowuje się plany gospodarki odpadami. Plany gospodarki odpadami są

opracowywane na poziomie krajowym i wojewódzkim. Plany gospodarki odpadami dotyczą odpadów wytworzonych na obszarze, dla którego jest sporządzany plan, oraz przywożonych na ten obszar, w tym odpadów komunalnych, odpadów ulegających biodegradacji, odpadów opakowaniowych i odpadów niebezpiecznych [1].

W zakresie kształtowania polityki gospodarki odpadami głównymi kierunkami działań są [8]:

- intensyfikacja edukacji ekologicznej promującej właściwe postępowanie z odpadami oraz prowadzenie skutecznej kampanii informacyjno-edukacyjnej w tym zakresie,
- wspieranie wdrażania efektywnych ekonomicznie i ekologicznie technologii odzysku i unieszkodliwiania odpadów, w tym technologii pozwalających na odzyskiwanie energii zawartej w odpadach w procesach termicznego i biochemicznego ich przekształcania,
- wzmocnienie kontroli podmiotów prowadzących działalność w zakresie zbierania, transportu, odzysku i unieszkodliwiania odpadów,
- wyeliminowanie praktyk niewłaściwej eksploatacji i rekultywacji składowisk odpadów.

Zgodnie z wytyczonymi celami w zakresie odzysku i recyklingu wymagane jest prowadzenie odpowiedniego systemu selektywnego zbierania i odbierania odpadów komunalnych. W aglomeracjach lub regionach obejmujących powyżej 300 tys. mieszkańców, określonych w wojewódzkich planach gospodarki odpadami, gdzie preferowaną metodą zagospodarowania odpadów komunalnych jest ich termiczne przekształcanie, selektywnie zbierane i odbierane powinny być [3]:

- odpady zielone z ogrodów i parków (pielęgnacji terenów miejskich),
- niezanieczyszczony papier i tektura (odpady opakowaniowe, gazety itd.),
- odpady opakowaniowe ze szkła w podziale na szkło bezbarwne i kolorowe,
- tworzywa sztuczne i metale,
- zużyte baterie i akumulatory,
- zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny,
- meble i inne odpady wielkogabarytowe,
- odpady budowlano – remontowe.

W przypadku składowisk innych niż niebezpieczne i obojętne, na których składowane są odpady komunalne, preferuje się obiekty obsługujące obszar zamieszkiwany co najmniej przez 150 tys. mieszkańców. Łączna wielkość składowisk (ich pojemność dyspozycyjna) w województwie powinna być wystarczająca, na co najmniej 15 lat eksploatacji. Przyjęto, że przy

transporcie odpadów na składowisko na odległość wynoszącą powyżej 30 km opłacalne jest zastosowanie przeładunkowego systemu transportu (dwustopniowego) [3].

Celem tworzenia długotrwałego krajowego planu gospodarki odpadami jest dojście do systemu gospodarki odpadami zgodnego z zasadą zrównoważonego rozwoju, w którym w pełni realizowane są zasady gospodarki odpadami, a szczególnie zasada postępowania z odpadami zgodnie z hierarchią, gdzie po pierwsze należy zapobiegać powstawaniu odpadów, a następnie kolejno przygotować je do ponownego użycia, recyklingu lub innych metod odzysku bądź unieszkodliwienia. Należy zaznaczyć, że najmniej pożądanym sposobem ich zagospodarowania jest składowanie. Realizacja tych zamierzeń umożliwi osiągnięcie następujących celów: ograniczenie składowania odpadów, ograniczenie zmian klimatu powodowanych przez gospodarkę odpadami czy też zwiększenie udziału w bilansie energetycznym kraju energii ze źródeł odnawialnych poprzez zastępowanie spalania paliw kopalnych spalaniem odpadów.

W związku z powyższym, uwzględniając politykę ekologiczną państwa, przyjęto następujące cele główne [6]:

- utrzymanie tendencji oddzielenia wzrostu ilości wytwarzanych odpadów od wzrostu gospodarczego kraju wyrażonego w PKB;
- zwiększenie udziału odzysku, w tym w szczególności odzysku energii z odpadów, zgodnego z wymogami ochrony środowiska;
- zmniejszenie ilości wszystkich odpadów kierowanych na składowiska odpadów,
- wyeliminowanie praktyki nielegalnego składowania odpadów,
- utworzenie i uruchomienie bazy danych o produktach, opakowaniach i gospodarce odpadami (BDO).

Od dnia 1 lipca 2013 roku odpowiedzialność za gospodarkę odpadami komunalnymi przejmują gminy. Gminy, we współpracy z przedsiębiorcami, są odpowiedzialne za organizację odbioru, transportu i zagospodarowania odpadów komunalnych. Gminy są także odpowiedzialne za osiągnięcie nakazanych ustawowo celów ekologicznych w zakresie zagospodarowania odpadów komunalnych. Koszty gospodarki odpadami komunalnymi ponoszą ich wytwórcy, którzy uiszczają na rzecz gmin opłatę za gospodarowanie odpadami komunalnymi. Zasady gospodarki odpadami są regulowane przepisami rangi ustawowej oraz przepisami prawa miejscowego.

Do dnia 31 grudnia 2020 roku założono do osiągnięcia następujące docelowe poziomy odzysku i recyklingu odpadów komunalnych [3]:

- poziom recyklingu i przygotowania do ponownego użycia papieru, metali, tworzyw sztucznych i szkła w wysokości - co najmniej 50% wagowo,
- poziom recyklingu, przygotowania do ponownego użycia i odzysku innymi metodami innych niż niebezpieczne odpadów budowlanych i rozbiórkowych w wysokości co najmniej - 70% wagowo.

6. Posumowanie

Właściwa gospodarka odpadami jest jednym z najważniejszych elementów kompleksowej ochrony środowiska. Na przestrzeni ostatnich kilku lat zaobserwowano ustabilizowanie się ilości zbieranych odpadów. Może to być spowodowane wieloma czynnikami. Z jednej strony, może to wynikać z masowej emigracji, kryzysu finansowo-ekonomicznego i z niewłaściwych praktyk gospodarowania odpadami komunalnymi. Z drugiej strony, może to być efekt świadomie podejmowanych działań wzmocnionych przez edukację ekologiczną mających na celu zapobieganiu powstawania odpadów. Zapewne również podniesienie opłat za odbieranie odpadów komunalnych od właścicieli nieruchomości, spowodowane zwiększeniem opłat za składowanie odpadów w konsekwencji wpłynęło na bardziej proekologiczne zachowania konsumentów.

Zapobieganie powstawaniu odpadów jest priorytetem w ustanowionej w prawie wspólnotowym hierarchii postępowania z odpadami, stanowiąc jednocześnie cel, dla osiągnięcia którego kraje członkowskie Unii Europejskiej mają obowiązek podejmować odpowiednie działania.

Z przedstawionych danych wynika, że zmniejszyła się ilość odpadów wytworzonych z 12 084,5 tys. w roku 2012 do 11 294,9 tys. ton w 2013 roku. W 2012 roku na jednego mieszkańca Polski przypadało 314 kg wytworzonych odpadów komunalnych, a w 2013 roku o 21 kg mniej. W 2013 roku odnotowano wzrost udziału odpadów zebranych selektywnie w ogólnej ilości zebranych odpadów komunalnych z 10,5% w 2012 roku do 13,5% w 2013 roku.

Spadek ilości wytwarzanych odpadów oraz zwiększenie selektywnej zbiórki odpadów komunalnych sugerują pozytywny wpływ wprowadzonej nowej ustawy o odpadach na stan gospodarki odpadami w kraju.

Literatura:

1. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013, poz. 21).
2. *Infrastruktura komunalna w 2013 r.* GUS, Warszawa 2014.

3. *Ochrona środowiska 2013*, GUS, Warszawa 2014.
4. <http://www.komunalny.pl/index.php?name=article&op=show&id=7121>.
5. *Zarządzanie gospodarką odpadami. Budowa gminnych systemów*. B. Kozłowska (red.), PZiTS, Poznań 2012.
6. *Kompleksowe zarządzanie gospodarką odpadami*. T. Marcinkowski (red.), t. 1., PZiTS, Poznań 2011.
7. *Zarządzanie gospodarką odpadami*, P. Manczarski (red.), Poznań 2013.
8. *Zarządzanie gospodarką odpadami. Nowe regulacje prawne*. Z. Grabowski (red.), Poznań 2012.
9. *Siódmy unijny program działań w zakresie środowiska do 2020 r. (w:) Zarządzanie gospodarką odpadami. Aktualne regulacje prawne*, M. Górski (red.), Poznań 2014.
10. *Nowe przepisy z zakresu ochrony środowiska i gospodarki odpadami z 2014 r., (w:) Zarządzanie gospodarką odpadami. Aktualne regulacje prawne*, M. Górski (red.), Poznań 2014.
11. *System planowania gospodarki odpadami w Polsce, (w:) Kompleksowe zarządzanie gospodarką odpadami*, P. Manczarski (red.), Poznań - Stare Jabłonki 2013.
12. <http://www.europa.eu.int/comm/environment/waste/index.htm>.
13. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy (tzw. dyrektywa ramowa o odpadach) (Dz. Urz. UE L 312 z 22.11.2008).
14. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (tzw. dyrektywa WEEE) (Dz. U. UE L 197 z 24.07.2012).
15. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 94/62/WE z dnia 20 grudnia 1994 r. w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych (tzw. dyrektywa opakowaniowa) (Dz. Urz. WE L 365 z 31.12.1994, z późn. zm.).
16. <http://www.municipalwasteeurope.eu/summary-current-eu-waste-legislation>.
17. Myszograj S.: *Effects of the Solubilisation of the Cod of Municipal Waste in Thermal Disintegration*, Archives of Environmental Protection, Vol. 39, no. 2, 2013.
18. <http://www.ekologia.pl/wiedza/zanieczyszczenia/recykling-odzysk-surowcow-wtornych>.

mgr inż. Małgorzata E. Wysocka¹

Politechnika Białostocka Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Geotechniki

ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

e-mail: ¹m.wysocka@pb.edu.pl

Problemy hydrogeologiczne w lokalizacji składowisk odpadów

Słowa kluczowe: *składowisko odpadów, warunki hydrogeologiczne, piezometryczny poziom zwierciadła wody*

Streszczenie: Wytypowanie terenu pod składowisko odpadów nie jest prostym zadaniem, ponieważ z punktu widzenia środowiska przyrodniczego nie ma dobrej lokalizacji, dlatego też najważniejsze jest wybranie takiej, która ograniczy do minimum nieuniknione skutki ekologiczne.

Do niedawna w Polsce składowiska odpadów były lokalizowane, budowane i eksploatowane bez wyraźnych wytycznych. Obecnie aktem, który to porządkuje jest Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów. Określa ono między innymi, iż składowisko najlepiej jest sytuować tak, aby miało naturalną barierę geologiczną. Dla składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne minimalna jej miąższość nie powinna być mniejsza niż 1,0 m, a wartość współczynnika filtracji gruntu budującego naturalną barierę to $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s. Innym kryterium lokalizacji składowisk, jest to, aby przewidywany najwyższy piezometryczny poziom wód podziemnych był położony, co najmniej 1 m poniżej poziomu projektowanego wykopu dna składowiska. W pracy ostatnie kryterium poddaje się krytycznej analizie, której podstawą są wyniki badań własnych. Analizuje się, czym jest piezometryczny poziom wód podziemnych i jaki on ma wpływ na możliwe przenikanie potencjalnych zanieczyszczeń do wód podziemnych. Rozważania są przeprowadzone na przykładzie podłoża terenu, planowanego pod składowisko odpadów, dla którego wykonano badania niezbędne do określenia warunków hydrogeologicznych.

1. Wstęp

Każdy okres w dziejach Ziemi odznaczał się jakąś cechą odrębną np. trzeciorzęd charakteryzują osady morskie, a czwartorzęd osady polodowcowe. Wszystko, co się wtedy działo było związane tylko i wyłącznie z zachodzącymi w środowisku naturalnymi procesami. Okres zaś, w którym my żyjemy, z pewnością w dużej mierze będzie charakteryzował się niestety wytwarzanymi przez nas „odpadami”. Jest ich, co raz więcej i więcej. Jedną z metod ich unieszkodliwiania jest składowanie na powierzchni. Wytypowanie takiego terenu bez wątplenia nie jest prostym zadaniem, ponieważ z punktu widzenia środowiska przyrodniczego nie ma dobrej lokalizacji dla składowisk odpadów, dlatego też najważniejsze jest wybranie takiej, która ograniczy do minimum nieuniknione skutki ekologiczne.

Przez wiele lat w Polsce składowiska odpadów były lokalizowane, budowane i eksploatowane bez wyraźnych wytycznych i uregulowań prawnych. Bardzo często wysypiska lokowano w starych wyrobiskach, które były pozostałością po eksploatacji przede wszystkim

żwiru czy piasku, a więc nie było żadnych barier naturalnych, które miałyby charakter uszczelniający. Faktem jest, iż dopiero od kilkunastu lat w Polsce rozpoczęto działania w kierunku poprawy stanu gospodarki odpadowej, a w związku z tym Polska na tle Unii Europejskiej nie wypada najlepiej.

Pierwszym aktem prawnym dotyczącym zasad usuwania, wykorzystywania i unieszkodliwiania odpadów było Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 1998 r. [1]. Dotyczyło ono jedynie składowisk odpadów niebezpiecznych. Wcześniej, tj. w roku 1993, zostały wydane wytyczne Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa „Zbiór zaleceń do programowania, projektowania i eksploatacji wysypisk odpadów komunalnych” [2]. Jednak w rzeczywistości dopiero rozporządzenie z roku 2003 [3], które zostało znowelizowane w 2009 r. [4], uregulowało stan prawny w tym zakresie. Obecnie dokumentem prawnym, który określa szczegółowe wymagania dotyczące lokalizacji, budowy i prowadzenia składowisk odpadów, jakim odpowiadają poszczególne typy składowisk odpadów oraz zakres, czas i częstotliwość oraz sposób i warunki prowadzenia monitoringu składowiska odpadów jest Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów [5].

Celem pracy jest wskazanie elementów, które powinny być bezwzględnie wzięte pod uwagę podczas przygotowania projektu budowy bądź rozbudowy składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. Szczególną uwagę poświęcono tu warunkom gruntowo-wodnym, tj. warunkom geologicznym a przede wszystkim hydrogeologicznym.

2. Lokalizacja składowisk a warunki gruntowo-wodne w świetle prawa

Odpady zdeponowane w miejscu składowania, w zależności od ich składu chemicznego i mineralnego, podlegają w wyniku reakcji z elementami środowiska różnym przeobrażeniom, co powoduje powstanie kolejnych, wtórnych zanieczyszczeń [6]. Powstałe niebezpieczne substancje migrują poza teren składowiska, wnikając w grunt podścielający składowisko, a następnie przedostając się do warstw wodonośnych.

Racjonalny wybór miejsca lokalizacji składowiska jest procesem dość złożonym i powinien przebiegać według określonych procedur, uwzględniających wszystkie elementy środowiska i zagospodarowania terenu. Szczególnie w procesach tych powinno być uwzględnione środowisko geologiczne, gdyż bezpośrednio na nim, jako podłożu są lokalizowane odpady [7].

