

Wstępna ocena opłacalności wydobycia odpadów nagromadzonych w zrehabilitowanych obiektach a koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym

Joanna Fajfer¹, Paulina Kostrz-Sikora²



J. Fajfer



P. Kostrz-Sikora

Initial cost effectiveness of extracting waste accumulated on the rehabilitation of waste facilities and the concept of circular economy. Prz. Geol., 70: 190–201.

Abstract. Extractive and processing waste accumulated on the landfills and heaps are potentially raw materials. The waste can be used in various areas of economy. Re-using of this waste should be regarded as an important element in the development of the circular economy model. The idea of circular economy is a maximum use of manufactured products until their useful function is completely exhausted. Cost effectiveness is a basic criterion for the implementation of this action plan. The total cost of rehabilitation of waste facilities is included into the components which will be taken into consideration before making a decision of using waste from facilities. This paper presents the conclusions from cost effectiveness of re-usable waste accumulated on three selected reclaimed sites.

Keywords: waste, cost effectiveness, anthropogenic resources, circular economy

Każda działalność człowieka jest nierozdzielnie związana z wytwarzaniem odpadów. Na przestrzeni minionych lat model gospodarki odpadami ulegał zmianie w zależności od uwarunkowań gospodarczych, ekonomicznych i prawnych. Początkowo procesom produkcji i eksploatacji surowców towarzyszyło generowanie ogromnych ilości odpadów, które ze względu na skalę prowadzonej działalności, poziom rozwoju gospodarczego i odmienne od obecnych standardy jakości środowiska najczęściej były składowane na zwałowiskach, hałdach, składowiskach lub w stawach osadowych.

Wraz z wdrażaniem działań ukierunkowanych na zrównoważony rozwój wprowadzono nową hierarchię gospodarowania odpadami, w której składowanie odpadów stanowiło najmniej pożądaną opcję ich zagospodarowania. W związku z tym zintensyfikowano prace dotyczące ponownego wykorzystania powstających odpadów poprzez ich odzysk i recykling. Zwrócono ponownie uwagę na potencjał surowcowy odpadów nagromadzonych na hałdach i zwałowiskach. Próby ich zagospodarowania podejmowano już w latach 70. XX w. oraz kontynuowano w latach późniejszych na większą skalę (Łukaszyc, Tabor, 1979; Nowok, Skiba, 1979; Pietras, 1979; Koziół, Uberman, 1996). W wyniku zmieniających się uwarunkowań prawnych, środowiskowych i gospodarczych duża liczba hałd, zwałowisk i składowisk odpadów pochodzących z działalności wydobywczej, przetwórczej i przemysłowej została rozebrana, a materiał nagromadzony na tych obiektach wykorzystano w różnych dziedzinach gospodarki jako substytut surowców naturalnych. Pomimo rosnącego zainteresowania wykorzystaniem składowanych odpadów, pozostały obiekty, na których zdeponowane odpady nie spełniały kryteriów technicznych i/lub ekonomicznych umożliwiających ich zagospodarowanie. Większość z tych obiektów została poddana rekultywacji technicznej i biolo-

gicznej (głównie w kierunku leśnym, ale również rekreacyjno-sportowym) i obecnie stanowią one trwały element krajobrazu. Z punktu widzenia dążenia do wdrożenia modelu gospodarki o obiegu zamkniętym, w którym odpad (powstający z bieżącej produkcji czy też nagromadzony na składowisku) ma stanowić produkt (surowiec wtórny) wielokrotnego użytku w tym samym lub innym procesie technologicznym, zrehabilitowane obiekty mogą się charakteryzować dużym potencjałem surowcowym.

W niniejszym artykule przeanalizowano możliwości wykorzystania odpadów nagromadzonych na wybranych zrehabilitowanych składowiskach, zwałowiskach, hałdach odpadów wydobywczych i przemysłowych jako substytutu surowców naturalnych, uwzględniając badania składu chemicznego tych odpadów oraz opłacalność finansową takiego przedsięwzięcia. Wskazano, czy nagromadzone odpady mogą być atrakcyjne pod względem surowcowym oraz czy nakłady poniesione na rekultywację mogą w przyszłości kompensować zarówno odzysk odpadów, jak i ponowne zagospodarowanie pozyskanego terenu, na którym zlokalizowana była hałda czy składowisko odpadów. Analizowano również rolę i znaczenie zrehabilitowanych obiektów, na których deponowano w przeszłości odpady wydobywcze i przemysłowe, w modelu gospodarki o obiegu zamkniętym.

GOSPODARKA O OBIEGU ZAMKNIĘTYM

Gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ) to model gospodarczy, w którym naczelną zasadą jest pozostawanie w obiegu wytworzonych produktów aż do momentu całkowitego wyczerpania ich funkcji użytecznych z uwzględnieniem minimalizacji powstających odpadów na rzecz wdrożenia procesów ich odzysku i recyklingu. Celem gospodarki o obiegu zamkniętym jest ochrona zasobów

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Górnośląski, ul. Królowej Jadwigi 1, 41-200 Sosnowiec; joanna.fajfer@pgi.gov.pl

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; paulina.kostrz-sikora@pgi.gov.pl

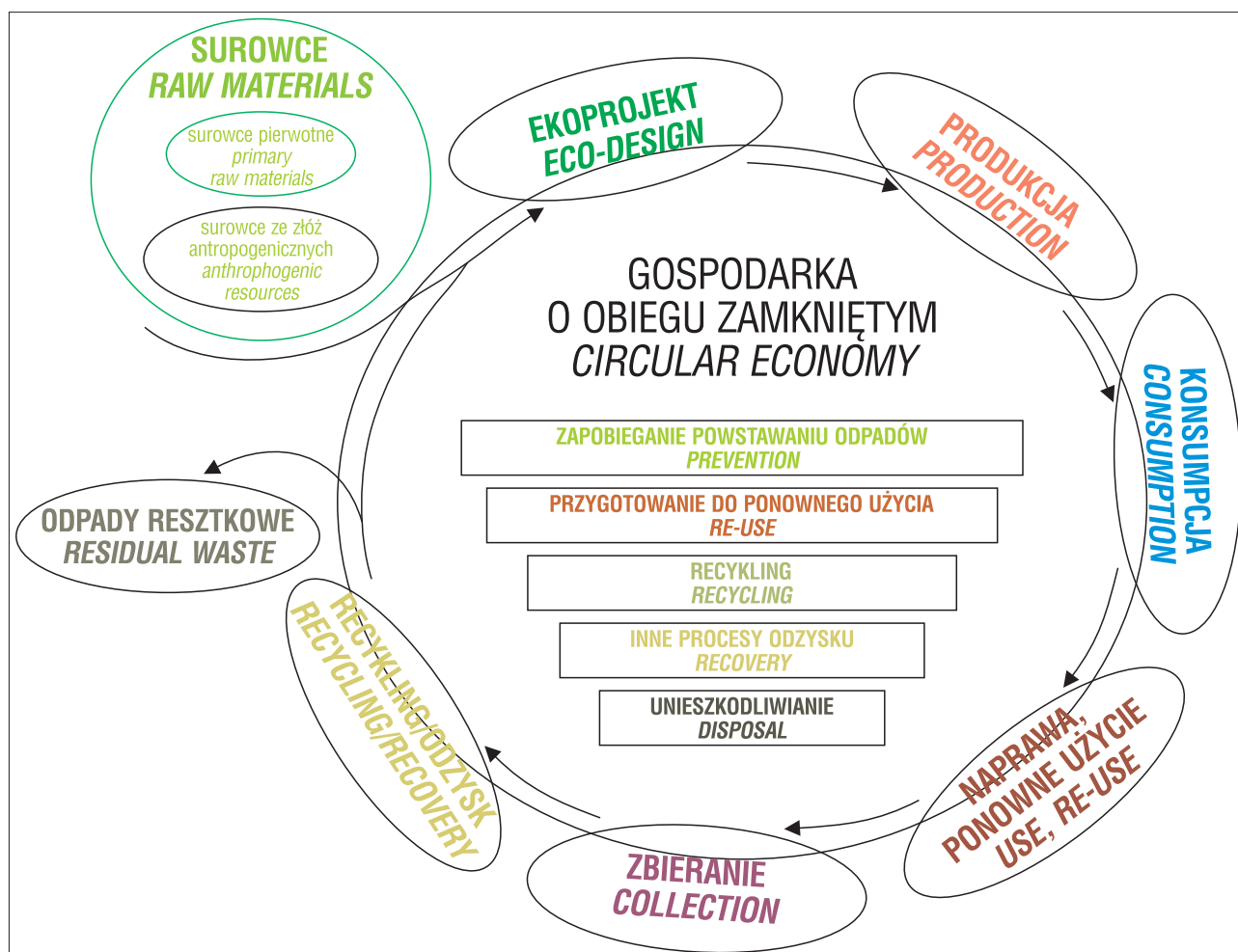
naturalnych środowiska na każdym etapie tzw. cyklu życia produktu – począwszy od projektowania, produkcji, poprzez konsumpcję, zbieranie bezużytecznych w danym procesie produktów i traktowanie ich jako surowców wtórnych w innych procesach produkcyjnych (Kulczycka, Pędziwiatr, 2019; Rozwadowska, 2020). Koncepcja GOZ w obszarze gospodarowania odpadami uwzględnia również hierarchię postępowania z odpadami, tj. zapobieganie ich powstawaniu, przygotowanie do ponownego użycia, recykling, odzysk oraz unieszkodliwianie, w tym – jako działania ostateczne – unieszkodliwianie poprzez składowanie (ryc. 1).