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów [5] określa szczegółowe wymagania dotyczące lokalizacji, budowy i prowadzenia

składowisk odpadów, jakim odpowiadają poszczególne typy składowisk odpadów, precyzuje również zakres, czas i częstotliwość oraz sposób i warunki prowadzenia monitoringu składowiska odpadów, w jaki sposób powinny być prowadzone badania geologiczne i warunki pozwalające na budowę składowiska w danym miejscu. Rozporządzenie narzuca zakres badań geologicznych, który powinien być wykonany, tj.:

- rozpoznanie budowy geologicznej terenu planowanego składowiska odpadów i jego otoczenia na podstawie, co najmniej pięciu otworów badawczych o głębokości wystarczającej do zbadania warstwy wodonośnej i warstwy izolującej, z tym, że minimalna ilość rdzeniowanych otworów badawczych powinna wynosić jeden otwór na 1 ha badanego terenu;
- pobranie próbek oraz wykonanie analizy uziarnienia oraz laboratoryjnego oznaczenia współczynnika filtracji k z każdej warstwy stanowiącej wydzielenie litologiczne;
- przeprowadzenie obserwacji hydrogeologicznych oraz wykonanie połowych pomiarów współczynnika filtracji k w każdym otworze badawczym;
- zbadanie przestrzennej budowy górotworu w obszarze planowanego składowiska odpadów i jego otoczenia za pomocą metod geofizycznych, w szczególności metodą elektrooporową lub metodą sejsmiczną;
- ustalenie pojemności sorpcyjnej gruntu.

Treść rozporządzenia mówi również o tym, iż:

- składowisko odpadów lokalizuje się tak, aby miało naturalną barierę geologiczną, uszczelniającą podłoże i ściany boczne;
- minimalna miąższość i wartość współczynnika filtracji k naturalnej bariery geologicznej dla składowiska odpadów wynosi:
 - niebezpiecznych – miąższość nie mniejsza niż 5 m, współczynnik filtracji $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s;
 - innych niż niebezpieczne i obojętne – miąższość nie mniejsza niż 1 m, współczynnik filtracji $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s;
 - obojętnych – miąższość nie mniejsza niż 1 m, współczynnik filtracji $k \leq 1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s,
- bariera geologiczna powinna mieć rozciągłość poziomą przekraczającą obszar projektowanego składowiska odpadów;
- przewidywany najwyższy piezometryczny poziom wód podziemnych powinien być co najmniej 1 m poniżej poziomu projektowanego wykopu dna składowiska.

Dodatkowo, rozporządzenia do Ustawy Prawo Geologiczne i Górnicze [8], dotyczące projektów robót geologicznych [9] i sporządzania dokumentacji hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich [10], narzucają rodzaj badań i robót geologicznych, które powinny być wykonane w rejonie terenu, w obrębie, którego ma powstać składowisko odpadów. Podstawą jest wykonanie wierceń (ich liczba uzależniona jest od wielkości składowiska odpadów), które mają za zadanie przybliżyć budowę geologiczną terenu. Ich głębokość powinna być wystarczająca do zbadania warstwy wodonośnej i warstwy izolującej. Do dokładnej analizy terenu badań istotnym jest też posłużenie się otworami archiwalnymi w pobliżu projektowanej inwestycji, jak również mapami topograficznymi, geologicznymi i hydrogeologicznymi. Podczas wykonywania otworów wiertniczych należy pobrać próby gruntu do wykonania analizy uziarnienia oraz laboratoryjnego oznaczenia współczynnika filtracji k z każdej warstwy stanowiącej wydzielenie litologiczne. Bada się także pojemność sorpcyjną gruntu. Należy również przeprowadzić obserwacje hydrogeologiczne i wykonać polowe pomiary współczynnika filtracji dla warstw wodonośnych. Przy skomplikowanych warunkach geologicznych dodatkowo wykonuje się rozpoznanie budowy górotworu metodami geofizycznymi, a w szczególności metodą elektrooporową lub sejsmiczną.

W warunkach naturalnych trudno jest znaleźć obszar, który spełniałby wszystkie zalecenia odnośnie budowy geologicznej. Jednak z pewnością można stwierdzić, iż są rejony o lepszych lub gorszych uwarunkowaniach. Najważniejszym jest wybranie takiej lokalizacji, która ograniczy do minimum nieuniknione skutki ekologiczne, jak również wielkość nakładów ponoszonych na takie urządzenie składowisk, aby jego wpływ na środowisko był jak najmniejszy [11].

Uwzględniając kryteria geologiczne można wydzielić obszary, na których budowa składowisk jest [7]:

- I — **niewskazana**, a dla składowisk odpadów niebezpiecznych niedopuszczalna,
- II — **możliwa z ograniczeniami** z wyjątkiem składowisk odpadów niebezpiecznych,
- III — **korzystna** dla wszystkich typów składowisk.

Na warunki w grupie I wpływają:

- ujęcia wody,
- obszary mis jeziornych,
- doliny rzeczne,
- płytko położone zwierciadło wody gruntowej,
- gleby klasy bonitacyjnej I – III,
- obszary czynnych procesów geodynamicznych (osuwiska, czynny kras),

- obszary eksploatacji górniczej, na których występują odkształcenia nieciągłe powierzchni terenu.

Tereny, gdzie ze względów geologicznych możliwe jest składowanie odpadów, lecz z ograniczeniami wymagającymi zastosowania odpowiednich rozwiązań technicznych i szeroko zakrojonych badań:

- strefy, w których lokalizacja składowiska stwarza zagrożenia dla GZWP (Główne Zbiorniki Wód Podziemnych) i UZWP (Użytkowe Zbiorniki Wód Podziemnych),
- obszary eksploatacji górniczej, na których występują odkształcenia ciągle powierzchni terenu,
- obszary o nachyleniu stoku $> 15^\circ$,
- obszary zaburzone glacytektonicznie.

Za obszary korzystne należy uznać takie, które pozwalają w sposób optymalny wykorzystać właściwości izolacyjne podłoża i jego nośność.

W obrębie obszarów II i III należy dążyć, aby składowisko lokować:

- w obszarach zdegradowanych,
- obszarach przylegających do istniejących składowisk,
- wykorzystać istniejące wyrobiska poeksploatacyjne.

Reasumując, składowiska odpadów, powinny być lokalizowane w miejscach, gdzie ich negatywny wpływ na warunki gruntowo-wodne będzie jak najmniejszy. Najlepszymi terenami pod względem budowy geologicznej byłyby, więc obszary gdzie warstwa wodonośna zalega głęboko, a ponad nią występują utwory słabo lub praktycznie nieprzepuszczalne w postaci gruntów spoistych. Taka sytuacja geologiczna i dodatkowo wykonana bariera sztuczna byłyby czynnikami w bardzo dużym stopniu minimalizującymi wpływ składowanych odpadów na środowisko, a przede wszystkim wody podziemne.

3. Podłoże analizowanego składowiska odpadów

Przedmiotem badań jest wyrobisko po eksploatacji złoża ilów. Teren ten jest już wyłączony z działalności górniczej i w planach ma zostać w części zrehabilitowany poprzez wypełnienie go odpadami dopuszczonymi do stosowania Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 21 marca 2006 r. w sprawie odzysku lub unieszkodliwiania odpadów poza instalacjami i urządzeniami [12], zaś w pozostałej części przewiduje się inwestycję polegającą na budowie składowiska odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne.

W związku z powyższym, zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko §2 ust. 1 pkt

47 [13] omawiane wyrobisko w obrębie, którego planuje się gromadzenie odpadów zostanie zaliczone do przedsięwzięć mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko, co dyktuje wykonanie kolejnych działań zmierzających do określenia warunków geologicznych, jak również monitorowania wód podziemnych za pomocą otworów badawczych – piezometrów.

3.1. Monitoring wód podziemnych w obrębie składowiska odpadów

Składowiska odpadów, podczas ich eksploatacji i jeszcze przez lata po jej zakończeniu, stanowią potencjalne ogniska zanieczyszczeń. Zgodnie z wytycznymi [5], składowiska odpadów powinny być objęte kontrolą wód podziemnych. Podczas eksploatacji poziom oraz skład wód podziemnych należy kontrolować, co 3 miesiące. W fazie poeksploatacyjnej, tzn. po zamknięciu składowiska, pomiary należy wykonywać, co 6 miesięcy przez kolejne 30 lat, zaś w fazie przedeksploatacyjnej pomiar należy wykonać jednorazowo w celu poznania tła hydrogeochemicznego, które stanowi ocenę stanu wyjściowego. Próby wody do badań fizykochemicznych należy pobierać z otworów obserwacyjnych, tzw. piezometrów.

Według uregulowań prawnych przy monitoringu wód podziemnych konieczne jest istnienie, co najmniej 3 otworów (piezometrów), przy czym jeden piezometr musi znajdować się na dopływie oraz 2 na odpływie wód podziemnych z terenu objętego interpretacją.

W związku z powyższym w obrębie wyrobiska zostały odwiercone trzy piezometry zgodnie z wyżej wymienionymi wytycznymi. Wykonane analizy wody, stanowić będą tło hydrogeochemiczne – czyli bazę wyjściową (faza przedeksploatacyjna) dla monitoringu wód podziemnych.

Według rozporządzenia oznaczane winny być następujące wskaźniki:

- odczyn pH,
- przewodność elektrolityczna właściwa,
- ogólny węgiel organiczny (OWO),
- metale (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg),
- suma wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA).

Monitoring jakości wody z pierwszej warstwy wodonośnej pozwoli na kontrolę jej stanu i w przypadku zanieczyszczenia szybkie rozpoczęcie działań remediacyjnych, które nie pozwolą na przenikanie zanieczyszczeń do warstwy o podstawowym znaczeniu eksploatacyjnym.

3.2. Zarys budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych w miejscu lokalizacji projektowanego składowiska

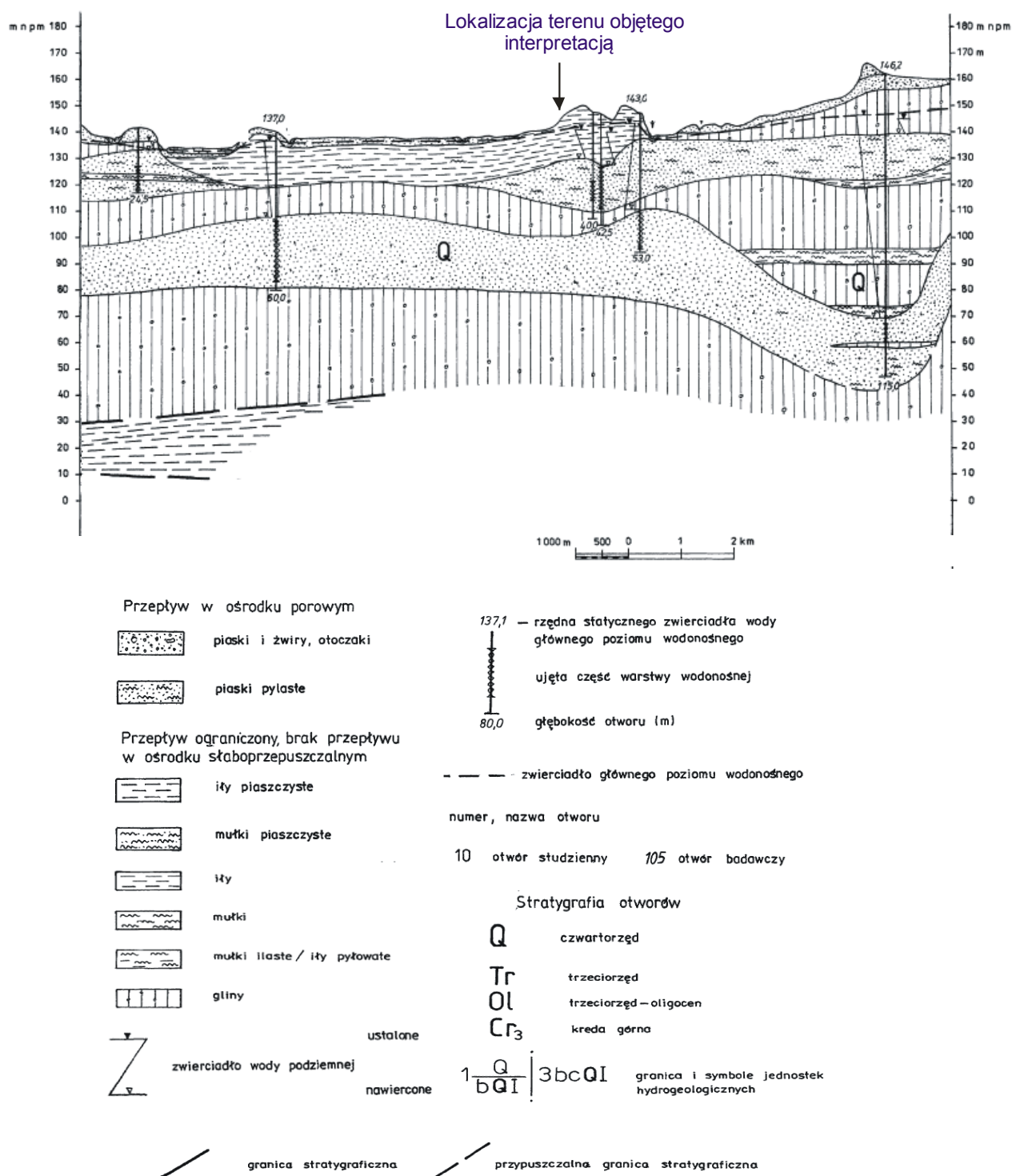
Opis budowy geologicznej oraz warunków hydrogeologicznych opiniowanego terenu został przedstawiony w oparciu o:

- sieć otworów badawczych wykonanych na badanym terenie (otwory archiwalne oraz wykonane na potrzeby wykonania dokumentacji hydrogeologicznej);
- przekroje hydrogeologiczne opracowane na podstawie istniejących otworów badawczych oraz na podstawie otworów studziennych wykonanych w rejonie opiniowanego terenu;
- mapę Hydrogeologiczną Polski w skali 1 : 50 000;
- mapę Geologiczno – Gospodarczą w skali 1 : 50 000;
- dokumentacje i opracowania geologiczne wykonane w rejonie badań;
- wizję lokalną.

Stratygraficznie na obszarze badań pod względem litologicznym występujące utwory zaliczane są do czwartorzędu, którego miąższość na badanym terenie szacowana jest na ok. 100 – 150 m (według Państwowego Instytutu Geologicznego). Budowa geologiczna utworów czwartorzędowych w rejonie badań została ukształtowana w okresie zlodowacenia środkowopolskiego i związana jest z działalnością denudacyjną, erozyjną i akumulacyjną zachodzącą w czasie kolejnych transgresji i regresji lądolodu skandynawskiego.

Na badanym terenie od powierzchni przeważa zalegająca seria utworów zastoiskowych w postaci ilów, ilów warwowych i pylastych, które zostały osadzone w rozległym zastoisku powstałym w okresie zlodowacenia środkowopolskiego.

Seria złożowych ilów sięga do głębokości kilkunastu metrów poniżej powierzchni terenu. Pod warstwą ilów zalegają głównie piaski pylaste, tworzące pierwszy poziom wodonośny, którego spąg występuje na głębokości ok. 35 m. Poniżej zalegają grunty spoiste w postaci glin i pyłów zwartych o miąższości ok. 8,0 m, poniżej których występuje kolejna warstwa wodonośna w postaci utworów piaszczystych i żwirowych różnej granulacji. Warstwa ta kończy się na głębokości ok. 60 – 70 m n.p.m., poniżej której występuje kompleks glin zwałowych. Rozpoznanie do takiej głębokości uznaje się za wystarczające na potrzeby niniejszego opracowania. Na rysunku 1 przedstawiono przekrój hydrogeologiczny obrazujący sposób zalegania warstw geologicznych.



Rysunek 1. Przekrój hydrogeologiczny rejonu badań

Źródło: Objasnienia do Mapy Hydrogeologicznej Polski w skali 1: 50 000

Na podstawie Mapy Hydrogeologicznej Polski w skali 1 : 50 000, omawiany teren leży w granicach jednostki hydrogeologicznej w obrębie której występują dwa użytkowe poziomy wodonośne, tj. podrzędny i główny.

Poziom podrzędny występuje bezpośrednio pod serią zastoiskowych osadów. Poziom ten ma charakter nieregularny, nieciągły – w obrębie badanego wyrobiska wyklinowuje się przechodząc w osady zastoiskowe. W rejonie badań warstwa ta ma charakter marginalny – ujmowana jest przez 2 studnie głębinowe (woda wykorzystywana jedynie na potrzeby zakładowe). Zwierciadło wody ma charakter naporowy i stabilizuje się na rzędnej ok. 139,24 – 144,79 m n.p.m.

Poziom główny, o miąższości 25 m, na analizowanym terenie występuje na głębokości ok. 45 m. Zwierciadło wody stabilizuje się na rzędnej ok. 143 m n.p.m, co wskazuje na to, że poziom ten może mieć połączenie hydrauliczne z poziomem wyżej zalegającym, tj. poziomem „podrzednym”. Warstwa ta eksploatowana jest przez studnie ujęcia wodociągowego.

Zasilanie obu warstw odbywa się głównie na drodze dopływu podziemnego – lateralnego, jak również w bardzo niewielkim stopniu poprzez przesiąkanie wód opadowych przez nadkład utworów słabo przepuszczalnych. Według mapy hydrogeologicznej poziomy te cechują się bardzo niskim stopniem zagrożenia.

Nadległa warstwa utworów niespoistych – słabo przepuszczalnych – chroni w znacznym stopniu poziomy wodonośne przed przenikaniem do nich potencjalnych zanieczyszczeń.

Analizowany teren zgodnie z danymi zamieszczonymi w opracowaniu Mapa obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony w skali 1 : 500 000 [14] znajduje się poza granicami wyznaczonych GZWP (teren składowiska nie leży w obrębie stref ochronnych ujęć wód podziemnych i powierzchniowych oraz obszarów szczególnej ochrony ONO (Obszary Najwyższej Ochrony) i OWO (Obszary Wysokiej Ochrony) Głównych Zbiorników Wód Podziemnych w Polsce).

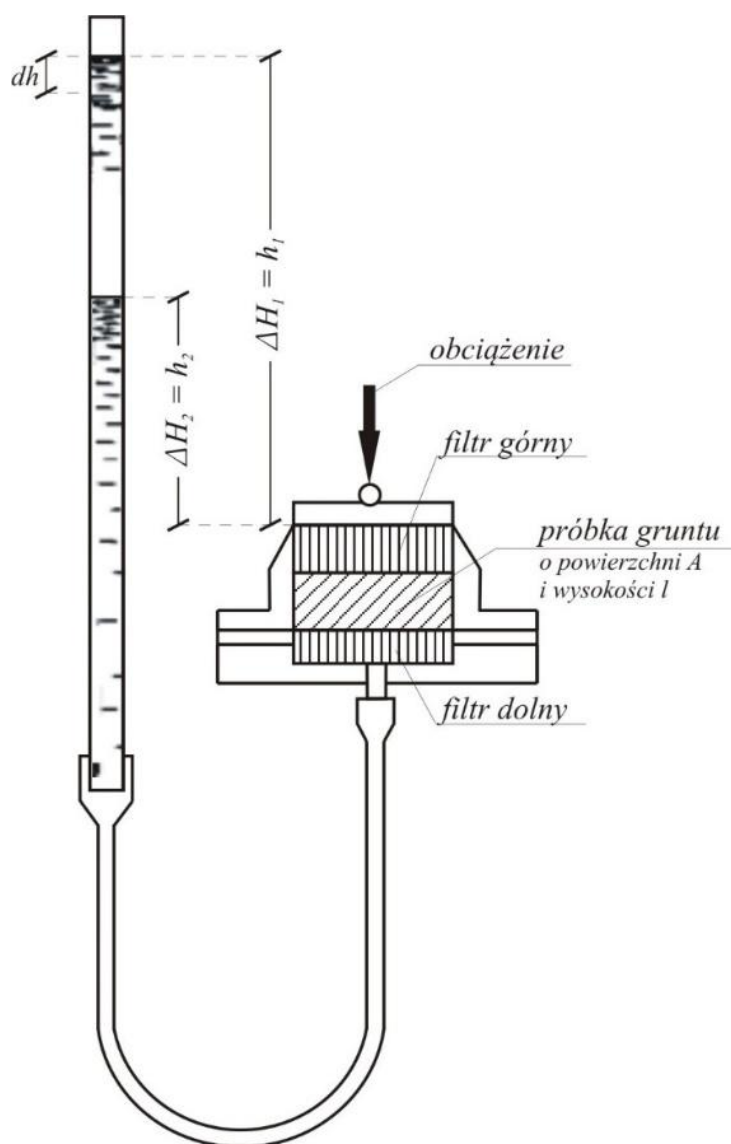
4. Wykonane badania

W rejonie wyrobiska wykonano 5 otworów badawczych, w celu rozpoznania budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych. Podczas wiercenia pobierano próby do opisu makroskopowego i do wykonania badań laboratoryjnych. Celem badań laboratoryjnych było określenie współczynnika filtracji każdej warstwy stanowiącej wydzielenie litologiczne. W analizie skupiono się szczególnie na gruntach, które mają stanowić uszczelnienie podstawy składowiska. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych reprezentatywnej próby gruntu.

4.1. Metodyka badań

4.1.1. Laboratoryjne określenie współczynnika filtracji gruntów podścielających projektowane składowisko

Badania współczynnika filtracji k wykonano metodą klasyczną w odpowiednio dostosowanych edometrach [15], przy zmiennym spadku hydraulicznym $i = \frac{\Delta h}{l}$. Stosuje się w tym przypadku wąską rurkę szklaną o polu przekroju a , połączoną z edometrem przewodem gumowym, co umożliwi obserwowanie w rurce w czasie $t = t_2 - t_1$ wyraźnego opadania wody od poziomu h_1 do poziomu h_2 . Schemat stanowiska badawczego przedstawiono jest na rysunku 2.



Rysunek 2. Oznaczanie współczynnika wodoprzepuszczalności w edometrze

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Wiłun, 1987)

Współczynnik filtracji k podaje się w cm/s lub w m/s. W przypadku badania w edometrze (przy zmiennym spadku hydraulicznym) współczynnik filtracji k oblicza się według wzoru:

$$k = \frac{a \cdot l}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

gdzie:

a – powierzchnia pola przekroju poziomego słupa wody wypełniającej rurkę szklaną [cm²],

l – wysokość próbki [cm],

A – powierzchnia pola przekroju poziomego próbki [cm²],

$(t_2 - t_1)$ – różnica czasu pomiędzy dwoma kolejnymi odczytami wysokości słupa wody w rurce szklanej [s],

h_1 – wysokość słupa wody podczas odczytu pierwszego [cm],

h_2 – wysokość słupa wody podczas odczytu drugiego [cm].

Otrzymane w ten sposób wartości k redukuje się na k_{10} w zależności od zmierzonych temperatur T przepływającej wody przy zastosowaniu wzoru:

$$k_{10} = \frac{k}{0,7 + 0,03T} \quad (2)$$

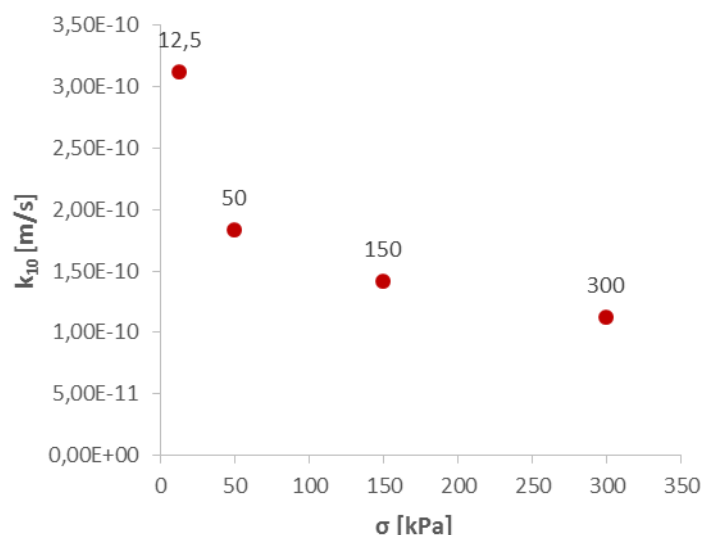
gdzie:

T – temperatura przepływającej wody [°C].

Badania filtracji przy drenażu pionowym (z dołu ku górze) przeprowadzono po konsolidacji próbek gruntu. Przepływów dokonano przy 4 naprężeniach σ równych: 12,5; 50,0; 150,0 i 300,0 kPa.

Należy zwrócić uwagę na konieczność wykonywania badań przy spadku większym od tak zwanego początkowego spadku i_0 . W gruntach spoistych pory są zwykle prawie całkowicie wypełnione wodą błonkową, w związku, z czym przy spadku hydraulicznym mniejszym od spadku początkowego i_0 woda nie przepływa przez grunt. Według Rozy [15] początkowe spadki hydrauliczne dla gruntów spoistych wynoszą więcej, niż 10, ale odnosi się to do gruntów w stanie twardoplastycznym lub półzwardym. W badaniach Wiłuna nie uzyskano tak dużych wartości i_0 , nie przekraczały one 5 dla skonsolidowanej gliny pylastej ciężkiej.

Na rysunku 3 i w tabeli 1 przedstawiono uzyskane wyniki z badania współczynnika filtracji dla reprezentatywnej próby gruntu.



Rysunek 3. Zależność współczynnika filtracji od obciążenia (il warwowy)

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 1. Wyniki badań współczynnika filtracji (il warwowy) metodą zmienno-gradientową w zależności od obciążenia

Zadane obciążenie σ	Współczynnik filtracji k_{10}
[kPa]	[m/s]
12,5	$3,12 \cdot 10^{-10}$
50,0	$1,83 \cdot 10^{-10}$
150,0	$1,41 \cdot 10^{-10}$
300,0	$1,12 \cdot 10^{-10}$

Źródło: Opracowanie własne

4.1.2. Określenie pojemności sorpcyjnej i całkowitej powierzchni właściwej

Wykonywanie oznaczeń wykonano normowo [16]. Oznaczenie pojemności sorpcyjnej MBC polega na określeniu adsorpcji błękitu metylenowego przez zawiesinę gruntową. Do zlewki z zawiesiną gruntową należy dodać z biurety porcjami po 0,5 lub 1,0 cm³ roztwór błękitu metylenowego, po czym całość każdorazowo mieszać 3 min za pomocą mieszadła. Następnie należy przenieść pipetką 1 – 2 krople zawiesiny na krążek bibuły do sączenia. Jeśli cała ilość dodawanego barwnika została zaadsorbowana przez grunt, to powstaje barwna plamka z bezbarwną otoczką wodną. W miarę dodawania kolejnych porcji roztworu barwnika, otoczka wykaże zabarwienie niebieskie. Wskazuje to, że zdolność sorpcyjna gruntu została już przekroczona, a w roztworze pojawił się wolny barwnik. Należy wówczas przerwać dodawanie roztworu, wznowiając je po upływie około 20 h. Jeśli po dodaniu określonej ilości roztworu

błękitu metylenowego stwierdzono po raz pierwszy zabarwienie otoczki, to pojemność sorpcyjną MBC należy obliczyć wg wzoru:

$$MBC = \frac{100m}{2m_s} (V_i + V_{i-1}) \quad (3)$$

gdzie:

m – masa błękitu metylenowego zawarta w 1 cm³, roztworu, w przeliczeniu na substancję 3-wodną [g],

m_s – masa gruntu użytego do oznaczania w przeliczeniu na substancję wysuszoną w temperaturze 105 – 110°C [g],

V_i – objętość roztworu, przy którym zdolność sorpcyjna została przekroczona [cm³],

V_{i-1} – objętość roztworu odpowiadająca przedostatniej porcji roztworu błękitu metylenowego przed przekroczeniem zdolności sorpcyjnej [cm³].

Całkowita powierzchnia właściwa gruntów S_t równa jest sumie rzutów powierzchni poszczególnych cząsteczek błękitu metylenowego, zaadsorbowanych przez grunt (w stanie wysycenia) w postaci warstwy jednocząsteczkowej. Powierzchnię właściwą należy odnieść do 1 g masy gruntu, wysuszonego do stałej masy w temperaturze 105 – 110°C, jako iloczyn pojemności sorpcyjnej MBC oraz współczynnika k₁.

Powierzchnię właściwą (S_t) obliczyć należy według wzoru:

$$S_t = k_1 MBC \quad (4)$$

gdzie:

k₁ – współczynnik, którego wartość należy przyjąć równą 20,94 m²/g,

MBC – pojemność sorpcyjna gruntu w stosunku do błękitu metylenowego według substancji 3-wodnej na 1 g suchej masy gruntu.

Wyniki badań pojemności sorpcyjnej i całkowitej powierzchni właściwej (il warwowy) przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań pojemności sorpcyjnej i całkowitej powierzchni właściwej (il warwowy)

Pojemność sorpcyjna gruntu MBC	Powierzchnia właściwa S _t
[g/100g]	[m ² /g]
6,1	127,1

Źródło: Opracowanie własne

4.1.3. Analiza wyników badań laboratoryjnych

Wyniki badań współczynnika filtracji gruntu, który to ma stanowić podłoże dla projektowanego składowiska wskazują, iż grunt ten ze względu na niską wartość współczynnika filtracji $k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s stanowić może naturalną barierę geologiczną według uregulowań prawnych [5]. Współczynnik filtracji gruntu podłoża, jakim jest ił warwowy, wynosi od $3,12 \cdot 10^{-10}$ do $1,12 \cdot 10^{-10}$ m/s, zatem grunt może być uznany za nieprzepuszczalny według klasyfikacji Pazdry [17]. Wartość współczynnika filtracji zmniejsza się wraz z obciążeniem gruntu.

Również wartość pojemności sorpcyjnej wskazuje na to, iż grunt ten będzie dobrym uszczelnieniem dla projektowanego składowiska, ponieważ wartość MCB wynosi 6,1 g/100g gruntu. Powierzchnia właściwa badanego gruntu podłoża wynosi 127,1 m²/g. Według Wojciechowskiego [18] powierzchnia właściwa kaolinitów wynosi od 0,01 do 30 m²/g.

Należy dodać, że grunt podłoża rozważanego składowiska został oceniony, jako przydatny gruntów do budowy mineralnych barier izolacyjnych składowisk odpadów w opracowaniu ITB [19].