Na przestrzeni kilku ostatnich lat Unia Europejska wdrożyła szereg strategii działań, planów i pakietów dyrektyw mających na celu sukcesywne wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Zgodnie z nimi współczesna gospodarka powinna dążyć do przekształcenia łańcucha produkcyjnego w sposób gwarantujący jak najdłuższe zachowanie wartości produktów przy jednoczesnym ograniczaniu wytwarzania odpadów. Innymi słowy: powstające odpady powinny stanowić surowiec wtórny w tym samym lub innym procesie technologicznym, a na składowiska powinny być kierowane tylko i wyłącznie odpady, które nie stanowią surowców, czyli tzw. odpady resztkowe (Pieńkowski, Kośmicki, 2016; Zarębska, 2017; Kulczycka, 2018).

Realizowany w Unii Europejskiej proces transformacji gospodarki linearnej w kierunku gospodarki o obiegu

zamkniętym ma charakter długotrwały i został zapoczątkowany w 2014 r. Komunikatem Komisji *Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program „zero odpadów” dla Europy* (COM (2014) 398 final) (Komunikat, 2014). Dokument ten promował wdrażanie działań w zakresie zasobooszczędności, ograniczania powstawania odpadów, wykorzystania odpadów w charakterze zasobów oraz niskoemisyjności i konkurencyjności przedsiębiorstw. Szerszy wachlarz rozwiązań został przedstawiony w kolejnym, opublikowanym w grudniu 2015 r. dokumencie pn. *Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym* (COM (2015) 614 final) (Komunikat, 2015). Zamieszczono tam propozycje inicjatyw odnoszących się do wybranych branż gospodarki, które w długofalowej perspektywie czasu miały zapewnić ograniczenie składowania odpadów na korzyść wdrażania procesów ich recyklingu i odzysku. Duży nacisk położono na wykorzystanie surowców wtórnych w miejsce surowców naturalnych, co znalazło też swoje odzwierciedlenie w deklaracji rozpoczęcia prac nad zmianą przepisów w sprawie zniesienia statusu odpadu na rzecz możliwości uzyskania statusu surowca wtórnego. Cele wszystkich przedstawionych działań zostały ukierunkowane na oszczędność energii oraz zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych.

Stopniowa realizacja przyjętych założeń w kierunku wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym, a także nowe strategie unijne (m.in. Europejski Zielony Ład) przycy-



Ryc. 1. Model gospodarki o obiegu zamkniętym z uwzględnieniem surowców ze złóż antropogenicznych
Fig. 1. Circular economy model involving raw material of anthropogenic mineral deposits

niły się do konieczności aktualizacji Komunikatu z 2015 r. W 2020 r. ogłoszony został *Nowy plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy* (COM(2020) 98 final) (Komunikat, 2020a). Jego celem jest przyspieszenie transformacji na rzecz neutralnej dla klimatu, zasobooszczędnej i konkurencyjnej gospodarki, przy wykorzystaniu zapoczątkowanych w 2015 r. i systematycznie rozwijanych przedsięwzięć w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym. Motywem przewodnim ww. dokumentu jest zapobieganie powstawaniu odpadów oraz zmniejszanie ich ilości. Działania w tym zakresie powinny się skupiać na podniesieniu wartości powstających odpadów i ich substytucji w innych gałęziach przemysłu. Kluczowe będzie również zapewnienie dobrze funkcjonującego, wewnętrznego unijnego rynku wysokiej jakości surowców wtórnych.

Wsparciem dla GOZ jest także Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 10 lutego 2021 r. w sprawie nowego planu działania dotyczącego gospodarki o obiegu zamkniętym (2020/2077(INI) (Rezolucja, 2020). Dokument ten proponuje nowe ramy polityki zrównoważonych produktów w oparciu o następujące zasady: ograniczenie zużycia energii i zasobów; zachowanie wartości w gospodarce; zapobieganie powstawaniu odpadów; eliminowanie odpadów, substancji szkodliwych i zanieczyszczeń na etapie projektowania; utrzymywanie produktów i materiałów w użyciu i w obiegu zamkniętym; ochronę zdrowia ludzkiego; promowanie korzyści dla konsumentów oraz regenerację systemów naturalnych. Wymienione zasady powinny dotyczyć całej strategii w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym oraz strategii przemysłowej. Opracowana w 2020 r. (i zaktualizowana w 2021 r.) *Europejska Strategia Przemysłowa* (Komunikat, 2020b) definiuje cele w zakresie zielonego ładu, neutralności klimatycznej, cyfryzacji przedsiębiorstw oraz gospodarki o obiegu zamkniętym. Dokument ten koncentruje się na 6 strategicznych obszarach działań, których rozwój będzie szczególnie wspierany, a jednym z kluczowych obszarów są surowce.

W oparciu o założenia zawarte w ww. dokumentach opracowano i przyjęto pakiet dyrektyw zmieniających dotychczas obowiązujące przepisy odnoszące się do odpadów i zagadnień związanych z ich składowaniem.

Wytocznymi dla działań w zakresie wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym w Polsce jest uchwalona w 2019 r. *Mapa Drogowa transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym* (Uchwała, 2019). Dokument ten ma przyczynić się do realizacji głównych priorytetów wyznaczonych w obszarze GOZ, tj.: innowacyjności, wzmocnienia współpracy pomiędzy przemysłem i sektorem nauki, a w efekcie wdrażania innowacyjnych rozwiązań w gospodarce, stworzenia europejskiego rynku na surowce wtórne, zapewnienia wysokiej jakości surowców wtórnych oraz rozwoju sektora usług poprzez zmianę organizacji modelu funkcjonowania interesariuszy GOZ w układzie producent–konsument. Zagadnienia ujęte w dokumencie dotyczą pięciu obszarów tematycznych: Zrównoważonej produkcji przemysłowej (I), Zrównoważonej konsumpcji (II), Biogospodarki (III), Nowych modeli biznesowych (IV) oraz Wdrażania, monitorowania i finansowania GOZ (V), a jednym z działań przewidzianych do realizacji w ramach pierwszego z tych obszarów jest *Analiza potencjału otwierania i wykorzystywania hałd odpadów z przemysłów przetwórczego i wydobywczego oraz analiza składu morfologicznego odpadów wydobywczych i możliwości ich wy-*

korzystania w poszczególnych branżach polskiego przemysłu, a także zaproponowanie na tej podstawie zmian legislacyjnych (Uchwała, 2019).

Oznacza to, że nagromadzone na składowiskach odpady pochodzące z przemysłów przetwórczego i wydobywczego są postrzegane jako cenny surowiec dla procesów biznesowych ukierunkowanych na obieg cyrkulacyjny. Jako źródło tych odpadów należy również uwzględnić zrehabilitowane składowiska, zwałowiska i hałdy, mimo iż część z nich obecnie została zagospodarowana i pełni określone funkcje w przestrzeni publicznej (np. rekreacyjno-wypoczynkowe). Uzasadnieniem dla takiego podejścia jest fakt, że praktycznie do lat 90. XX w. składowanie odpadów było procesem kończącym cykl ich życia. Od deponowania odpadów odstępowano albo po zapełnieniu składowiska, zwałowiska czy hałdy, albo w wyniku zmiany procesów technologicznych i tylko w niektórych przypadkach obiekty te poddawano rekultywacji. Według stanu na koniec 2017 r. na składowiskach i w obiektach unieszkodliwiania odpadów wydobywczych nagromadzonych było ponad 1736,5 mln Mg odpadów. Powierzchnia zajęta przez niezrehabilitowane tereny składowania odpadów wynosiła 8376,8 ha (GUS, 2018). Wśród nagromadzonych odpadów najliczniejszymi pod względem ilościowym grupami (Rozporządzenie, 2020) były odpady pochodzące z procesów poszukiwania, wydobywania, fizycznej i chemicznej przeróbki rud i innych kopalin (grupa 01) (ok. 46%) oraz odpady z procesów termicznych (grupa 10) (32%, w tym 17% odpady z energetyki i ciepłownictwa i 15% odpady z procesów hutniczych).

Rozważając możliwość zagospodarowania tych odpadów, należy wziąć jednak pod uwagę, że ze względu na stosowane w przeszłości mało efektywne procesy produkcji, likwidację ze względów środowiskowych niektórych gałęzi przemysłu oraz długi okres zalegania odpadów w środowisku ich skład chemiczny może różnić się od składu odpadów powstających obecnie w tych samych branżach. Kwestie te należy rozpoznać, przeprowadzając badania odpadów pod kątem spełniania przez nie wymogów i specyfikacji technicznych, a także norm środowiskowych warunkujących bezpieczeństwo ich zastosowania. Każdorazowo zakres badań powinien być uzależniony od przyszłego potencjalnego kierunku zastosowania odpadów. Innym czynnikiem, który może wpływać na brak zainteresowania odpadami nagromadzonymi na obiektach zrehabilitowanych, jest aspekt finansowy. Związany jest on z nakładami poniesionymi na wykonanie rekultywacji obiektu (obejmującymi m.in. opracowanie i zatwierdzenie projektu rekultywacji oraz realizację prac związanych bezpośrednio z rekultywacją, w tym przemieszczanie mas odpadów w celu zabezpieczenia stateczności zboczy i wierzchołki obiektu, rozplantowanie mas ziemnych, nasadzenia roślin czy wyposażenie zrehabilitowanego obiektu w infrastrukturę rekreacyjną) oraz nakładami niezbędnymi na powtórne zagospodarowanie przestrzeni. Tym samym podjęcie decyzji o eksploatacji obiektu musi zostać poprzedzone wnikliwą analizą ekonomiczną.