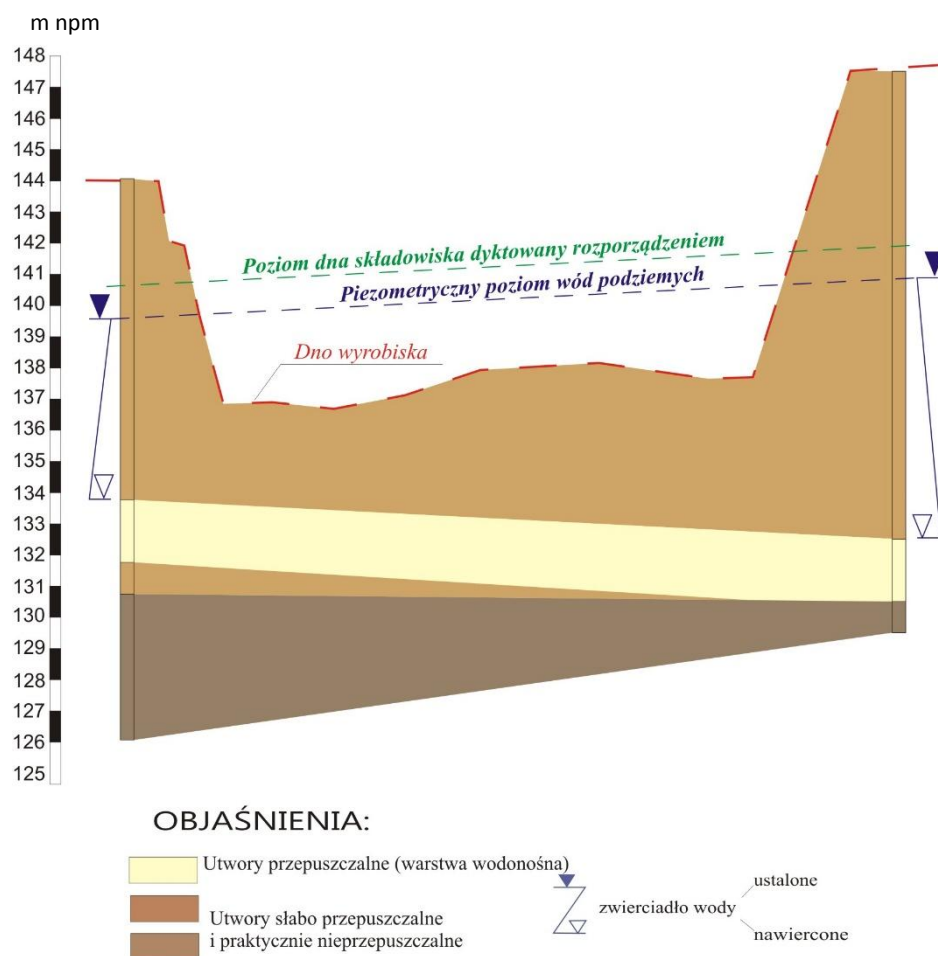
5. Piezometryczny poziom wód podziemnych a lokalizowanie składowiska odpadów

Ważnym kryterium lokalizacji składowisk, jest to, aby przewidywany najwyższy piezometryczny poziom wód podziemnych był położony, co najmniej 1 m poniżej poziomu projektowanego wykopu dna składowiska.

Poziom piezometryczny zwierciadła wody według Słownika hydrogeologicznego [20] to: *Poziom obserwowany w piezometrze lub w innym otworze umożliwiającym pomiar wysokości ciśnienia w określonym punkcie, również w warstwie o zwierciadle swobodnym.*

W obrębie wyrobiska, gdzie mają być składowane odpady, wykonano 3 piezometry, które wskazują na to, iż woda z pierwszej warstwy wodonośnej stabilizuje się na rzędnej 139,24 – 140,79 m n.p.m. Warstwa ta została nawiercona na rzędnych 128,34 – 133,9 m n.p.m.

Jeśli kierowano by się powyższym kryterium dno składowiska musiałoby być zaprojektowane na rzędnej ok. 142 m n.p.m., co jest przy aktualnym zagospodarowaniu terenu niemożliwe. Potencjalny teren pod składowisko jest wyrobiskiem poeksploatacyjnym, którego dno jest położone na rzędnej 136,0 m n.p.m. w najgłębszym miejscu (średnia głębokość wyrobiska znajduje się na rzędnej ok. 137 – 138 m n.p.m.). Powyższą sytuację przedstawiono na rysunku 4, przedstawiającym schematyczny przekrój hydrogeologiczny.



Rysunek 4. Schematyczny przekrój hydrogeologiczny przez wyrobisko poeksploatacyjne

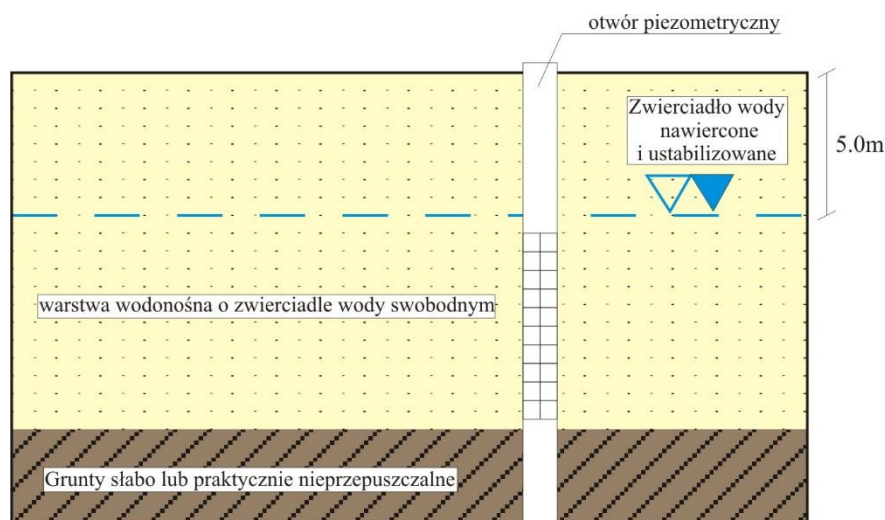
Źródło: Opracowanie własne

Po przeanalizowaniu warunków hydrogeologicznych oraz na podstawie wykonanych badań terenowych i laboratoryjnych uznaje się, że badany teren jest korzystny pod względem usytuowania składowiska odpadów. Jest to teren zdegradowany (wyrobisko poeksploatacyjne), posiada naturalną barierę geologiczną w postaci gruntów ilastych o niskim współczynniku filtracji mniejszym niż $1 \cdot 10^{-9}$ m/s oraz o bardzo małej podatności na pochłanianie zanieczyszczeń (pojemność sorpcyjna MCB = 6,1 g/100 g gruntu). Bariera jest ciągła i występuje również poza wyrobiskiem (rozległa niecka wypełniona utworami zastoiskowymi).

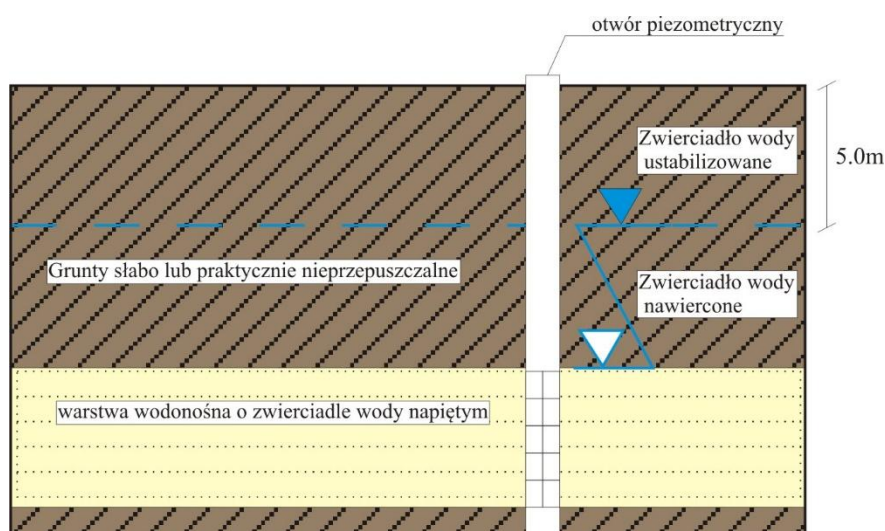
Na podstawie przedstawionych powyższych danych uznaje się, iż kryterium wskazane w rozporządzeniu [5], mówiące o piezometrycznym poziomie wód podziemnych budzi poważne zastrzeżenia. Powinno być ono doprecyzowane. Należałoby tu uwzględnić to, z jaką warstwą wodonośną ma się do czynienia, tj. czy to jest warstwa o zwierciadle wody swobodnym, czy jest to warstwa o zwierciadle naporowym. Na rysunku 5 przedstawiono

graficznie obraz sytuacji, gdzie piezometryczny poziom wód podziemnych jest taki sam, lecz związany z różnymi warstwami wodonośnymi.

a)



b)



Rysunek 5. Warstwy wodonośne: a) o zwierciadle wody swobodnym, b) o zwierciadle wody napiętym

Źródło: Opracowanie własne

Budowa geologiczna na obu schematach jest zupełnie inna. Na rysunku 5 a) przedstawiono budowę geologiczną terenu, na którym przypowierzchniowe utwory stanowią utwory przepuszczalne (tj. piaski lub żwiry), z którymi związane jest ich nawodnienie o zwierciadle wody swobodnym, tzn. takim, które nie jest ograniczone od góry warstwą nieprzepuszczalną i pozostaje pod ciśnieniem atmosferycznym. Zwierciadło to ustala się w otworze wiertniczym na głębokości, na której zostało nawiercone [17]. Zasilanie tej warstwy następuje głównie w wyniku infiltracji wód opadowych i jest ona narażona bezpośrednio na przenikanie zanieczyszczeń z powierzchni terenu. Z uwagi na możliwy kontakt z ewentualnymi

ogniskami zanieczyszczeń, np. w postaci składowanych odpadów, wymaga ona szczególnej ochrony. Takim zabezpieczeniem są sztucznie wykonane bariery, które nie dają jednak 100% gwarancji przed przeniknięciem zanieczyszczeń do warstwy wodonośnej. Żadna z obecnie stosowanych technologii eksploatacji nie zabezpiecza całkowicie otoczenia przed ujemnym oddziaływaniem składowanych odpadów [11].

W tej sytuacji uważa się, iż wykonanie składowiska jedynie 1 m powyżej zwierciadła wody, tak jak zalecono w rozporządzeniu [5] jest dość ryzykowne.

Schematyczny rysunek 5 b) przedstawia natomiast budowę geologiczną, gdzie przypowierzchniowe utwory stanowią grunty spoiste w postaci np. utworów gliniastych lub zastoiskowych o niskich współczynnikach filtracji, które izolują od powierzchni terenu warstwę wodonośną o napiętym zwierciadle wód. Definicja tego zwierciadła według Słownika Hydrogeologicznego [20] brzmi następująco – *jest to zwierciadło wód podziemnych ograniczone od góry warstwą nieprzepuszczalną i znajduje się pod ciśnieniem większym od atmosferycznego*. Warstwa wodonośna zasilana jest głównie w takiej sytuacji poprzez dopływ lateralny i niekiedy w niewielkim stopniu poprzez przesiąkanie przez nadległe warstwy, a więc nie ma bezpośredniego kontaktu z zanieczyszczeniami powierzchniowymi. Piezometryczny poziom wód w takiej warstwie powstaje dopiero w wyniku mechanicznego jej naruszenia, np. poprzez wykonany otwór wiertniczy. Przy takich warunkach hydrogeologicznych uważa się, iż sytuowanie składowiska powyżej 1 m powyżej piezometrycznego poziomu wód wydaje się nieprzemyślane. Tu zasadne byłoby sytuowanie ponad poziomem występowania stropu warstwy wodonośnej. Istnieją tereny, gdzie poziom wodonośny występuje dopiero na głębokości ok. 60 m poniżej powierzchni terenu i jest on odizolowany od powierzchni terenu utworami słabo- i praktycznie nieprzepuszczalnymi, a zwierciadło wody stabilizuje się w otworach wiertniczych blisko lub nawet powyżej powierzchni terenu. Biorąc pod uwagę taki obszar, kryterium o lokalizowaniu dna składowiska powyżej piezometrycznego zwierciadła wody jest nieadekwatne do warunków hydrogeologicznych, jakie tu panują.

6. Wnioski

1. Badany teren, tak jak dyktują to przepisy prawne odnośnie lokalizowania składowisk odpadów, posiada naturalną barierę geologiczną w postaci gruntów ilastych o niskim współczynniku filtracji mniejszym niż $1 \cdot 10^{-9}$ m/s oraz o bardzo małej podatności na pochłanianie zanieczyszczeń (pojemność sorpcyjna MCB = 6,1 g/100 g gruntu). Bariera jest ciągła i występuje również poza wyrobiskiem (rozległa niecka wypełniona utworami zastoiskowymi). Oceniany teren jest zdegradowany – jest to wyrobisko poeksploatacyjne.

Z uwagi na powyższe, jest to teren potencjalnie dogodny do sytuowania tu projektowanego składowiska odpadów mimo tego, iż piezometryczny poziom zwierciadła wody zalega na rzędnej wyższej niż dno wyrobiska.

2. Uregulowania prawne mówiące o piezometrycznym zwierciadle wody są niedoprecyzowane. Autorka uważa, że powinno być dodatkowo dopowiedziane, z jaką warstwą wodonośną jest ono związane: czy z warstwą o zwierciadle swobodnym, czy z naporowym.
3. W przypadku zwierciadła naporowego kryterium to powinno mówić o głębokości zalegania warstwy wodonośnej, a nie głębokości występowania piezometrycznego zwierciadła wody.
4. W przypadku zwierciadła swobodnego lokalizowanie składowiska jedynie 1 m powyżej jego zalegania wydaje się zbyt ryzykowne.
5. Wybieranie potencjalnych obszarów w obrębie, których można lokalizować składowiska odpadów pod względem budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych powinno być rozpatrywane zawsze indywidualnie – niestety przepisy prawne bardzo uschematyzowały ten aspekt.

Literatura:

1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 1998 r. w sprawie szczegółowych zasad usuwania, wykorzystywania i unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych (Dz. U. Nr 145, poz. 942).
2. Piotrowska H., Kwiatkowski-Blumhl J., Litwin B.: *Zbiór zaleceń do programowania, projektowania i eksploatacji wysypisk odpadów komunalnych MGPIB*. Wyd. OBREM, Łódź 1993.
3. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów. (Dz. U. Nr 61, poz. 549).
4. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 lutego 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów (Dz. U. Nr 39, poz. 320).
5. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (Dz. U. Nr 0 poz. 523).

6. Sobik-Szołtysek J., Bień J.B., Milczarek M.: *Analiza współczynnika filtracji w aspekcie możliwości stosowania alternatywnych materiałów do budowy barier izolacyjnych na składowiskach odpadów*. Rocznik Ochrony Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 15, 1393-1410, 2013.
7. Drągowski A.: *Geologiczne uwarunkowania optymalizacji składowania odpadów* Przegląd Geologiczny, vol. 50, nr 10/2, 2002.
8. Ustawa z dnia 9 czerwca 2011r „Prawo geologiczne i górnicze” (Dz. U. Nr 163, poz. 981).
9. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji (Dz. U. 2011 Nr 288 poz. 1696)
10. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Dz. U. Nr 2014 poz. 596).
11. Wiater J.: *Wpływ składowisk odpadów komunalnych na jakość wód podziemnych i właściwości gleb*. Inżynieria Ekologiczna, Nr 26, 133-145, 2011
12. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 marca 2006 r. w sprawie odzysku lub unieszkodliwiania odpadów poza instalacjami i urządzeniami (Dz. U. 2006 Nr 49 poz. 356).
13. Rozporządzenie Rady Ministrów z 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz. U. Nr 213 poz. 1397).
14. Kleczkowski A.S., *Mapa obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony*. 1990.
15. Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*. Wyd. Komunikacji i Łączności. Warszawa 2001.
16. PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
17. Pazdro Z., Kozerski B.: *Hydrogeologia ogólna*. PAE. Warszawa 1990.
18. Wojciechowski A. *Powierzchnia właściwa*. W: Metody badań gruntów spoistych. B. Grabowska-Olszewska (red.). Wyd. Geologiczne, Warszawa 1990.
19. *Zasady oceny przydatności gruntów spoistych Polski do budowy mineralnych barier izolacyjnych*. L. Wysokiński (red.). Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2007.
20. Kleczkowski A., Rózkowski A. *Słownik hydrogeologiczny*. Wyd. TRIO, Warszawa 1997.

mgr inż. Mariola Wasil¹

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Geotechniki
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok
e-mail: ¹m.wasil@doktoranci.pb.edu.pl

Odpady energetyczne i możliwość ich wykorzystania do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów

Słowa kluczowe: *popiół lotny, przewodność hydrauliczna, składowanie odpadów*

Streszczenie: Wykorzystanie ubocznych produktów spalania, jako zamiennika gruntów naturalnych, przynosi korzyści środowisku naturalnemu ze względu na zmniejszenie ilości składowisk. Coraz częściej odpady energetyczne poddawane są badaniom w celu określenia ich przydatności do ponownego zastosowania.

W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę jednego z ubocznych produktów spalania, jakim jest popiół lotny, a także możliwość jego wykorzystania do budowy warstw uszczelniających. Warstwy uszczelniające są bardzo istotnym elementem konstrukcji składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych. Zadaniem ich jest zapewnienie szczelności pozwalającej na ograniczenie negatywnego wpływu odpadów na środowisko naturalne. W celu określenia przydatności popiołu lotnego do wbudowywania w warstwy uszczelniające określa się, oprócz innych parametrów, przewodność hydrauliczną. Przewodność hydrauliczna jest zdolnością gruntu do przepuszczania cieczy systemem kanalików utworzonych przez pory gruntu. W pracy przedstawiono wyniki laboratoryjne badań nad przewodnością hydrauliczną popiołu lotnego. Próbkę do badań zagęszczano metodą standardową Proctora przy wilgotności optymalnej. Badania przewodności hydraulicznej zostały przeprowadzone w komorze konsolidacji hydraulicznej typu Rowe'a. Określano prędkość przepływu wody przy różnych wartościach naprężeń modelujących obciążenie warstwy uszczelniającej nadkładem odpadów i przy zróżnicowanym nasyceniu próbek wodą. Podjęto również próbę oszacowania przewodności hydraulicznej za pomocą wzorów empirycznych.

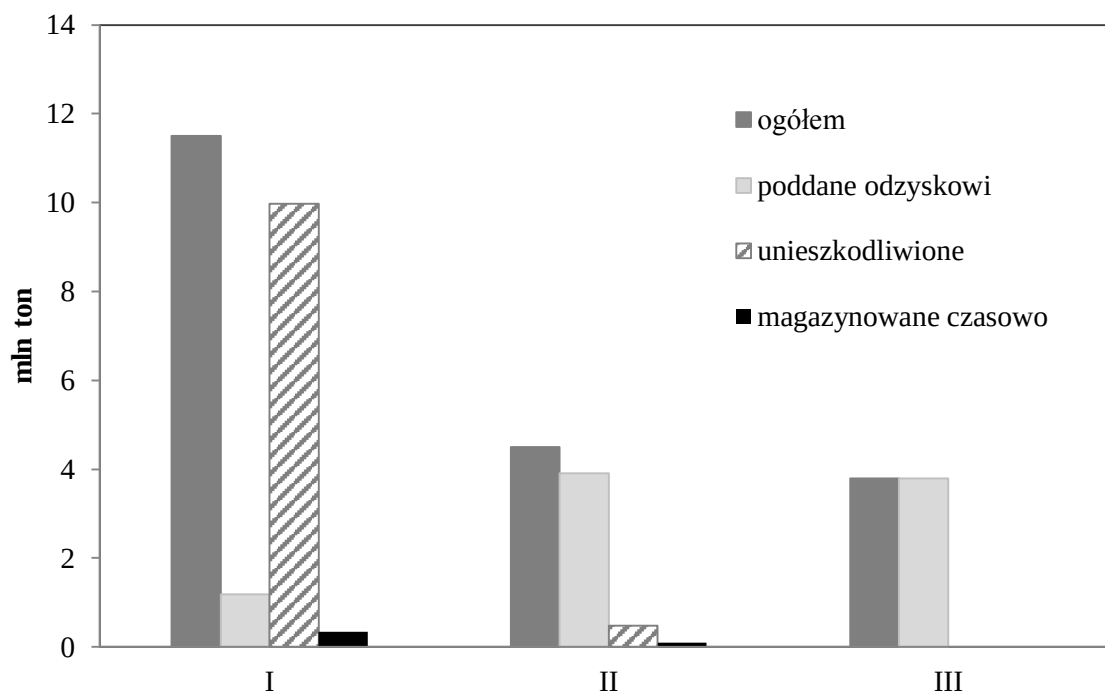
Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wartość prędkości przepływu jest zależna od nasycenia próbek popiołowych wodą – przewodność hydrauliczna jest mniejsza dla próbek o niższym stopniu nasycenia. Wraz ze zwiększeniem obciążenia przewodność hydrauliczna maleje. Istnieją wzory empiryczne przydatne do orientacyjnego oszacowania wartości przewodności hydraulicznej, które w prosty i szybki sposób pozwalają na orientacyjne określenie prędkości przepływu. Otrzymane wyniki z obliczeń porównano do wartości przewodności otrzymanych z badań, co pozwoliło na określenie, które równania są najbardziej przydatne do oszacowania przewodności zagęszczonego popiołu lotnego.

1. Wstęp

Podczas spalania węgla w elektrowniach i elektrociepłowniach, jako uboczne produkty spalania (zwane UPS) powstają popioły lotne i żużle. Ilość odpadów oraz ich jakość zależy głównie od rodzaju paliwa stałego, jakim jest najczęściej węgiel brunatny oraz węgiel

kamienny. Pochodzenie popiołów ma istotny wpływ na wiele ich cech, takich jak skład chemiczny oraz właściwości wiążące, uzależnione głównie od występowania wolnego CaO [1].

Rysunek 1 przedstawia ilość wytworzonych odpadów energetycznych w Polsce w 2013 roku.



Rysunek 1. Odpady energetyczne wytworzone i składowane w 2013 roku: I – mieszaniny popiołowo-żużłowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych; II – popioły lotne z węgla; III – mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2]

Z rysunku 1 wynika, że mieszaniny popiołowo – żużłowe (I) z mokrych składowisk są nadal w większości unieszkodliwiane, czyli odprowadzane na składowisko. Popioły lotne z węgla kamiennego i mieszaniny z wapniowych metod odsiarczania podlegają odzyskowi odpowiednio w większości wytworzonych odpadów i w całości. Należy jednak pamiętać o odpadach dotychczas nagromadzonych na składowiskach.

Wykorzystanie ubocznych produktów spalania jest korzystne dla środowiska naturalnego, ze względu na zmniejszenie ilości składowisk. Popiół lotny ma szerokie możliwości zastosowania, między innymi prowadzone są badania nad wykorzystaniem popiołów do warstw uszczelniających. Najważniejszym parametrem, określającym przydatność materiałów do wbudowywania w warstwy uszczelniające składowiska,

jest przewodność hydrauliczna – popioły lotne wbudowywane w warstwy uszczelniające składowiska powinny charakteryzować się małą przewodnością hydrauliczną.

Celem pracy jest przedstawienie ogólnej charakterystyki popiołu lotnego oraz możliwości jego wykorzystania do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów. W pracy przedstawiono wyniki badań własnych przewodności hydraulicznej popiołu lotnego oraz próbę oszacowania przewodności hydraulicznej popiołu na podstawie równań empirycznych.

2. Klasyfikacja i składowanie odpadów energetycznych

Definicje odpadów podaje norma BN-79/6722-09 [6]:

- popiół lotny jest to pozostałość po spalaniu węgla kamiennego lub brunatnego w kotłach, unoszona ze spalinami;
- żużel jest pozostałością po spalaniu węgla kamiennego lub brunatnego w kotłach, wprowadzoną spod komory paleniskowej;
- mieszanina popiołowo-żużlowa jest produktem powstałym w wyniku zmieszania poza kotłem popiołu lotnego i żużla o różnym udziale składników.

W zależności od rodzaju spalanego węgla wyróżnia się dwa typy popiołu lotnego:

- z węgla kamiennego – oznaczany symbolem PK,
- z węgla brunatnego – oznaczany symbolem PB.

Podział popiołów lotnych w zależności od procentowej zawartości podstawowych składników chemicznych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Rodzaje popiołów lotnych w zależności od procentowej zawartości podstawowych składników chemicznych

Nazwa rodzaju popiołu lotnego	Symbol	Zawartość podstawowych składników, %			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃
krzemianowy	k	powyżej 40	poniżej 30	do 10	poniżej 4
glinowy	g	powyżej 40	30 i powyżej 30	do 10	poniżej 3
wapniowy	w	powyżej 30	poniżej 30	powyżej 10	3 i powyżej 3

Źródło: BN-79/6722-09 [6]

W zależności od składu chemicznego w literaturze wyróżnia się również grupy odpadów [6,7]:

- grupa I – popioły lotne glinowo – krzemianowe – stosunek procentowej zawartości SiO_2 do Al_2O_3 jest większy lub równy 2,0 i zawartość CaO jest mniejsza niż 15%;
- grupa II – popioły lotne krzemianowo – glinowe – stosunek procentowej zawartości SiO_2 do Al_2O_3 jest mniejszy niż 2,0 i zawartość CaO jest mniejsza niż 15% oraz SO_3 poniżej 3%;
- grupa III – popioły lotne siarczanowo – wapniowe – ogólna zawartość CaO większa od 15% i SO_3 powyżej 3%;
- grupa IV – popioły lotne o ogólnej zawartości CaO większej niż 15% i SO_3 mniejszej niż 3%).

Na podstawie aktywności pucolanowej [6], która ujawnia się po dodaniu do popiołów lotnych spoiwa i wody, popioły grupy I i II podzielono na:

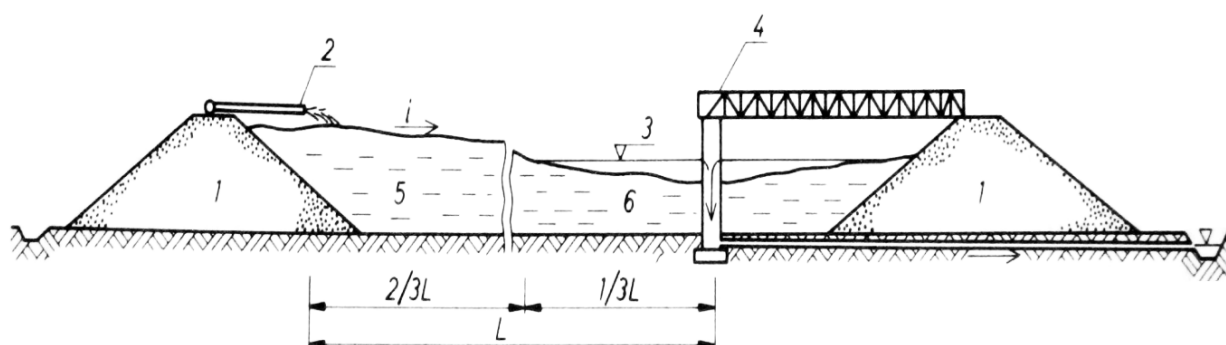
- mało pucolanowe,
- pucolanowe,
- bardzo pucolanowe.

Pucolanowość grupy I jest definiowana jako zdolność do wiązania wapna w spoiwo hydrauliczne. W zależności od zawartości wolnego CaO wyróżnia się popioły lotne :

- nieaktywne lub bardzo mało aktywne – $\text{CaO} < 3,5\%$,
- mało aktywne – $3,5 \leq \text{CaO} < 7,0\%$,
- aktywne – $7,0 \leq \text{CaO} < 14,0\%$,
- bardzo aktywne – $\text{CaO} \geq 14,0\%$.

Odpady energetyczne składowane są na dwóch rodzajach składowisk: mokrych i suchych. W przypadku składowisk suchych transport odpadów odbywa się mechanicznie – samochodami lub koleją, natomiast w przypadku składowisk mokrych – hydraulicznie.

Mokre składowiska odpadów mają formę zbiorników retencyjnych i budowane są etapami, a ich ostateczna wysokość nie przekracza 30 m [3]. Dzieli się je na kwatery ze względu na budowę etapową. W kwaterach tych zachodzą następujące procesy: składowanie pulpy, odsączanie wody z odłożonych odpadów oraz budowa obwałowań kolejnego etapu. Na rysunku 2 zaprezentowano schemat technologii i składowania popiołu na mokrym składowisku. Popiół, po dłuższym czasie od osadzeniu się w mokrym składowisku i po odwodnieniu składowiska, ulega zeskaleniu [4].



Rysunek 2. Schemat technologii i składowania odpadów na mokrym składowisku: 1 – obwałowanie, 2 – ujście (zrzut) pulpy, 3 – odstojnik, 4 – ujęcie wody, 5 – strefa zrzutowa o frakcjach grubych i średnich, 6 – strefa ujściowa o frakcjach pylistych i gliniastych

Źródło: [3]

Suche składowiska budowane są warstwami [3] w formie suchych nasypów lub tam. Na rysunku 3 przedstawiono suche składowisko w Sowlanach. Największym problemem składowisk suchych jest pylenie wtórne [5].



Rysunek 3. Sucha hałda w Sowlanach

Źródło: Opracowanie własne

3. Właściwości geotechniczne odpadów paleniskowych

Właściwości popiołów lotnych zależą od składu chemicznego substancji niepalnej, zawartej w różnych gatunkach spalanego węgla kamiennego bądź brunatnego, a także od rodzaju paleniska, temperatury spalania, stopnia rozdrobnienia paliwa, rodzaju urządzeń zastosowanych do wychwytywania popiołów lotnych ze spalin i od sposobu odprowadzenia popiołów wychwytywanych ze spalin na składowiska [8].

3.1. Skład chemiczny

Substancja popiołowa zawiera kilkadziesiąt pierwiastków, ale tylko kilka z nich występuje w ilości większej niż 1%. Pozostałe pierwiastki stanowią składniki śladowe. W tabeli 2 przedstawiono orientacyjny skład chemiczny średniej frakcji podstawowych trzech grup popiołów lotnych w Polsce [8].

Popioły lotne z węgla brunatnego okręgu konińskiego pobierane z tej samej elektrowni, ale z różnych miejsc składowania wykazują bardzo duże zróżnicowanie cech chemicznych jak i fizycznych. Szczegółowy skład chemiczny popiołów lotnych przedstawiono w tabeli 3.

Obecność w popiołach MgO w postaci wolnej jest niekorzystne, ze względu na to, iż uwadnia się do 15 razy wolniej niż CaO, czyli dopiero w ciągu kilku godzin. W związku z tym, tworzywa z popiołów o większej zawartości tlenku magnezu charakteryzują się nierównomierną zmianą objętości przy dojrzewaniu w warunkach powietrzno-wilgotnych jak też pod wpływem obróbki hydrotermicznej [8].

Zawartość w popiołach lotnych siarczanów wapnia, magnezu i sodu jest szkodliwa. Przy ilości około 3%, w warunkach wilgotnych następuje wzrost objętości w wyniku hydratacji, co powoduje rozsadzanie wyrobów.