OBSZAR BADAŃ

Badania przeprowadzono na zrehabilitowanych składowiskach odpadów przemysłowych, na których nagromadzono odpady z hutnictwa cynku i energetyki zawodowej oraz na hałdach i zwałowiskach odpadów wydobywczych

z górnictwa węgla kamiennego i górnictwa surowców skalnych. Były to: zwałowisko pocynkowe w Rudzie Śląskiej – Nowym Bytomiu (obiekt I), zwałowisko pocynkowe w Rudzie Śląskiej – Wirek (obiekt II), składowisko odpadów paleniskowych (popiołów i żużli) – kwatery 2 zrehabilitowane w Mysłowicach (obiekt III), składowisko odpadów pogórnicznych w Libiążu (stara część) (obiekt IV) oraz rekultywowane zwałowisko Z-1 w Radkowicach (obiekt V). Informacje o badanych obiektach zamieszczono w tabeli 1, zaś na rycinie 2 przedstawiono ich położenie na tle podziału administracyjnego kraju.

Obiekty zostały wybrane na podstawie przyjętych kryteriów, przede wszystkim analizy danych dotyczących stanu formalno-prawnego obiektów (w tym wydanych decyzji, pozwoleń), rodzajów nagromadzonych na nich odpadów oraz możliwości ustalenia właściciela i/lub władającego terenem. Kluczowymi warunkami wpływającymi na zakwalifikowanie obiektu do badań – oprócz przeprowadzenia rekultywacji – były zgoda właścicieli obiektów na prowadzenie prac, w tym pobór próbek odpadów do analiz laboratoryjnych oraz deklaracja udostępnienia informacji o ilościach nagromadzonych odpadów oraz poniesionych kosztach rekultywacji.

METODY I ZAKRES BADAŃ

Prace terenowe były prowadzone w listopadzie i grudniu 2019 r. Lokalizacja miejsca opróbowania została wyznaczona przy zastosowaniu probabilistycznej metody próbkowania – prostej próby losowej. Do poboru próbek wykorzystano świdry do wierceń ręcznych. Zaplanowana głębokość poboru próbek (max. do 1,5 m) była weryfikowana bezpośrednio w terenie. W większości przypadków, ze względu na dużą kompakcję odpadów będącą skutkiem przeprowadzonych prac rekultywacyjnych (etap techniczny rekultywacji), próbki pobierano z płytszych poziomów (do 1,0 m). Z każdego z nawierconych otworów, w których stwierdzono obecność odpadów, pobrano próbkę zbiorczą (o masie do 1 kg, składającą się z 5–9 próbek pojedynczych), którą następnie zapakowano do woreczka wykonanego z tkaniny bawełnianej. Łącznie uzyskano 34 próbki zbiorcze.

Oznaczenia składu głównego oraz zawartości pierwiastków śladowych (As, Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn, Sr, V, Bi, Ga, Hf, Nb, Rb, Th, U, Zr, Ce, La, Y, Br, Cd, Sn) wykonano metodą fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej z dyspersją fal (WD-XRF). Zawartość ogólnego węgla organicznego (TOC) i węgla całkowitego (TC) została określona metodą wysokotemperaturowego spalania z detekcją IR, natomiast straty prażenia – metodą wagową. Analizy chemiczne zostały wykonane w Laboratorium Chemicznym Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB), które ma akredytację PCA Nr 283.

WYNIKI ZREALIZOWANYCH PRAC

Zwałowisko pocynkowe w Rudzie Śląskiej – Nowym Bytomiu (obiekt I)

Dominującym składnikiem w badanych próbkach odpadów (pochodzących z procesu destylacji blendy prężonej oraz spiekanego tlenku cynku w muflach poziomych i nagromadzonych na zwałowisku żużli pocynkowych)

była krzemionka (SiO_2). Występowała ona w zakresie od 23,3 do 54,1%, podczas gdy jej średnie stężenie wynosiło 41,3%, a mediana 45,8%. Stężenie Fe_2O_3 zawierało się w przedziale od 15,5 do 36,5%, przy średniej wynoszącej 22,8% i medianie 19,3%. W odpadach występowały również CaO oraz Al_2O_3 . Obecność CaO stwierdzono w zakresie od 4,6 do 10,1% (mediana 6,8%), natomiast Al_2O_3 od 3,6 do 8,3% (mediana 6,6%). Ponadto w badanych próbkach stwierdzono także obecność MgO, MnO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 , TiO_2 , SO_3 i S. Związki te występowały w śladowych ilościach (ryc. 3A).

Najwyższe zawartości wśród metali odnotowano przede wszystkim dla cynku i ołowiu. Cynk, ze względu na źródło powstawania odpadu (hutnictwo cynku), stanowił jeden z głównych pierwiastków składu chemicznego. Jego stężenie zawierało się w przedziale od 31 855 do 68 763 ppm (tj. od 3,2 do 6,9%), przy średniej 47 163,89 ppm (4,7%). Ołów natomiast występował w przedziale od 6 731 do 22 562 ppm (tj. 0,7–2,2%). Jego średnia zawartość wynosiła 12 953 ppm (1,3%) natomiast mediana 10 221 ppm (1,0%). Uwagę zwraca również występowanie w badanych odpadach w podwyższonych zawartościach arsenu, miedzi i baru. Koncentracja arsenu zawierała się w przedziale od 889 do 6073 ppm, przy średniej 2779 ppm i medianie 2201 ppm, natomiast średnia zawartość miedzi wynosiła 3344 ppm, przy minimum 2326 ppm oraz maksimum 4292 ppm. Bar stwierdzono w zakresie od 492 ppm do 1651 ppm (mediana 1024 ppm). Udział badanych pierwiastków ziem rzadkich: ceru, itru oraz lantanu był śladowy. Stężenie ceru wynosiło od 16 do 139 ppm (mediana 86 ppm), itru od 19 do 28 ppm (mediana 26 ppm), a lantanu od 6 do 27 ppm (mediana 11 ppm). Pozostałe badane pierwiastki występowały w śladowych ilościach lub poniżej granicy oznaczalności (ryc. 3B).

Zwałowisko pocynkowe w Rudzie Śląskiej – Wirku (obiekt II)

Głównym składnikiem badanych odpadów nagromadzonych na zwałowisku żużli pocynkowych była krzemionka (SiO_2). Występowała ona w przedziale od 37,1 do 55,8%, zaś jej średnia zawartość wynosiła 47,3%. Fe_2O_3 stwierdzono w przedziale od 9,3 do 21,6% (przy średniej 16,3% i medianie 16,8%). CaO oznaczono w granicach od 2,5 do 10,2% (przy medianie 5,8%), natomiast Al_2O_3 w przedziale od 4,2 do 7,9%, przy średniej zawartości wynoszącej 6,1%. Ponadto w próbkach stwierdzono obecność MgO, MnO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 , TiO_2 , SO_3 i S. Związki te występowały w śladowych ilościach (ryc. 4A).

W przypadku badanych metali najwyższe stężenia stwierdzono dla cynku i ołowiu. Cynk stanowił główny pierwiastek składu chemicznego odpadów, co wynikało z procesów technologicznych powstawania odpadów – hutnictwo cynku. Jego zawartość zawierała się w przedziale od 40 528 do 72 740 ppm (tj. 4,0–7,2%), przy średniej 50 417,8 ppm (5,0%). Średnie stężenie ołowiu wynosiło 10 789 ppm (1%): minimalnie stwierdzono 4306 ppm (0,4%) tego pierwiastka, a maksymalnie 17 119 ppm (1,7%). W badanych próbkach obecne były bar, miedź i arsen. Koncentracja baru zawierała się w przedziale od 637 do 7248 ppm (przy medianie 2406 ppm i średniej 3429 ppm), zawartość miedzi odnotowano w granicach od 2739 ppm do 4369 ppm (mediana 3172 ppm i średnia 3322 ppm). Natomiast średnia zawartość arsenu wynosiła 1416,8 ppm