Tabela 2. Skład chemiczny frakcji średniej podstawowych trzech grup popiołów lotnych w Polsce w stosunku do masy

Skład chemiczny popiołów lotnych, w %	Charakterystyczny typ popiołu lotnego		
	popioły lotne z węgla kamiennego	popioły lotne z węgla brunatnego okręgu turoszowskiego	popioły lotne z węgla brunatnego okręgu konińskiego
SiO ₂	43 – 57	41 – 50	30 – 50
Al ₂ O ₃	18 – 23	30 – 35	5 – 9
Fe ₂ O ₃	7 – 16	14 – 20	4 – 6
CaO	4 – 11	2 – 4	25 – 48
MgO	1 – 5	0,1 – 1,0	2 – 4
SO ₃	0,5 – 3,5	0,5 – 0,7	5 – 10
Na ₂ O + K ₂ O	1 – 3	0,1 – 0,3	ślady
Zawartość części nierozpuszczalnych w kwasie solnym	76 – 89	79 – 91	22 – 64

Zródło: [8]

Tabela.3. Przeciętny skład chemiczny popiołów lotnych w zależności od miejsca pobrania próbek popiołów lotnych z różnych elektrowni polskich, w %

Miejsce pobrania próbek	Grupa	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Straty prażenia	CaO wolne	Części nierozpuszczalne w HCL
z elektrofiltrów, zsył środkowy i skrajny najbliższy komina	a) I	47,4	25,5	9,0	5,2	3,1	1,0	5,1	0,8	71,6
	b) III	26,1	5,8	4,4	15,6	5,5	9,7	2,3	3,3	24,6
z pierwszego zsyłu elektrofiltru	a) I	46,4	24,8	9,3	5,1	3,0	0,8	5,7	0,9	74,3
	b) III	41,6	6,9	3,7	35,7	5,0	5,7	1,5	11,5	31,7
ze zsyłu przed elektrofiltrem	a) I	51,8	19,3	10,5	4,5	2,6	0,4	8,2	1,2	74,5
	b) III	77,3	4,9	3,9	7,9	1,3	0,9	1,3	1,4	80,1
ze zbiorników retencyjnych mieszane	a) I	48,4	25,5	10,0	4,0	2,9	0,8	3,6	1,0	75,1
	b) III	47,2	4,9	3,8	31,3	4,7	6,4	1,4	10,9	42,9
	c) II	50,0	33,8	6,8	1,7	0,9	0,7	2,3	0,5	52,0
z hałdy	a) I	48,3	21,3	9,2	4,2	2,4	0,5	9,9	0,2	69,6

Objaśnienia: a) popioły lotne z węgla kamiennego (Grupa I), b) popioły lotne z węgla brunatnego okręgu konińskiego (Grupa III), c) popioły lotne z węgla brunatnego okręgu turoszowskiego (Grupa II).

Źródło: [8]

Odczyn pH popiołów lotnych wynosi [8]:

- grupy I – pH = 4 – 12,5 w zależności od miejsca wydobycia spalane go węgla;
- grupy II – pH = 7 – 8;
- grupy III – pH = 12,0 – 12,8 odczyn podobny do wartości odczynu pH dla cementów.

3.2. Właściwości fizyczne

Uziarnienie

Poszczególne odpady ze względu na skład granulometryczny są dość jednorodne i najczęściej odpowiadają [5]:

- popioły lotne – pyłowi;
- żużle w stanie naturalnym – piaskowi średniemu, pospółce i zwirowi;
- mieszaniny popiołowo-żużłowe składowane na suchych składowiskach – pyłowi piaszczystemu;
- mieszaniny popiołowo-żużłowe składowane w zbiornikach odстойnikowych zmieniają się w szerokim zakresie, od pospółki do pyłu, w zależności od odległości zrzutu pulpy.

Gęstość właściwa

Gęstością właściwą gruntu ρ_s nazywa się stosunek masy szkieletu gruntowego do objętości tego szkieletu. Gęstość gruntu zależy od składu mineralogicznego skały lub gruntu. Gęstość właściwa jest jedną z podstawowych cech geotechnicznych. Poddane badaniom odpady z EC Stalowa Wola posiadały mniejszą (o około 12%) gęstość właściwą w porównaniu z gruntami mineralnymi [9]. Obrycki w roku 1974 [5] zdefiniował gęstość właściwą odpadów energetycznych jako stosunek masy szkieletu do objętości szkieletu wraz z zamkniętymi porami, ze względu na strukturę popiołów lotnych. Gęstość właściwa szkieletu gruntowego odpadów energetycznych, według rozszerzonej definicji, nazywana jest też pozorną gęstością właściwą szkieletu.

Zagęszczalność

Zagęszczalnością gruntów nazywa się zdolność do uzyskania maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_d , w zależności od użytej energii zagęszczenia i sposobu jej użycia oraz rodzaju gruntu i jego wilgotności [10].

Do laboratoryjnego zagęszczania gruntów drobnoziarnistych poprzez ubijanie w cylindrze stosuje się dwie metody: normalną (Proctora) i zmodyfikowaną, które różnią się energią zagęszczenia. Metody te służą do oznaczenia gęstości objętościowej ρ_d i wilgotności w badanego gruntu. Wilgotność optymalną w_{opt} , czyli wilgotność gruntu, przy której ρ_d ma największą wartość, określa się wykreślnie.

Zagęszczalność popiołu lotnego zależy od uziarnienia oraz od struktury pojedynczych ziaren. Ziarna kuliste popiołu lotnego, zgniatane podczas zagęszczania mogą wypełniać przestrzeń między mniejszymi ziarnami, zwiększając w ten sposób zagęszczalność [11]. Dynamiczne zagęszczanie popiołów powoduje częściowe kruszenie nietrwałych ziaren popiołowych, co przyczynia się do lepszego zagęszczenia popiołu. Wartość maksymalnej gęstości szkieletu gruntowego wzrasta wraz z liczbą uderzeń tej samej próbki popiołu, podczas gdy wilgotność optymalna maleje.

Wodoprzepuszczalność

Wodoprzepuszczalność jest zdolnością gruntu do przepuszczania wody systemem połączonych porów. Zależy ona od współczynnika filtracji k_{10} , który jest charakteryzowany, jako prędkość przepływu wody przez grunt w temperaturze 10°C i spadku hydraulicznym równym 1. Współczynnik k_{10} zależy od czasu przepływu, ale przede wszystkim od zagęszczenia materiału i od kierunku przepływu. Pieczyrak i Sękowski [9] zbadali wodoprzepuszczalność

odpadów elektrownianych z EC Stalowa Wola, przy przepływie wody w dół i w górę dla trzech stanów zagęszczenia (określonych ρ_d) przy niezmiennym spadku hydraulicznym ($i = 0,83$).

Analiza wyników wykazała, że dla materiału nieznacznie zagęszczonego ($\rho_d = 0,61 \text{ g/cm}^3$) współczynnik wodoprzepuszczalności, w zależności od kierunku przepływu, jest od 7,24 do 9,10 razy większy od współczynnika wodoprzepuszczalności dla materiału bardzo zagęszczonego ($\rho_d = 1,00 \text{ g/cm}^3$). Badany materiał według klasyfikacji Terzaghi'ego i Pecka miał przepuszczalność małą lub średnią, co odpowiada piaskom pylastym i drobnoziarnistym. Oznacza to, że wodoprzepuszczalność badanych ubocznych produktów spalania jest mniejsza od wodoprzepuszczalności gruntów mineralnych rodzimych, odpowiadających im uziarnieniem [9].

3.3. Właściwości mechaniczne

Ścisłość

Ścisłość jest zdolnością gruntu do zmniejszania objętości pod wpływem obciążenia. Grunt zmniejsza swoją objętość wskutek wyciskania wody i powietrza z porów, przemieszczania się cząstek stałych względem siebie, zgniatanie niektórych cząstek oraz sprężystego odkształcania cząstek i wody błonkowej. Przy zmniejszeniu nacisku na grunt zwiększa się jego objętość, co nazywane jest zjawiskiem odprężenia [10].

Ścisłość jest jednym z czynników powodujących osiadanie gruntu. Grunty spoiste, słabo przepuszczalne osiadają wolniej niż grunty niespoiste. Właściwości sprężyste szkieletu gruntowego, wody błonkowej oraz zmniejszenie objętości gazów w porach, wywołują odkształcenia sprężyste. Odkształcenia trwałe są wynikiem kruszenia cząstek gruntu, ich przemieszczania się oraz usuwania wody z porów. W gruncie całkowicie nasyconym, bezpośrednio po obciążeniu, woda przejmuje prawie cały przyrost obciążenia, po czym następuje wyciskanie jej z miejsc o większym ciśnieniu do miejsc o ciśnieniu mniejszym [12].

Na ścisłość zagęszczonych odpadów energetycznych ma wpływ nasycenie wodą. Częściowo nasycone próbki charakteryzują się mniejszą ścisłością od tych w pełni nasyconych. O wielkości osiadań popiołu lotnego decyduje energia zagęszczenia, a także wilgotność przy zagęszczeniu oraz nasycenie próbek popiołowych wodą [5].

W przypadku mieszanin popiołowo-żużlowych, przy większej zawartości żużla osiadanie jest większe. Dwa prawdopodobne mechanizmy mogą tłumaczyć wzrost ścisłości przy spadku zawartości popiołu w mieszaninie – to jest przy wzroście zawartości żużla [12]:

- kanciasta i porowata tekstura powierzchni cząstki żużlowej;
- częściowe rozkruszenie.

Pęcznienie

Pęcznienie gruntu polega na zwiększaniu jego objętości wskutek zwiększania się zawartości wody w gruncie. Skutkiem pęcznienia jest spadek wytrzymałości gruntu. Zjawisko odwrotne – zmniejszanie się objętości gruntu wskutek wysychania – nazywane jest skurczalnością [10].

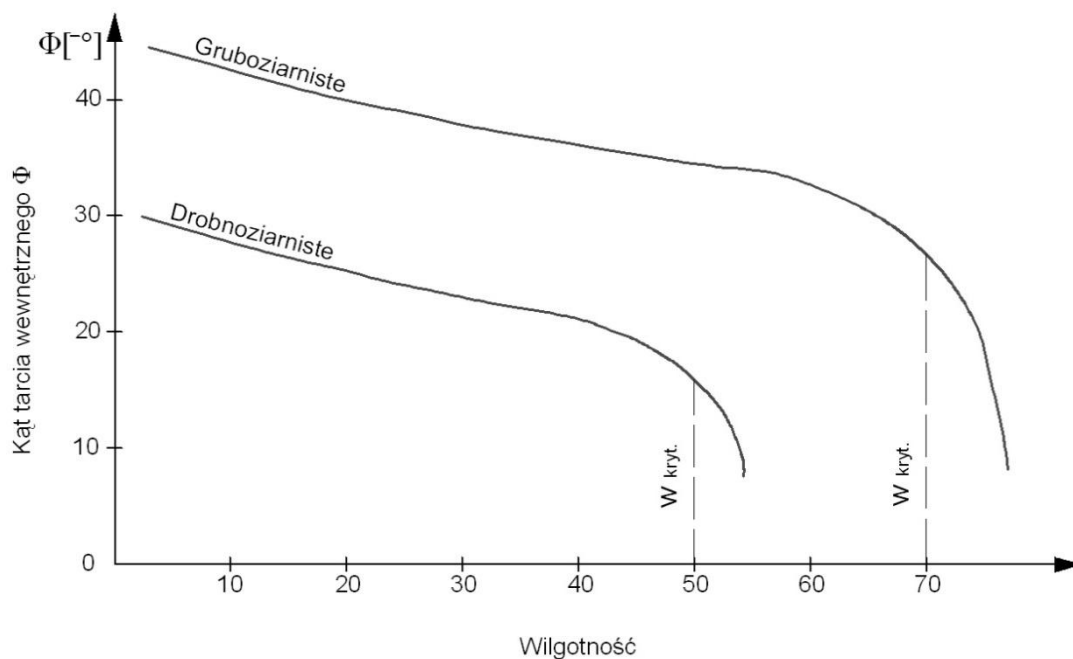
Badania uśrednionej mieszaniny popiołowo-żużlowej ze zbiornika odstojnikowego EC Żerań wykazały, że ich pęcznienie w warunkach najbardziej niekorzystnych, czyli bez obciążenia powierzchni próbki, nie przekracza 5%, a przy obciążeniu powierzchni próbki 2,6 kPa, pęcznienie jest mniejsze niż 2% [8].

Według Słupskiego [13] pęcznienie liniowe, jako jedno z podstawowych wymagań dotyczących przydatności mieszanin popiołowo-żużlowych do budowy nasypów, powinno przyjmować wartości:

- dla materiału bez obciążenia $\leq 2,0\%$;
- dla materiału z obciążeniem 0,003 MPa $\leq 0,5\%$.

Wytrzymałość na ścinanie

Wytrzymałość gruntu na ścinanie to maksymalny opór jaki grunt stawia naprężeniom ścinającym. Kąt tarcia wewnętrznego jako jedna z podstawowych cech mechanicznych popiołów i ich mieszanin z żużlem jest zależny zarówno od uziarnienia i zagęszczenia, jak i od ich wilgotności [8]. Na rysunku 4 pokazano zależność kąta tarcia wewnętrznego od wilgotności. Wartości kąta tarcia są wyższe dla odpadów gruboziarnistych i maleją wraz ze wzrostem wilgotności. Wartość kąta tarcia wewnętrznego popiołów lotnych i mieszanin popiołowo-żużlowych maleje gwałtownie w momencie osiągnięcia wilgotności krytycznej ($w = 50 - 70\%$). W związku z tym, przy wznoszeniu nasypów z ubocznych produktów spalania należy zabezpieczać je przed nadmiernym nawilgacaniem oraz umożliwiać szybkie odprowadzenie wody poprzez stosowanie warstw drenażowych [1].



Rysunek 4. Graniczne wartości kąta tarcia wewnętrznego popiołów i mieszanin popielowo-żużlowych zależnie od wilgotności

Źródło: [1]

Kalifornijski wskaźnik nośności CBR

Kalifornijski wskaźnik nośności CBR (California Bearing Ratio) określa zdolność podłoża gruntowego do przenoszenia obciążeń bez wywoływania jego nadmiernych odkształceń [5].

Badania Pachowskiego [8] nad popiołami z silosów wykazały, że wartości kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR, przy początkowej wilgotności próbek, zbliżonej do w_{opt} , przy kontakcie próbek z wodą przez 4 doby, były wysokie lub bardzo wysokie.

Badania przeprowadzone na odpadach energetycznych z EC Białystok dla próbek zagęszczanych metodą standardową i zmodyfikowaną Proctora przy wilgotności $w_{opt} \pm 5\%$, wykazały, że wskaźnik nośności CBR przy metodzie standardowej zależy od wilgotności, jak i od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, zaś przy zagęszczaniu zmodyfikowanym – zależy głównie od wilgotności [5].

4. Podstawy teoretyczne przewodności hydraulicznej

Przepływ wody w gruncie jest charakteryzowany przez prawo Darcy'ego według wzoru:

$$Q = k \cdot i \cdot A \cdot t \quad (1)$$

gdzie:

Q – wydatek objętościowy cieczy,

k – stała zwana współczynnikiem filtracji Darcy'ego,

A – pole przekroju poprzecznego,

t – czas przepływu,

i – gradient hydrauliczny $i = \frac{\Delta H}{l}$, gdzie ΔH – różnica wysokości poziomów piezometrycznych wody, l – długość drogi przepływu.

Prędkość przepływu wody w gruncie całkowicie nasączonym opisuje równanie:

$$v_s = \frac{v}{n} = v \cdot \frac{1+e}{e} \quad (2)$$

gdzie:

n - porowatość gruntu,

e – wskaźnik porowatości.

Prędkość przepływu v może być opisana przez zależność nieliniową [14]:

$$v = \kappa \cdot i^{(n)} \quad (3)$$

gdy $i \leq i_1$, natomiast gdy $i \geq i_1$ równaniem:

$$v = \kappa i_1^{n-1} \cdot (i - i_0) \quad (4)$$

w którym κ jest współczynnikiem filtracji opisanym zależnością eksponencjalną, $i_1 = \frac{i_0 n}{(n-1)}$ to

wartość gradientu, wymagana do całkowitego pokonania oporu lepkości wody przepływającej w gruncie oraz i_0 – początkowy gradient hydrauliczny, n – porowatość gruntu.

W publikacjach anglojęzycznych [15,16] k określane jest jako przewodność hydrauliczna (*hydraulic conductivity*). Jest to parametr zależny od cech i właściwości ośrodka i cieczy, która przez ten ośrodek przepływa. Należą do nich: gęstość i lepkość przepływającej cieczy oraz uziarnienie i porowatość gruntu, przez który ciecz przepływa [17].