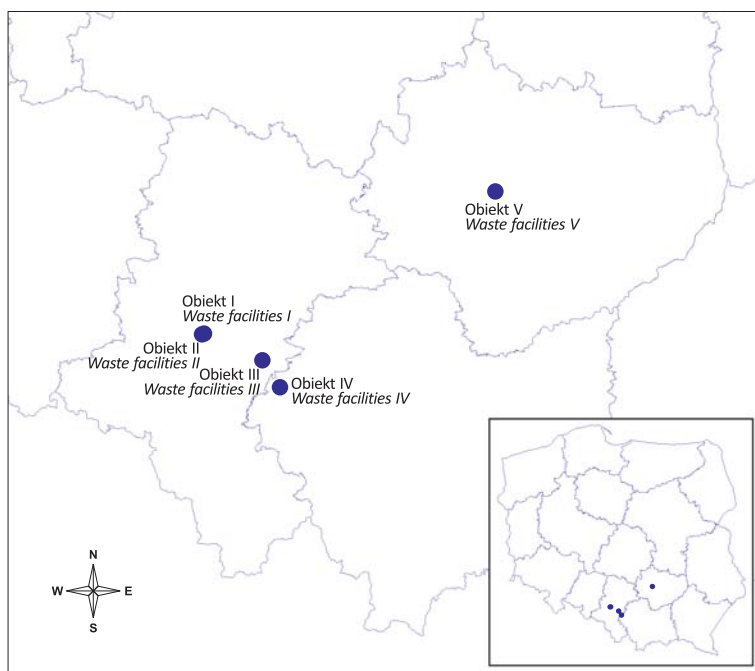
Tab. 1. Zestawienie informacji o badanych obiektach

Table 1. Summary of information about the studied waste reclamation facilities

Obiekt <i>Waste facility</i>	Rodzaj nagromadzonych odpadów <i>Type of accumulated waste</i>	Rok zakończenia rekultywacji <i>Year of rehabilitation</i>	Kierunek rekultywacji <i>Method of rehabilitation</i>	Powierzchnia zrehabilitowana [ha] <i>Rehabilitation area [ha]</i>	Ilość nagromadzonych odpadów <i>Quantity of accumulated waste</i>	Sposób zagospodarowania obiektu <i>Method of land development</i>
Obiekt I <i>Waste facility I</i>	żużle z pieców destylacyjnych, które pochodziły z procesu destylacji blendy prażonej oraz spiekanego tlenku cynku w muflach poziomych <i>slags from distillation furnaces from the distillation process of roasted blende and sintered zinc oxide in horizontal muffles</i>	2011	rekreacyjny <i>recreation</i>	2,0	ok. 70 tys. m ³ <i>about 70,000 cubic metres</i>	obiekt zagospodarowany; zieleni urządzona: roślinność niska (trawy) i częściowo wysoka (enklawy drzew); wydzielone ścieżki spacerowe, obecność infrastruktury rekreacyjnej (ławki) <i>developed waste facilities, insulating plants, low (grass) and partially high (concentration of trees) plants, separate walking paths, presence of recreational infrastructure (benches)</i>
Obiekt II <i>Waste facility II</i>	żużle z pieców destylacyjnych, które pochodziły z procesu destylacji blendy prażonej oraz spiekanego tlenku cynku w muflach poziomych <i>slags from distillation furnaces from the distillation process of roasted blende and sintered zinc oxide in horizontal muffles</i>	2019	rekreacyjny <i>recreation</i>	6,5	ok. 385,3 tys. m ³ <i>about 385,300 cubic metres</i>	obiekt zagospodarowany; zieleni urządzona: roślinność niska (trawy, krzewy) i wysoka (pojedyncze drzewa); obecność infrastruktury rekreacyjnej: ławki, urządzenia sportowe, ścieżki rowerowe i spacerowe, plac zabaw, ścianka wspinaczkowa, górką saneczkowa, tor do jazdy na BMX, górką widokowa, ścieżka historyczna i edukacyjna <i>developed waste facilities, plants, presence of recreational infrastructure (benches), sports equipment, bicycle and walking paths, playground, climbing wall, toboggan run, BMX track, viewing hill, historical and educational path</i>
Obiekt III <i>Waste facility III</i>	mieszanka popiołowo-żużlowa oraz żużle ze spalania węgla kamiennego (głównie) <i>ash-slag mixture and coal slag (mainly)</i>	2001 (kwarta 2) <i>(section 2)</i>	zieleni izolacyjna <i>insulating plants</i>	64,0	ok. 12 806,7 tys. Mg <i>about 12,806,700 tones</i>	obiekt porośnięty roślinnością niską (trawy) i częściowo wysoką (pojedyncze drzewa i ich kompleksy) <i>waste facilities covered by low (grass) and partially high (single and concentration of trees) vegetation</i>
Obiekt IV <i>Waste facility IV</i>	odpady wydobywcze pochodzące zarówno z robót udostępniających (tzw. skała płonna), jak również z procesów przerobczych (tzw. odpady przerobcze) <i>mining waste (e.g. rock waste) and tailings (e.g. processing waste)</i>	1998	rekreacyjno-parkowy <i>recreation-park</i>	17	b.d. <i>n.a.</i>	obiekt w przeszłości zagospodarowany (ścieżki spacerowe, ławki, boisko, lądowisko dla helikopterów), obecnie uległ naturalnej sukcesji roślinnej: roślinność niska (trawy, krzewy) i wysoka (pojedyncze drzewa i ich skupiska) <i>developed waste facilities in the past (walking paths, benches, playground, helipad), currently natural plant succession, low (grass and shrubs) and partially high (single and concentration of trees) vegetation</i>
Obiekt V <i>Waste facility V</i>	odpady wydobywcze (z prac udostępniających złoża dolomitu) <i>mining waste</i>	2021*	przyrodniczo-rekreacyjne <i>natural-recreation</i>	2,6	ok. 320 tys. Mg <i>about 320,000 tones</i>	teren pozbawiony roślinności, powierzchnia wyrównana <i>area devoid of vegetation, levelled surface</i>

* Podczas prowadzenia prac terenowych obiekt był w trakcie rekultywacji.

* During the field work, the waste facility was under rehabilitation.

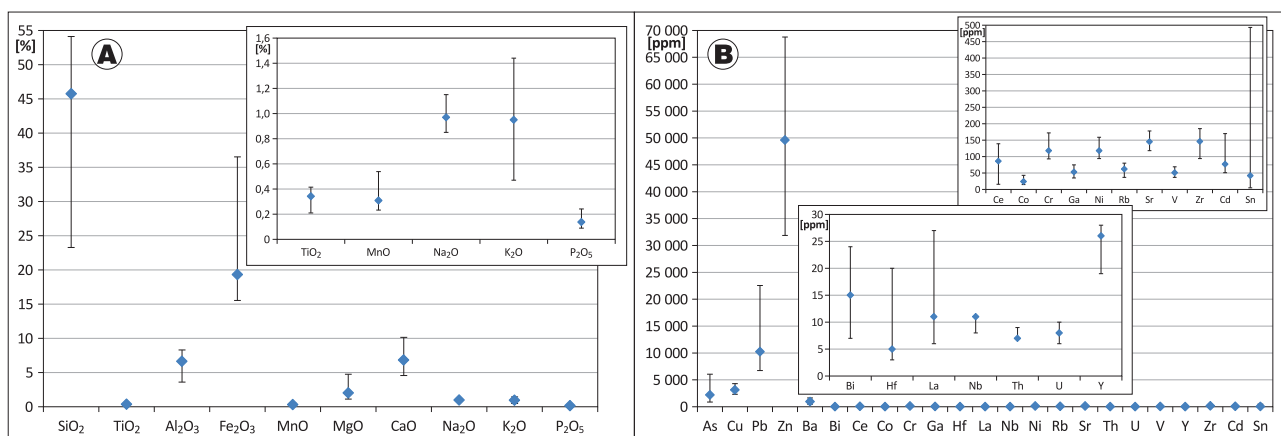


Ryc. 2. Lokalizacja badanych obiektów
Fig. 2. Location of waste facilities under study

(przy medianie 1674,5 ppm). Udział badanych pierwiastków ziem rzadkich: ceru, itru oraz lantanu był śladowy. Stężenie ceru wynosiło od 32 do 142 ppm (mediana 95 ppm), itru od 24 do 37 ppm (mediana 28 ppm), a lantanu od 14 do 21 ppm (mediana 17 ppm). Pozostałe badane pierwiastki występowały w śladowych ilościach lub poniżej granicy oznaczalności (ryc. 4B).

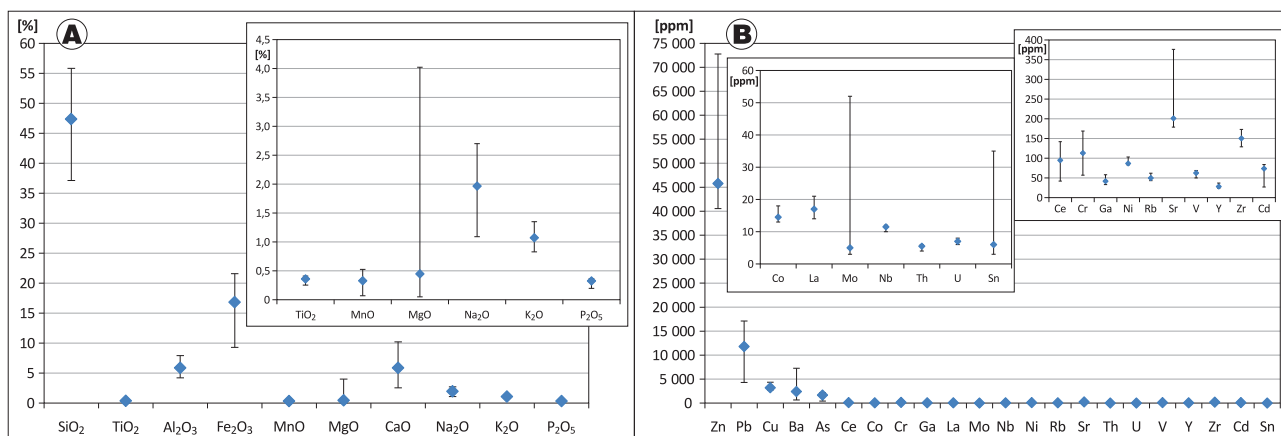
Składowisko odpadów paleniskowych (popiołów i żużli) – kwatera 2 zreultywowana w Mysłowicach (obiekt III)