W gruntach spoistych przepływ wody jest utrudniony przez wodę błonkową, która wypełnia pory. W gruntach tych filtracja występuje po przekroczeniu początkowego gradientu hydraulicznego i_0 . Filtracja następuje, gdy naprężenie ścinające wywołane gradientem hydraulicznym w błonkach wody przekracza opór na ścinanie. Opór ten zależy od lepkości wody błonkowej, która jest tym większa, im błonki wody są cieńsze [18].

Nasycenie porów gruntu wodą oceniane jest za pomocą zmiany ciśnienia porowego Δu , które występuje pod wpływem zmian głównych naprężeń $\Delta \sigma_1$ oraz $\Delta \sigma_3$, co określa równanie Skempton [19]:

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \sigma_3)] \quad (5)$$

gdzie:

A i B są współczynnikami ciśnienia porowego,

$\Delta\sigma_1$ oraz $\Delta\sigma_3$ są zmianami w naprężeniach głównych.

Współczynniki A i B są mierzone w badaniu trójosiowego ściskania. Grunt całkowicie nasycony przyjmuje wartość $B = 1$, natomiast suchy $B = 0$.

Nasycenie gruntu badanego w warunkach niemożliwej bocznej rozszerzalności ocenia się na podstawie wartości parametru B :

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma} \quad (6)$$

gdzie:

Δu jest ciśnieniem w porach odpowiadającym wzrostowi całkowitego pionowego naprężenia $\Delta\sigma$.

Parametr S_r – stopień wilgotności – określa stopień wypełnienia porów gruntu wodą i jest wyrażany wzorem:

$$S_r = \frac{w_n \rho_s}{100e\rho_w} \quad (7)$$

gdzie:

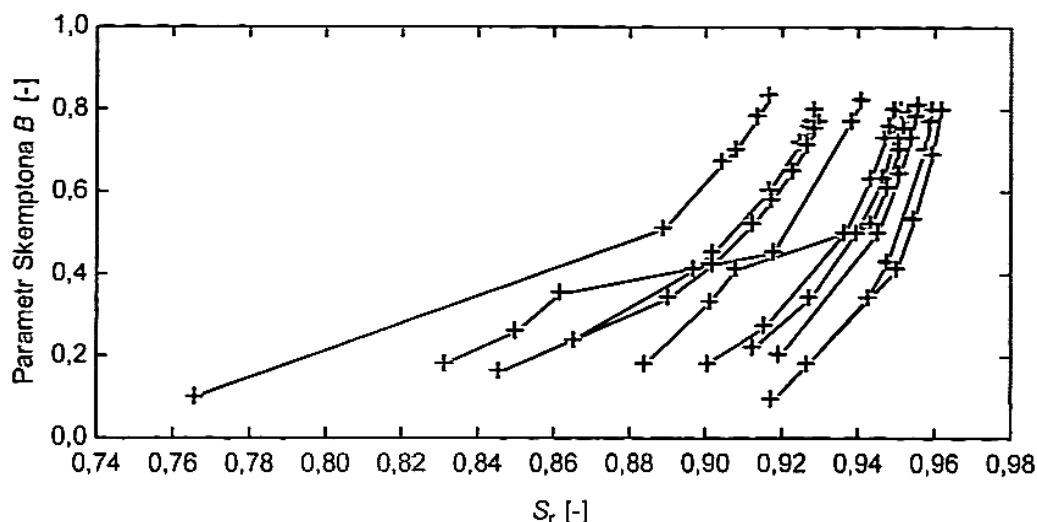
w_n – wilgotnością badanego gruntu,

ρ_s – gęstością szkieletu gruntowego,

ρ_w – gęstością wody,

e – wskaźnik porowatości.

Próbkę można nasączyć wodą za pomocą ciśnienia wyrównawczego (*back pressure*). Powoduje ono ściśnięcie powietrza w wodzie porowej a następnie jego rozpuszczenie w wodzie otaczającej. Wielkość ciśnienia wyrównawczego, która jest potrzebna do uzyskania wymaganego parametru Skemptona B wzrasta wraz ze spoistością gruntu. W przypadku niektórych gruntów za nieuzasadnione uważa się uznawanie pełnego nasycenia przy $B = 1$, ze względu na fakt, że przy wzroście naprężenia wartość parametru B pozostaje na tym samym poziomie. Minimalną wartość parametru B wyznacza się z zależności parametru Skemptona B od stopnia wilgotności S_r [20]. W przypadku popiołu lotnego, z wykresu zależności parametru Skemptona B od stopnia wilgotności S_r [5] wynika, że przy coraz wyższych wartościach stopnia wilgotności, parametr Skemptona B przyjmował maksymalną wartość około 0,8. Wartość ta została uznana za wartość określającą pełne nasycenie.



Rysunek 5. Wykres zależności parametru Skempton B od uzyskanego stopnia wilgotności popiołu lotnego S_r , dla kolejnych nasączanych próbek

Źródło: [5]

Wzory empiryczne do oszacowania współczynnika filtracji k gruntu nasyconego wodą powstały, gdyż badania przewodności hydraulicznej gruntów są często kosztowne oraz pracochłonne. W literaturze [21,22,23] można znaleźć wiele równań pozwalających wstępnie obliczyć prędkość przepływu cieczy przez dany ośrodek gruntowy. Bardziej zaawansowane metody szacowania współczynnika filtracji uwzględniają takie właściwości gruntu, jak: porowatość, czy też wskaźnik porowatości, krzywą uziarnienia oraz granice konsystencji gruntów spoistych.

Hazen [21] zaproponował następującą formułę dla piasków nasyconych wodą:

$$k = C_H d_{10}^2 \quad (8)$$

gdzie:

d_{10} jest średnicą efektywną, poniżej której znajduje się w gruncie 10% ziaren o średnicy mniejszej niż d_{10} ,

C_H – współczynnikiem empirycznym Hazena.

Równanie wykorzystuje w głównej mierze średnicę zastępczą jako czynnik odpowiedzialny za prędkość przepływu cieczy przez grunt.

Wyrażenie (4.8), początkowo stosowane tylko dla materiałów o $C_u < 5$ oraz $0,01 \text{ cm} < d_{10} < 0,03 \text{ cm}$, zostało wykorzystane dla wielu innych gruntów. W przypadku, kiedy d_{10} ma wartość mniejszą niż $0,01 \text{ cm}$ (grunty spoiste), współczynnik Hazena może przyjmować wartości od 1 do 1000 [21].

Bardziej skomplikowaną i złożoną formułą jest równanie Kozeny-Carmana, które można przedstawić w postaci [22]:

$$k = C \frac{g}{\mu_w \rho_w} \frac{e^3}{S_s^2 G_s^2 (1+e)} \quad (9)$$

gdzie:

C - stała zależna od geometrii przestrzeni porowej gruntu, $C=0,2 - 0,5$;

g - przyspieszeniem grawitacyjnym (m/s^2),

μ_w - lepkością dynamiczną wody ($Pa \cdot s$),

ρ_w - gęstością wody (kg/m^3),

G_s - gęstością względną szkieletu gruntowego ($G_s = \rho_s / \rho_w$),

S_s - powierzchnią właściwą (m^2/kg),

e - wskaźnikiem porowatości.

Powstało ono w celu określania powierzchni właściwej gruntu, co było bardzo kłopotliwe. Dziś formuła służy głównie do szacowania przewodności hydraulicznej.

Chapuis [24], odnosząc się do równania Hazena oraz Kozeny-Carmana, podał formułę, w której przewodność hydrauliczna piasku i żwiru uzależniona jest zarówno od średnicy efektywnej, jak i wskaźnika porowatości:

$$k = 2,4622 \left(\frac{d_{10}^2 e^3}{1+e} \right)^{0,7825} \quad (10)$$

gdzie d_{10} jest w mm.

Zabielska-Adamska [5] badała przewodność hydrauliczną popiołu lotnego z węgla kamiennego, zagęszczanego w zakresie wilgotności $w_{opt} \pm 5\%$ metodą standardową i zmodyfikowaną Proctora. Po nasyceniu próbki do uzyskania parametru Skemptonu $B = 0,8$ i po konsolidacji próbek popiołowych, przeprowadzano badania filtracji przy przepływie z dołu do góry próbki. Nasączone próbki popiołowe, zagęszczone metodą standardową, miały wartości przewodności hydraulicznej od $1,4 \cdot 10^{-7}$ do $3,7 \cdot 10^{-10}$ m/s. W przypadku próbek zagęszczonych metodą zmodyfikowaną były to wartości od $7,3 \cdot 10^{-8}$ do $1,3 \cdot 10^{-9}$ m/s. Najniższą wartość przewodności hydraulicznej popiołu lotnego uzyskano przy wilgotności $w_{opt} + 5\%$.

Tabela 4 pokazuje wartości przewodności hydraulicznej mieszanin popiołowo-żuźlowych z zawartością popiołu 50, 75 i 100%, dla dwóch różnych składowisk. Pomierzone wartości zmieniają się od $1 \cdot 10^{-7}$ do $3 \cdot 10^{-8}$ m/s, co wskazuje na zakres podobny dla piasku. Kiedy zawartość popiołu w mieszaninie wzrastała z 50 do 100%, wartości przepuszczalności

hydraulicznej zmniejszały się stopniowo, a spadek wartości wraz ze wzrostem zawartości popiołu był w zasadzie taki sam dla obu składowisk. Większa powierzchnia właściwa popiołów lotnych zwiększa opór przepływu przez puste przestrzenie.

Podsumowując, obserwuje się spadek przepuszczalności odpadów energetycznych przy wzroście wilgotności przy zagęszczeniu, podobnie jak w gruntach spoistych. W przypadku mieszanin popiołowo – żużlowych – im większa procentowa zawartość popiołu, tym mniejsze wartości przewodności hydraulicznej.

Tabela 4. Przewodność hydrauliczna mieszanin popiołowo-żużlowych

Składowisko	Zawartość popiołu i żużla w mieszaninie [%]	Przepuszczalność hydrauliczna [m/s]
I	P100	$3 \cdot 10^{-8}$
	P75 Ż25	$6 \cdot 10^{-8}$
	P50 Ż50	$1 \cdot 10^{-7}$
II	P100	$6 \cdot 10^{-8}$
	P75 Ż25	$9 \cdot 10^{-8}$
	P50 Ż50	$1 \cdot 10^{-7}$

Źródło: [12]

Szymkiewicz i Kryczalło [23] podjęli się pogrupowania równań i zestawienia ich na podstawie wspólnych cech. Autorzy obliczyli współczynnik filtracji dla dwu modelowych krzywych uziarnienia – dla piasku oraz żwiru. Wywnioskowano, że wzór Kozeny – Carmana jest jednym z bardziej uniwersalnych, ze względu na fakt, iż uwzględnia on charakterystyki zarówno ośrodka gruntowego jak i cieczy przepływającej przez ten ośrodek.

Carrier [25] analizując równanie Hazena oraz Kozeny – Carmana stwierdził, że formuła Kozeny – Carmana ma pewne ograniczenia:

- zakłada ona brak reakcji elektrochemicznych pomiędzy ziarnami gruntu i przepływającą wodą;
- zakłada ona warunki przepływu zgodne z prawem Darcy’ego, czyli przepływ laminarny oraz małą prędkość przepływu wody przez pory gruntu, co jest odpowiednie dla gruntów gliniastych i piasków. Dla gruntów o dużych ziarnach, przykładowo żwirów, potrzebne są formuły bardziej zaawansowane.
- zakłada, że ziarna gruntu są stosunkowo zwarte, co nie ma zastosowania w przypadku gruntów zawierających cząstki np. miki. Ponadto, w przypadku jeśli zbadana powierzchnia

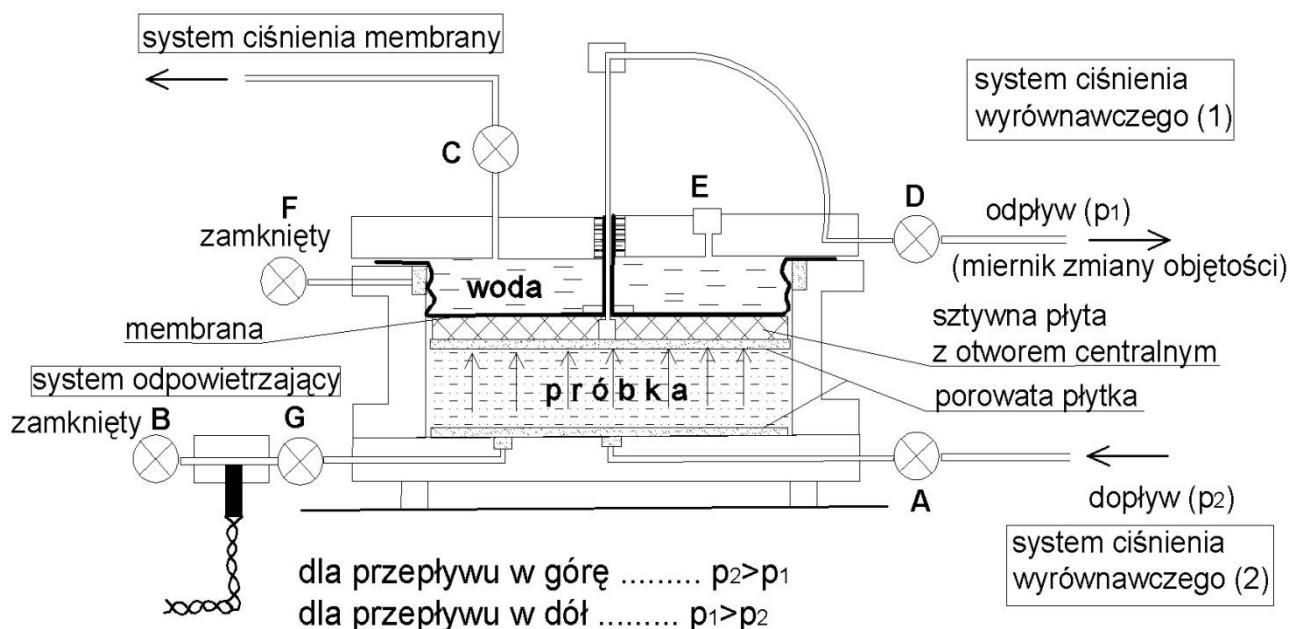
właściwa jest znacznie większa od obliczonej, to wartość obliczona powinna być brana pod uwagę w trakcie szacowania przewodności hydraulicznej.

Pomimo to, autor twierdzi, że formuła Kozeny – Carmana może być z powodzeniem stosowana, natomiast w przypadku równania Hazena i możliwości przyjmowania wartości od 1 do 1000 przez współczynnik C_H , już sam ten fakt powinien to równanie dyskwalifikować.

5. Badania własne

5.1. Metodyka badań

Przewodność hydrauliczną próbek badano w komorze konsolidacji hydraulicznej typu Rowe'a. Jest to aparat wyposażony w hydrauliczny system obciążania próbek, który ma możliwość badania ciśnienia wody w porach, drenażu w różnych kierunkach oraz umożliwia badania próbek o dużych średnicach. Komora Rowe'a pozwala na badanie przewodności hydraulicznej, na założonym poziomie ciśnienia wyrównawczego, podczas badania konsolidacji z pionowym lub poziomym przepływem wody. Na rysunku 6 przedstawiono schemat komory Rowe'a do badania przewodności hydraulicznej z przepływem pionowym od podstawy do powierzchni próbki.