W składzie chemicznym odpadów (popiołów i żużli) pochodzących z obiektu III dominujący udział miały glinokrzemiany (SiO_2 i Al_2O_3), które łącznie stanowiły ponad 70%. Średnia zawartość SiO_2 wynosiła 53,6% (przy medianie na tym samym poziomie), a Al_2O_3 – 19,7% (przy minimum 15,9% i maksimum 24,4%). Fe_2O_3 oznaczono w granicach od 7,0 do 15,4% przy medianie 10,5%. Średnie stężenie CaO wynosiło 3,8%, a jego wartości zawierały się w przedziale od 3,4 do 5,2% (ryc. 5A). Ponadto w próbkach oznaczono straty prażenia



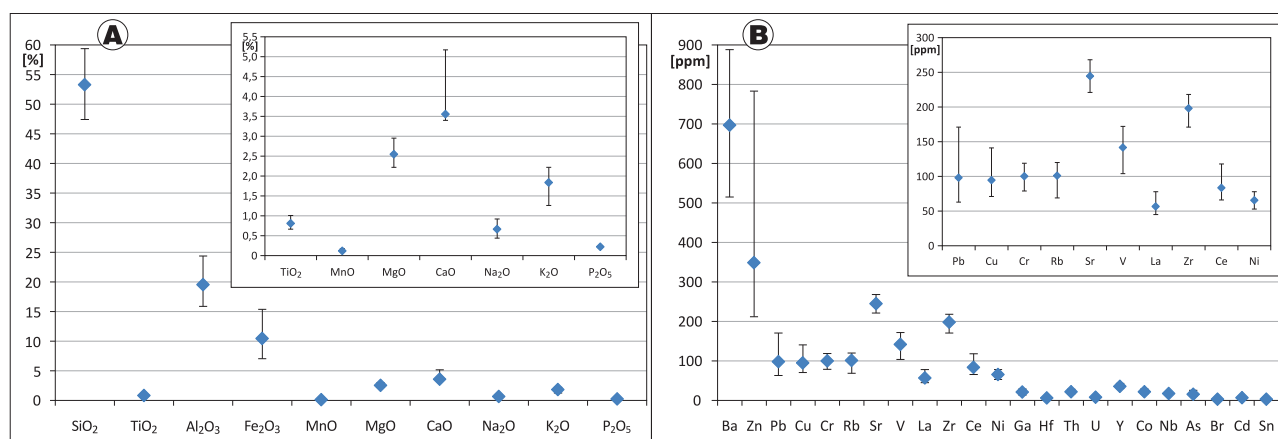
Ryc. 3. Wartości mediany oraz minima i maksima dla składu chemicznego [%] (A) oraz zawartości badanych pierwiastków [ppm] (B) w próbkach odpadów z obiektu I

Fig. 3. Median, minimum and maximum values of the chemical analysis [%] (A) and the concentration of the examined parameters [ppm] (B) in waste samples from waste facility I



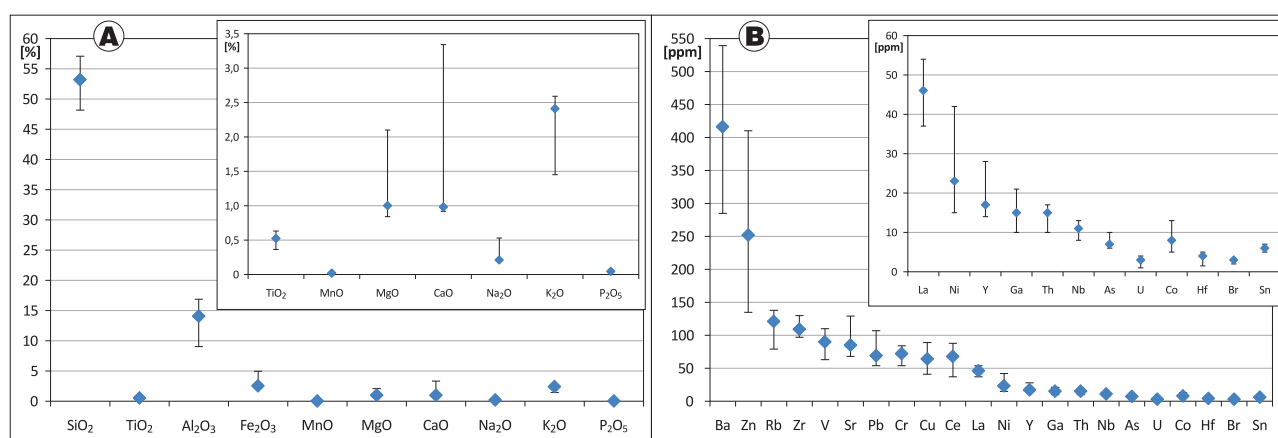
Ryc. 4. Wartości mediany oraz minima i maksima dla składu chemicznego [%] (A) oraz zawartości badanych pierwiastków [ppm] (B) w próbkach odpadów z obiektu II

Fig. 4. Median, minimum and maximum values of the chemical analysis [%] (A) and the concentration of the examined parameters [ppm] (B) in waste samples from waste facility II



Ryc. 5. Wartości mediany oraz minima i maksima dla składu chemicznego [%] (A) oraz zawartości badanych pierwiastków [ppm] (B) w próbkach odpadów z obiektu III

Fig. 5. Median, minimum and maximum values of the chemical analysis [%] (A) and the concentration of the examined parameters [ppm] (B) in waste samples from waste facility III



Ryc. 6. Wartości mediany oraz minima i maksima dla składu chemicznego [%] (A) oraz zawartości badanych pierwiastków [ppm] (B) w próbkach odpadów z obiektu IV

Fig. 6. Median, minimum and maximum values of the chemical analysis [%] (A) and the concentration of the examined parameters [ppm] (B) in waste samples from waste facility IV

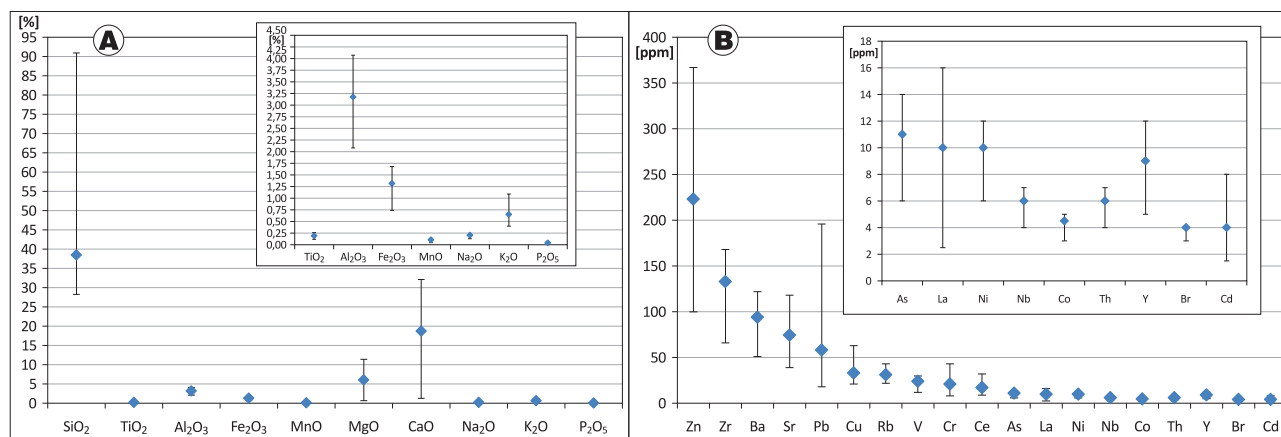
oraz zawartość węgla organicznego i węgla całkowitego. Straty prażenia wynosiły średnio 5,5%. Zawartość węgla organicznego wahała się w granicach 0,7–3,4% (średnia 2,0%), a węgla całkowitego od 0,9 do 3,7% (przy średniej 2,3%).

W badanych odpadach największe stężenia stwierdzono dla baru, cynku i strontu. Zawartość baru zawierała się w przedziale od 515 do 888 ppm (przy medianie 696 ppm). Cynk występował w zakresie od 212 do 778 ppm (średnio jego stężenie wynosiło 391 ppm). Natomiast średnie stężenie strontu wynosiło 246 ppm (przy minimum 221 ppm i maksimum 228 ppm). Zwrócono uwagę na zawartość wanadu i cyrkonu w badanych próbkach. Koncentracja wanadu osiągała maksymalną wartość na poziomie 172 ppm, zaś mediana wynosiła 142 ppm, natomiast cyrkon występował w przedziale od 171 do 218 ppm. Udział badanych pierwiastków ziem rzadkich: ceru, itru oraz lantanu, był śladowy. Maksymalnym stężeniem wśród badanych pierwiastków odznaczał się cer, którego zawartość stwierdzono w przedziale od 66 do 118 ppm (mediana 84 ppm). Koncentracja lantanu zawierała się w granicach od 78 ppm (mediana 56 ppm), natomiast itru od 30 do 43 ppm (mediana 36 ppm). Pozostałe badane pierwiastki występowały w śladowych ilościach lub poniżej granicy oznaczalności (ryc. 5B).

Składowisko odpadów pogórnich (stara część) w Libiążu (obiekt IV)

Podstawowymi składnikami odpadów wydobywczych były SiO_2 oraz Al_2O_3 (ryc. 6A). SiO_2 występował w przedziale od 48,2 do 57,1% (mediana 53,2%). Natomiast średnia zawartość Al_2O_3 wynosiła 14,1% (przy minimum 9,1% a maksimum 16,9%). Zawartość siarki oznaczono w zakresie od 0,3 do 0,6% (przy średniej 0,2%). Straty prażenia wynosiły średnio 23,4%. Ponadto badane próbki odpadów zawierały węgiel organiczny w przedziale od 10,2 do 14,0% (średnia 11,5%) oraz węgiel całkowity w przedziale od 10,7 do 14,1% (przy średniej 11,9%).

Wśród badanych pierwiastków największymi zawartościami charakteryzowały się bar, cynk, rubid i cyrkon. Stężenia baru prezentowały zakres od 285 do 539 ppm przy medianie 416 ppm. Cynk występował w przedziale od 135 do 410 ppm, natomiast rubid i cyrkon odpowiednio od 79 do 138 ppm (średnia 117 ppm) i od 97 do 130 ppm (średnia 111 ppm). Pozostałe badane pierwiastki charakteryzowały się wartościami na zbliżonym poziomie poniżej 100 ppm (ryc. 6B). Udział badanych pierwiastków ziem rzadkich oraz toru był śladowy (wśród badanych pierwiastków największym udziałem charakteryzował się cer do 88 ppm,



Ryc. 7. Wartości mediany oraz minima i maksima dla składu chemicznego [%] (A) oraz zawartości badanych pierwiastków [ppm] (B) w próbkach odpadów z obiektu V

Ryc. 7. Median, minimum and maximum values of the chemical analysis [%] (A) and the concentration of the examined parameters [ppm] (B) in waste samples from waste facility V

natomiast lantan osiągał maksymalne wartości nie przekraczające 54 ppm, a itr 28 ppm).

Zwałowisko Z-1 w Radkowicach (obiekt V)

Głównym składnikiem odpadów zdeponowanych na zwałowisku był SiO₂ (ryc. 7A), którego średnia zawartość wynosiła 49,5% (przy minimum 28,2% i maksimum 90,9%), natomiast mediana 38,5%. Średnia zawartość CaO wynosiła 17,0% przy wartości mediany na poziomie 18,7%.

Wśród badanych pierwiastków w największych ilościach stwierdzono występowanie: cynku, cyrkonu, baru, ołowiu i strontu (ryc. 7B). Stężenia cynku zawierały się w zakresie od 100 do 367 ppm przy medianie 223 ppm. Cyrkon występował w zakresie od 66 do 168 ppm (średnio 124 ppm), bar charakteryzował się stężeniami na poziomie od 51 do 122 ppm, ołów od 18 do 196 ppm, a stront od 39 do 118 ppm. Pozostałe badane pierwiastki występowały w śladowych ilościach lub poniżej granicy oznaczalności.

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA ODPADÓW

Rozpoznanie składu chemicznego odpadów nagromadzonych na badanych obiektach jest istotne z punktu widzenia określenia potencjalnych możliwości ich zagospodarowania oraz ustalenia zakresu dalszych, już znacznie bardziej szczegółowych analiz warunkujących zastosowanie konkretnego procesu odzysku. Liczne prace badawczo-naukowe wskazują, że odpady wydobywcze i odpady energetyczne (głównie z bieżącej produkcji, ale także nagromadzone na składowiskach, zwałowiskach i hałdach) mają szerokie zastosowanie jako substytut surowców w różnych gałęziach przemysłu, np. w drogownictwie, budownictwie inżynieryjnym i hydrotechnicznym, górnictwie, rolnictwie, a także w niwelacji i rekultywacji terenów antropogenicznie przekształconych.

W drogownictwie odpady wydobywcze (z górnictwa węgla kamiennego i z górnictwa skalnego), a także odpady z energetyki mogą być wykorzystywane m.in. do budowy skarp i nasypów, konstrukcji nawierzchni drogowych, do podbudów stabilizowanych mechanicznie lub spoiwami, jako warstwy wiążące i ściernalne (Kozioł, Uberman, 1996; Wowkonowicz i in., 2018). W budownictwie natomiast

szerokie zastosowanie znajdują odpady energetyczne, głównie w produkcji betonów i półfabrykatów betonowych, produkcji ceramiki budowlanej (jako dodatek schudzający lub surowiec podstawowy) (Pietras, 1979) czy produkcji kruszywa popiołowo-żużlowego (Zielińska, Pacocha, 2019). Odpady wydobywcze oraz odpady energetyczne (popioły lotne) stosowane są m.in. do doszczelniania starych zrobów w profilaktyce przeciwpożarowej i jako składnik mieszanin podsadzkowych (Kugiel, Piekło, 2012; Drobek i in., 2016) w górnictwie. Ponadto odpady wydobywcze są wykorzystywane do likwidacji zbędnych wyrobisk, w tym szybów oraz do wzmocnienia i stabilizacji wyrobisk górniczych (Palarski i in., 1987). Natomiast w rolnictwie odpady wydobywcze z górnictwa skalnego stosuje się do produkcji mączek skalnych poprawiających właściwości gleb poprzez wzbogacenie ich m.in. w wapń, potas i magnez, produkcji granulatu wspomagającego uprawę roślin (Kaźmierczak i in., 2019). Popioły lotne z energetyki konwencjonalnej są wykorzystywane do kondycjonowania (Wójcik i in., 2017) i nawożenia gleb (Pietras, 1979).

Odpady wytwarzane w hutnictwie cynku nagromadzone na zwałowiskach w latach 70. XX w. były wykorzystywane w celu odzysku zawartych w nich metali w funkcjonujących hutach cynku (Nowok, Skiba, 1979). Obecnie brak jest technologicznych i ekonomicznych możliwości zastosowania tego rodzaju odpadu w tym kierunku, co nie oznacza, że w przyszłości takie możliwości nie będą dostępne i opłacalne ekonomicznie.

Uzyskane wyniki badań składu chemicznego oraz zawartości pierwiastków w odpadach pochodzących z analizowanych obiektów, w powiązaniu z analizą opisanych w literaturze możliwości i sposobów wykorzystania odpadów przemysłowych, wskazują, że badane odpady stanowią potencjalny substytut surowców naturalnych. Ich zastosowanie może obejmować: odzysk metali (odpady z obiektu I i II), produkcję kruszywa (odpady z obiektu I, II, III, IV i V), podbudowy dróg (odpady z obiektu III, IV i V), niwelację terenu (obiekty III, IV i V), doszczelnianie starych zrobów i profilaktykę przeciwpożarową w górnictwie (odpady z obiektu III i IV). Należy jednak zaznaczyć, że konkretne zastosowanie powinno być poparte analizami wpływu na środowisko danego rodzaju odpadów oraz spełnieniem warunków norm i specyfikacji technicznych.

W przypadku wykorzystania odpadów poza instalacjami dodatkowym warunkiem jest spełnienie zapisów określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 11 maja 2015 r. w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami (Rozporządzenie, 2015). Poza wymienionymi uwarunkowaniami technicznymi, środowiskowymi i prawnymi, podstawą zastosowania danego rodzaju odpadów w konkretnym kierunku odzysku jest spełnienie warunków opłacalności ekonomicznej, która wskazuje na zasadność wydobycia nagromadzonych odpadów na zrehabilitowanych obiektach w aspekcie już poniesionych nakładów na ich rekultywację.

OPLACALNOŚĆ WYKORZYSTANIA SUROWCÓW ANTROPOGENICZNYCH

Analizy ukierunkowane na określenie opłacalności wykorzystania surowców antropogenicznych nagromadzonych na zrehabilitowanych składowiskach, zwalówiskach i hałdach przeprowadzono dla trzech spośród pięciu zbadanych obiektów. W przypadku pozostałych z nich nie udało się pozyskać kompletu deklarowanych informacji, które stanowiły niezbędną składową w opracowanym modelu obliczeniowym.

Przegląd szerokiego wachlarza metod oceny efektywności ekonomicznej (w szczególności metod dynamicznych: metoda wartości bieżącej netto i metoda wewnętrznej stopy zwrotu) wskazuje, że niezależnie od zastosowanego sposobu jest to proces wymagający pełnego dostępu do obszernego zakresu danych rzeczywistych umożliwiających rzetelne przedstawienie zależności pomiędzy jednostkowymi nakładami inwestycyjnymi lub jednostkowymi kosztami eksploatacji a wydajnością inwestycji, w tym również decydującymi o jej opłacalności kosztami środowiskowo-społecznymi, które ostatecznie wyłączone z dalszych analiz. Badane obiekty nie zagrażały zdrowiu i życiu ludzi, ponieważ były już zrehabilitowane, zakres rozważanych do przeprowadzenia prac nie miałby bezpośredniego przełożenia na uzyskanie efektu estetyczno-rekreacyjno-środowiskowego. W obszarze kosztów środowiskowo-społecznych wartość dodaną może stanowić jedynie analizowana możliwość wykorzystania nagromadzonych na badanych obiektach odpadów i związany z nią aspekt edukacyjny (w tym propagowanie gospodarki o obiegu zamkniętym i odzysk odpadów), przy czym są one bardzo trudne nie tylko do zwaloryzowania, ale i skwantyfikowania, stąd też pominięto je w dalszych rozważaniach.