Rysunek 6. Schemat komory Rowe'a do badania przewodności hydraulicznej z przepływem pionowym

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [26]

Badane próbki popiołowe, zagęszczane metodą standardową Proctora przy wilgotności optymalnej, miały średnicę 15 cm i wysokość 5 cm. Nasycane były wodą za pomocą ciśnienia wyrównawczego (*back pressure*), do momentu uzyskania założonej wartości parametru Skemptonia B . Próbkę nasycano do wartości parametru Skemptonia B : 0,27; 0,57 oraz 0,82 – uważanego za stan quasi-nasycony [5]. Po osiągnięciu wymaganej wartości parametru B przystępowano do konsolidacji próbek przy naprężeniu efektywnym 25, 50, 100 i 200 kPa. Naprężenie efektywne σ' , przenoszone przez szkielet gruntowy, jest różnicą pomiędzy naprężeniem całkowitym σ a ciśnieniem wody w porach gruntu u i opisuje je wzór zaproponowany przez Terzaghi'ego [18]:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (11)$$

Badania przewodności hydraulicznej popiołu były przeprowadzane na każdym kroku obciążenia, przy gradiencie hydraulicznym $i = 12$. Wyniki pomiarów, takie jak ciśnienie komorowe, ciśnienie wody w porach, przemieszczenia i zmiany objętości, rejestrowano za pomocą systemu elektronicznego.

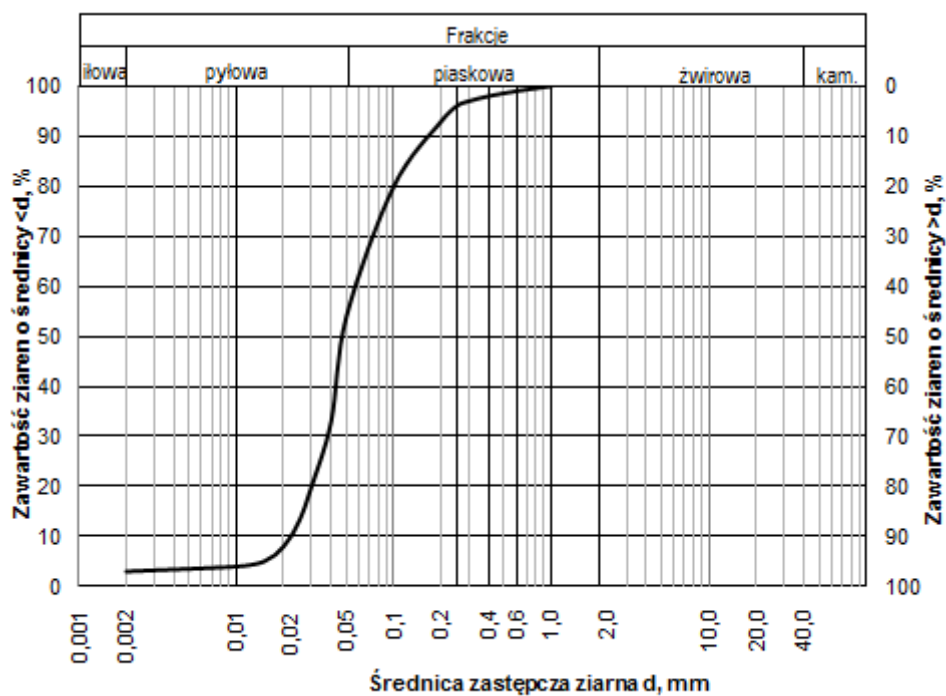
5.2. Badany popiół lotny

Badania przeprowadzono na mieszaninie popiołowo-żuźłowej z Elektrociepłowni Białystok ze spalania węgla kamiennego składowanej na suchej hałdzie w Sowlanach, która uziarnieniem odpowiada pyłowi piaszczystemu. Ze względu na śladową ilość żużla w mieszaninie będzie ona nazywana popiołem lotnym. Popiół jest nieaktywny lub bardzo mało aktywny i mało pucolanowy. W tabeli 5 przedstawiono wartości wybranych parametrów, takich jak: średnica miarodajna, wskaźnik różnoziarnistości, powierzchnia właściwa, wskaźnik krzywizny, gęstość właściwa szkieletu gruntowego oraz wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa oznaczane metodą standardową Proctora. Na rysunku 7 pokazano uśrednioną krzywą uziarnienia badanej mieszaniny popiołowo-żuźłowej.

Tabela 5. Parametry geotechniczne mieszaniny popiołowo-żuźłowej wyznaczone według [27]

d_{50} [mm]	C_u [-]	S_s [m ² /g]	C_c [-]	ρ_s [g/cm ³]	Zagęszczenie – metoda standardowa Proctora	
					w_{opt} [%]	ρ_{dmax} [g/cm ³]
0,045	2,17	2,47	1,22	2,12	44,00	0,996

Źródło: Badania własne

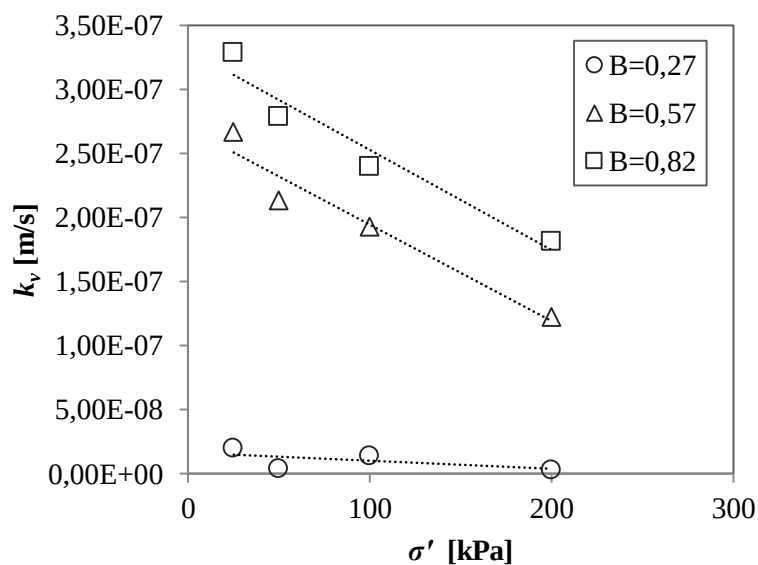


Rysunek 7. Krzywa uziarnienia mieszanki popiołowo-żużlowej

Źródło: Badania własne

5.3. Wyniki badań własnych i analiza wyników

Na rysunku 8 zaprezentowano wyniki badań przewodności hydraulicznej mieszanki popiołowo-żużlowej dla próbek o różnym stopniu nasycenia wodą, określanym za pomocą parametru Skemptona B .



Rysunek 8. Przewodność hydrauliczna mieszanki popiołowo-żużlowej zagęszczanej przy w_{opt} metodą standardową Proctora, przy gradiencie hydraulicznym $i = 12$

Źródło: Badania własne

Na podstawie wyników badań własnych można stwierdzić, że na przewodność hydrauliczną ma wpływ nasycenie popiołu lotnego wodą. Najmniejszą prędkość przepływu wody wykazała próbka nasycona do wartości parametru Skemptona $B = 0,27$. Próbką o wartości $B = 0,57$ oraz $B = 0,82$ miały podobne wartości przewodności hydraulicznej. Wraz ze wzrostem naprężenia efektywnego wartość przewodności hydraulicznej maleje – najmniejsze wartości otrzymano przy $\sigma' = 200$ kPa.

Wartość przewodności hydraulicznej popiołu lotnego, uzyskana na podstawie badań laboratoryjnych klasyfikuje go, jako materiał półprzepuszczalny według klasyfikacji Pazdry [28]. Wzór Hazena nie daje zadowalających wyników oszacowania przewodności hydraulicznej popiołu lotnego. Uzależnienie przepuszczalności jedynie od średnicy miarodajnej nie jest wystarczające, tym bardziej, że obliczona wartość jest jedyną, co w tym wypadku jest niezgodne z przebiegiem badania, gdzie na próbkę działało naprężenie efektywne, którego wartość się zwiększała, różne też były warunki nasycenia próbek. Jedynie przyjęcie najmniejszej wartości współczynnika równej $C_H = 1$ pozwoliło na uzyskanie najmniejszej wartości prędkości przepływu, a w dalszym ciągu wynik różni się dość znacząco od wyników uzyskanych z badań.

Tabela 6 przedstawia zestawienie wyników badań przewodności hydraulicznej dla dwóch próbek popiołowych w stanie quasi-nasyconym ($B = 0,8$). Otrzymane z badań wartości porównano do wartości uzyskanych na podstawie wzorów empirycznych Hazena (8), Kozeny – Carmana (9) oraz wzoru podanego przez Chapuisa (10). Do obliczenia przepuszczalności za pomocą formuły Kozeny – Carmana przyjęto stałą $C = 0,2$ oraz $C = 0,5$, jako zalecane wartości minimalne i maksymalne stałej, natomiast we wzorze Hazena wartość współczynnika Hazena $C_H = 1$.

Wzór opracowany przez Chapuisa wydaje się bardziej przydatny, ze względu na fakt, że oprócz średnicy miarodajnej brany jest pod uwagę wskaźnik porowatości, który wraz ze wzrostem obciążenia ulega zmianie. Jednak wartości uzyskane na podstawie równania (10) odbiegają znacznie od wartości pomierzonych.

Najbardziej adekwatną i przydatną wydaje się być formuła Kozeny – Carmana. Wyniki uzyskane na podstawie wzoru (9), przy wartości współczynnika $C=0,5$, są najbardziej zbliżone do tych uzyskanych w laboratorium.

Tabela 6. Zestawienie wyników badań własnych przewodności hydraulicznej popiołu lotnego, w stanie quasi-nasyconym, z wynikami otrzymanymi na podstawie wzorów empirycznych

Parametr Skemptona B [-]	Gradient hydra - uliczny i [-]	σ' [kPa]	e [-]	d_{10} [mm]	k [m/s]				
					Wartości pomierzone	Kozeny-Carman $C=0,5$	Kozeny-Carman $C=0,2$	Chapuis 2004	Hazen
0,80	12	25	1,09	0,024	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$4,44 \cdot 10^{-8}$	$4,95 \cdot 10^{-5}$	$5,76 \cdot 10^{-6}$
		50	1,07		$1,41 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$4,27 \cdot 10^{-8}$	$4,80 \cdot 10^{-5}$	
		100	1,06		$1,28 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$4,10 \cdot 10^{-8}$	$4,66 \cdot 10^{-5}$	
		200	1,04		$1,10 \cdot 10^{-7}$	$9,95 \cdot 10^{-8}$	$3,98 \cdot 10^{-8}$	$4,55 \cdot 10^{-5}$	
0,82	12	25	1,11	0,024	$3,29 \cdot 10^{-7}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$	$4,61 \cdot 10^{-8}$	$5,10 \cdot 10^{-5}$	$5,76 \cdot 10^{-6}$
		50	1,09		$2,79 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$	$4,48 \cdot 10^{-8}$	$4,99 \cdot 10^{-5}$	
		100	1,08		$2,40 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$	$4,31 \cdot 10^{-8}$	$4,84 \cdot 10^{-5}$	
		200	1,07		$1,82 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$4,19 \cdot 10^{-8}$	$4,73 \cdot 10^{-5}$	

Zródło: Badania własne

6. Wnioski

1. Właściwości geotechniczne popiołu lotnego i mieszaniny popiołowo – żużlowej wskazują na jego podobieństwo do drobnoziarnistych gruntów naturalnych, przez co może być on wykorzystywany jako zamiennik gruntów.
2. Popiół lotny jest materiałem, który można wykorzystywać do budowy warstw uszczelniających składowiska odpadów, ze względu na niską wartość przewodności hydraulicznej.
3. Nasycenie popiołu lotnego wodą ma wpływ na jego przewodność hydrauliczną – wraz ze wzrostem nasycenia próbki wodą wzrasta prędkość przepływu wody, co jest ważne ze względu na modelowanie warunków pracy uszczelnienia.
4. Wraz ze wzrostem naprężenia efektywnego wartość przewodności hydraulicznej maleje. Warstwa obciążona nadkładem odpadów będzie miała mniejszą przepuszczalność niż warstwa nieobciążona.
5. Spośród przeanalizowanych równań empirycznych najlepsze wyniki przewodności hydraulicznej uzyskano dla formuły Kozeny – Carmana, która uwzględnia porowatość i powierzchnię właściwą gruntu przy obliczaniu wartości przewodności hydraulicznej.

Literatura:

1. Pachowski J.: *Popioły Lotne i Ich Zastosowanie w Budownictwie Drogowym*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1976.
2. *Ochrona Środowiska 2014*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2014.

3. Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M.: *Energetyka a Ochrona Środowiska*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
4. Mioduszewski W.: *O możliwości wykorzystania odpadów paleniskowych do budowy obwałowań składowisk i odstojników przemysłowych*. Gospodarka Wodna, Nr 2, 1972.
5. Zabielska-Adamska K.: *Popiół Lotny Jako Materiał do Budowy Warstw Uszczelniających*, Politechnika Białostocka, Białystok 2006.
6. BN-79/6722-09: *Popioły lotne z kotłów opalanych węglem kamiennym i brunatnym. Podział, nazwy, określenia*.
7. Wileński P.: *Możliwości i warunki wykorzystania energetycznych odpadów paleniskowych w budownictwie komunikacyjnym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1991.
8. Pachowski J.: *Rozwój technologii powstawania ubocznych produktów elektrownianych oraz ich charakterystyka i możliwości zastosowań w technologiach budownictwa drogowego*. Drogi i Mosty nr 1, Warszawa 2002.
9. Pieczyrak J., Sękowski J.: *Odpady elektrowniane z EC Stalowa Wola w ocenie geotechnicznej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1985.
10. Wiłun Z.: *Zarys Geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000.
11. Zabielska-Adamska K.: *Laboratory compaction of fly ash and fly ash with cement additions*. Journal of Hazardous Materials, Vol. 151, 2008.
12. Kim B., Perezzi M., Salgado R.: *Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, 2005.
13. Słupski W.: *Stosowanie odpadów energetycznych do budowy nasypów komunikacyjnych*. Prace Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Nr 1-2, 1981.
14. Hansbo S.: *Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow*. Géotechnique, Vol. 51, 2001.
15. Ghosh A., Subbarao C.: *Hydraulic conductivity and leachate characteristics of stabilized fly ash*. Journal of Environmental Engineering, Vol. 124, 1998.
16. Kalinski M. E., Yerra P. K.: *Hydraulic conductivity of compacted cement-stabilized fly ash*. Fuel, Vol. 85, 2330-2336, 2006.
17. Cartwright K., Hensel B.R.: *Hydrogeology*. Geotechnical Practice for Waste Disposal. Daniel D. E. (Ed.). Chapman & Hall, London, England 1997.
18. Pisarczyk S.: *Gruntoznawstwo Inżynierskie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.

19. Skempton A. W.: *The pore-pressure coefficients A and B*. Geotechnique, Vol. 4, 1954.
20. Lipiński M. J., Wdowska M. K.: *Kryteria nasączania gruntów prekonsolidowanych metodą ciśnienia wyrównawczego*. Materiały II Problemowej Konferencji Geotechniki „Współpraca budowli z podłożem gruntowym”, Białystok-Białowieża 2004.
21. Mbonimpa M., Aubertin M., Chapuis R. P., Busière B.: *Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity*. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 20, No. 3, 2002.
22. Chapuis R.P.: *Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 71, No. 3, 2012.
23. Szymkiewicz A., Kryczka A.: *Obliczanie współczynnika filtracji piasków i żwirów na podstawie krzywej uziarnienia: przegląd wzorów empirycznych*. Inżynieria Morska i Geotechnika, Vol. 32, Nr 2, 2011.
24. Chapuis R. P.: *Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, No. 5, 2004.
25. Carrier W. D.: *Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 11, 2003.
26. Head K. H.: *Manual of soil laboratory testing. Vol. 3: Effective stress tests*. Pentech Press Ltd, London, England 1986.
27. PN-88/B-04481: *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.
28. Pazdro Z., Kozerski B.: *Hydrogeologia Ogólna*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1990.