Mając powyższe na względzie, a także uwzględniając pozyskane informacje o poszczególnych obiektach, dla określenia opłacalności potencjalnego wykorzystania odpadów nagromadzonych na badanych obiektach jako źródła substytutów surowców naturalnych, przeprowadzono symulację uwzględniającą trzy kluczowe elementy: koszty przeprowadzonej w przeszłości rekultywacji i zagospodarowania terenu (KR), koszty związane z wdrożeniem i realizacją inwestycji (KI) oraz możliwość sprzedaży odzyskanych odpadów za cenę gwarantującą pokrycie poniesionych wydatków (OI).

Koszty rekultywacji mają istotne znaczenie w sytuacji, w której inwestorem jest ten sam podmiot, który uprzednio przeprowadził rekultywację – w tym przypadku koszty te stanowią składową kosztów inwestycji. Gdy koszty rekultywacji nie zostały poniesione przez inwestora, prawdopodobne jest że zostaną one wliczone w całości lub częściowo

w koszty uzyskania tytułu prawnego do terenu, na którym znajduje się obiekt.

Koszty inwestycji obejmują wydatki administracyjne, koszty analiz laboratoryjnych i koszty projektowe, bezpośrednio koszty realizacji przedsięwzięcia, w szczególności: koszty osobowe, koszty usług (np. leasing sprzętu) i/lub nakłady na środki trwałe (zakup maszyn i urządzeń) czy zakup surowców i materiałów (np. energia elektryczna), koszty dystrybucji odzyskanych odpadów, a także koszty restytucji środowiska (rekultywacji i zagospodarowania terenu).

Uwzględniając kryterium wielkościowe analizowanych obiektów oraz zakres pozyskanych informacji, przyjęto, że warunek opłacalności inwestycji polegającej na odzyskaniu zdeponowanych odpadów będzie spełniony, gdy różnica pomiędzy możliwą do uzyskania ceną ich sprzedaży a poniesionymi nakładami inwestycyjnymi będzie większa od zera.

Dla trzech badanych obiektów, dla których uzyskano informację o kosztach rekultywacji, wykonano symulację obliczeń mającą na celu określenie spełnienia ww. warunku. W pierwszym etapie w kalkulacji uwzględniono poniesione koszty rekultywacji obiektu, w tym m.in. koszty dokumentacji projektowej, robót budowlanych oraz inne (np. koszty nadzoru autorskiego/ inwestorskiego). Następnie oszacowano koszty inwestycji, na które składały się koszty projektowe związane m.in. z pobraniem próbek odpadów i badaniami ich składu chemicznego oraz przygotowaniem dokumentacji, koszty administracyjne (związane przede wszystkim z uzyskaniem stosownych decyzji umożliwiających realizację przedsięwzięcia), koszty wydobycia surowca wtórnego (w tym koszty najmu lub – w jednym przypadku potraktowanym jako wariant alternatywny – zakupu sprzętu, koszty jego obsługi, analizy laboratoryjne wskazujące na spełnianie norm technicznych i standardów jakości środowiska oraz transport odpadów), a także koszty uporządkowania terenu po eksploatacji obiektu.

W przypadku prac związanych z wydobyciem surowca i uporządkowaniem terenu obliczenia wykonano, przyjmując koszty jednostkowe pracy i najmu sprzętu (koparki, samochodu samowładowczego, spycharki) pochodzące z publikacji *Informacja o stawkach robocizny kosztorysowej oraz cenach pracy sprzętu budowlanego IRS* (Informacja, 2020). Stanowiły one sumę średnich kosztów najmu i średnich kosztów pracy sprzętu odniesionych do jednej maszynogodziny i zawierały takie składniki kalkulacyjne jak: koszty amortyzacji, koszty napraw i obsług technicznych, koszty obsługi etatowej, koszty paliw, smarów i olejów oraz koszty ogólne i zysk bazy sprzętowej. Koszt jednostkowy pracy i najmu kruszarki szczękowej oszacowano na podstawie publikowanych w Internecie ogłoszeń i ofert, przyjmując wartość średnią. Koszt ten uwzględniał również transport maszyny do/z miejsca jej pracy.

Wydajność eksploatacyjną spycharki [m^3/h] obliczono wg wzoru (Martinek i in., 2010, 2015):

$$W_e = \frac{60}{t} \times q \times S_n \times S_s \times S_w$$

gdzie:

W_e – wydajność eksploatacyjna spycharki [m^3/h],
 t – czas cyklu roboczego pracy spycharki [min],

q – efektywna pojemność lemiesza [m^3],
 S_n – współczynnik napełnienia lemiesza zależny od kategorii gruntu i sposobu przemieszczania gruntu,
 S_s – współczynnik spoiwości gruntu równy odwrotności współczynnika spulchnienia $S_s = 1/S_{sp}$,
 S_w – współczynnik wykorzystania czasu roboczego spycharki.

Zarówno dla etapu związanego z wykonaniem prac przygotowawczych do wydobywania surowca wtórnego, jak i prac polegających na uporządkowaniu terenu po wydobywaniu odpadów przyjęto schemat pracy spycharki uwzględniający wielkość terenu, na którym będzie pracowała maszyna. Wartość uwzględnionego w obliczeniach współczynnika napełnienia lemiesza gruntem przy przemieszczaniu uzależniona była od kategorii gruntu (grunty sypkie/spoiste), jak też rodzaju lemiesza (czołowy/nastawny) i kierunku pracy maszyny (poziomy/na pochyłości). Z kolei przyjęta wartość współczynnika wykorzystania czasu roboczego spycharki była uwarunkowana charakterem prac przewidzianych do realizacji.

Wydajność eksploatacyjną koparki [m^3/h] obliczono wg wzoru (Martinek i in., 2010, 2015):

$$W_e = 60 \times n \times Q \times S_n \times S_s \times S_t \times S_{w1} \times S_{w2}$$

gdzie:

W_e – wydajność eksploatacyjna koparki [m^3/h],
 n – liczba cykli roboczych [1/min],
 Q – pojemność geometryczna naczynia (łyżki) [m^3],
 S_n – współczynnik napełnienia naczynia (łyżki) zależny od jej wielkości, kategorii i rodzaju gruntu,
 S_s – współczynnik spoiwości gruntu równy odwrotności współczynnika spulchnienia $S_s = 1/S_{sp}$,
 S_t – współczynnik trudności odspojenia gruntu,
 S_{w1} – współczynnik wykorzystania czasu roboczego (wprowadzony w celu uwzględnienia przerw technologicznych przy załadunku na środki transportowe oraz zamiany stanowisk pracy koparki),
 S_{w2} – współczynnik wykorzystania czasu roboczego koparki w okresie zmiany roboczej.

Przyjęto, że prace będą wykonywane przy wykorzystaniu maszyny typu podsiębiernej. W obliczeniach uwzględniono optymalną dla ilości odpadów nagromadzonych na obiekcie pojemność geometryczną naczynia (łyżki). Zarówno przyjęty współczynnik spoiwości gruntu, współczynnik trudności odspojenia gruntu, jak i współczynnik

wykorzystania czasu roboczego powiązано z przyjętą kategorią gruntu. Założono również bezpośredni załadunek urobku na wozy dostawcze, co z kolei wpłynęło na obliczoną wartość współczynnika wykorzystania czasu roboczego koparki w okresie zmiany roboczej.

Dla obiektu III wykonano dwa warianty obliczeń: wariant I (podstawowy; analogiczny jak w przypadku obiektu I i II) i alternatywny względem niego wariant II, który zakładał zakup koparki oraz samochodu samowyladowczego. Wariantowość obliczeń wynikała z faktu odmiennej sytuacji obiektu w zakresie tytułu prawnego i miała na celu rozpoznanie, jak zmienia się zakres opłacalności wydobywania odpadów w zależności od sposobu dysponowania sprzętem (wynajem lub zakup). Koszty zakupu maszyn oszacowano, biorąc pod uwagę oferty sprzedaży zamieszczone w Internecie. W kalkulacji kosztów pracy koparki (przy założeniu ciągłego systemu pracy maszyny, do momentu całkowitego wybrania nagromadzonych odpadów) uwzględniono roczną stawkę amortyzacji sprzętu (20%), czas wyłączenia maszyny z eksploatacji w skali roku, koszty obsługi etatowej, paliwa i materiałów pomocniczych oraz ogólne nakłady na zaplecze sprzętowe. Przy obliczeniu kosztów pracy samochodu samowyladowczego uwzględniono koszty amortyzacji degresywnej, ubezpieczenia, wydatki na kartę opłaty drogowej i podatek od środków transportu, przeglądu technicznego oraz obsługi i napraw, koszty legalizacji tachografu, koszty administracyjne i narzuty, a także wydatki na paliwo i opony.

W kalkulacji uwzględniono przede wszystkim informacje dotyczące ilości nagromadzonych odpadów oraz powierzchni zrehabilitowanych obiektów. W związku z tym, że wykonane analizy składu chemicznego odpadów wykazały ich przydatność do zastosowania m.in. jako kruszywa, właśnie ten kierunek uwzględniono w opracowanym modelu symulacji kosztów. Pomimo iż podczas wykonywanych badań nie analizowano kwestii związanych ze spełnianiem norm środowiskowych i technicznych (nie było to celem projektu), to nakłady na ich zweryfikowanie uwzględniono w obliczeniach. Założono, że transport odzyskanych odpadów będzie się odbywał na odległość nie przekraczającą 30 km. W efekcie wykonanej symulacji modelu otrzymano informacje o kosztach wydobywania i przygotowania do sprzedaży 1 Mg odpadów pochodzących z trzech badanych obiektów (tabela 2).

Jako punkt odniesienia dla uzyskanych wyników przyjęto średnie ceny różnych kruszyw drogowych publikowane w Internecie oraz zawarte w *Informacji o cenach materiałów budowlanych* (Informacja, 2020) – ich zestawienie zawiera tabela 3.

Tab. 2. Zestawienie informacji o kosztach wydobywania i przygotowania do sprzedaży 1 Mg odpadów pochodzących z badanych obiektów

Table 2. The cost of extracting and preparing for sale 1 Mg of waste from the studies waste facilities

Obiekt Waste facilities		Koszt wydobywania i przygotowania do sprzedaży 1 Mg odpadów [PLN] Cost of extraction and preparation for sale of 1 Mg of waste [PLN]	
		bez uwzględnienia wydatków poniesionych na rekultywację without rehabilitation expenses	z uwzględnieniem wydatków poniesionych na rekultywację with rehabilitation expenses
Obiekt I / Waste facilities I		13,91	24,79
Obiekt II / Waste facilities II		12,98	17,38
Obiekt III Waste facilities III	wariant I option I	8,84	8,46
	wariant II option II	8,95	8,57

Tab. 3. Średnie ceny kruszyw drogowych
Table 3. Average prices of natural mineral aggregates

Średnia cena kruszywa Average price of natural mineral aggregates		
wg danych z: / based on: https://www.isprzet.pl/pl/blog/kruszywo-drogowe.html	wg danych z: / based on: https://kolodomu.pl/cennik-kruszyw-i-zwirow-2020-przeglad-cen-poszczegolnych-kruszyw-i-zwirow/	wg danych z: / based on: Informacja (2020)
1. piasek budowlany / construction sand: 26–28 zł/Mg; 2. żwir drobny (8–16 mm) fine gravel (8–16 mm): 70–80 zł/Mg; 3. żwir gruby (16–32 mm) coarse gravel (16–32 mm): 6–75 zł/Mg; 4. pospółka / sand-gravel: 40–50 zł/Mg; 5. kliniec 4–31 mm crushed stone size 4–31 mm: 35–40 zł/Mg; 6. tłuczeń / crushed stone: 35–40 zł/Mg; 7. grys / gritstone: 36–42 zł/Mg	1. kruszywa dolomitowe łamane 0–60 mm broken dolomite aggregates 0–60 mm: 26,12–41,80 zł/t; 2. kruszywa dolomitowe łamane 60–120 mm broken dolomite aggregates 60–120 mm: 31,35–62,70 zł/t; 3. kruszywa wapienne 4–16 mm limestones aggregates 4–16 mm: 31,35–52,25 zł/t; 4. kruszywa wapienne 16–31 mm limestones aggregates 16–31 mm: 31,35–62,70 zł/t; 5. kliniec granitowy granite crushed stone: 52,25–78,38 zł/t; 6. tłuczeń (kruszywa dolomitowe) crushed stone (dolomite aggregates): 36,58–62,70 zł/t; 7. grys dolomitowy 8–12 mm dolomite gritstone 8–12 mm: 43,89–57,48 zł/t	1. kruszywa mineralne łamane – piasek 0–2 mm / broken mineral aggregates-sand 0–2 mm: 33,88 ¹ zł/t; 55,95 ² zł/t; 67,14 ³ zł/t; 2. kruszywa mineralne łamane – kliniec i tłucznie do nawierzchni drogowych i kolejowych niesortowane / unsorted broken mineral aggregates and crushed stone for road and rail surfaces: – 0–31,5 mm: 28,42 ¹ zł/t; 68,58 ² zł/t; 85,72 ³ zł/t; – 0–63 mm: 28,73 ¹ zł/t; 69,16 ² zł/t; 86,45 ³ zł/t; 3. kruszywa kamienne łamane – kliniec i tłucznie sortowane / stone aggregates – and sorted crushed stone: – miał (kruszywny) / dust: 24,67 ¹ zł/t; 21,94 ² zł/t; 29,62 ³ zł/t; – tłuczeń 31,5–63 mm / crushed stone 31,5–63 mm: 36,33 ¹ zł/t; 72,63 ² zł/t; 90,79 ³ zł/t; – kliniec 4–31,5 mm / crushed stone size 4–31,5 mm: 41,94 ¹ zł/t; 77,47 ² zł/t; 96,84 ³ zł/t;

¹ Średnia cena loco kopalnia / Average price ex-mine.

² Średnia cena bez kosztów zakupu / Average price without purchasing cost.

³ Średnia cena z kosztami zakupu / Average price with purchasing cost.

WNIOSKI

Analiza obowiązujących dokumentów i przepisów prawa dotyczących modelu gospodarki cyrkularnej wskazuje, że odpady pochodzące z przemysłów przetwórczego i wydobywczego nagromadzone na składowiskach i w obiektach unieszkodliwiania potencjalnie stanowią cenny substytut surowców naturalnych. Faktyczna możliwość ich zagospodarowania jest jednak uzależniona od szeregu czynników, w tym m.in. od spełnienia norm i wymogów jakościowych oraz od dodatniego rachunku ekonomicznego.

Przeprowadzone wstępne badania składu chemicznego odpadów pochodzących z pięciu zrehabilitowanych obiektów wykazały, że charakteryzują się one potencjałem umożliwiającym ich zagospodarowanie m.in. w drogownictwie, do produkcji kruszywa, do odzysku metali czy też w pracach ziemnych. Badania nie weryfikowały jednak spełnienia przez odpady warunków norm i specyfikacji technicznych oraz środowiskowych.

Dla przeprowadzenia analizy opłacalności zagospodarowania odpadów pochodzących z trzech spośród pięciu badanych zrehabilitowanych obiektów za kluczowe elementy uznano: koszty przeprowadzonej w przeszłości rekultywacji (KR), koszty związane z wdrożeniem i realizacją inwestycji (KI) oraz możliwość sprzedaży odzyskanych odpadów za cenę gwarantującą pokrycie poniesionych wydatków (OI). Ze względu na fakt, że analizowane obiekty były zrehabilitowane i zagospodarowane, z analiz zostały wyłączone koszty środowiskowo-społeczne (przyjmujące wartość pieniężną, ale też pozamaterialne związane z edukacją ekologiczną i wdrażaniem koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym).

Obliczone koszty wydobycia i przygotowania do sprzedaży odpadów pochodzących z badanych obiektów porównano ze średnimi cenami kruszyw wykorzystywanych w drogownictwie i na tej podstawie stwierdzono, że w przypadku każdego z nich warunek opłacalności zostanie spełniony (różnica pomiędzy zyskiem ze sprzedaży odpadów a poniesionymi nakładami inwestycyjnymi na ich wydobycie będzie większa od zera).

Autorki dziękują recenzentom Panu dr. hab. Stanisławowi Wołkowiczowi, prof. PIG-PIB oraz Pani dr Alicji Kot-Niewiadomskiej za wnikliwe uwagi i komentarze, które wzbogaciły treść artykułu. Badania zostały sfinansowane ze środków statutowych PIG-PIB (temat nr 61.4104.1801.00.0).

LITERATURA

- DROBEK L., KANAFEK J., PIERZYNA P. 2016 – Zagospodarowanie UPS w kopalniach węgla kamiennego stan aktualny, prognoza zużycia na lata 2016–2020, aspekty technologiczne i środowiskowe. Mat. konf. XXIII Międzynarodowej Konferencji „Popioły z Energetyki”. Zakopane.
- GUS 2018 – Ochrona środowiska 2018. GUS, Warszawa.
<https://kolodomu.pl/cennik-kruszyw-i-zwirow-2020-przeglad-cen-poszczegolnych-kruszyw-i-zwirow/> (dostęp 7.10.2021 r.).
<https://www.isprzet.pl/pl/blog/kruszywo-drogowe.html> (dostęp 7.10.2021 r.).
- INFORMACJA 2020 – Informacja o cenach materiałów budowlanych IMB. Zeszyt 1/2020 (1919). Sekoncenbud. Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych Budownictwa „Promocja” Sp. z o.o. Warszawa.
- KAZMIERCZAK U., KUDEŁKO J., BAGIŃSKI L., WIRTH H. 2019 – Gospodarka o obiegu zamkniętym odpadami pogórnymi i przeróbczymi – przegląd możliwych rozwiązań na podstawie literatury polskiej [W]: Kulczycka J. (red.), Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KOMUNIKAT 2014 – Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. „Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program „zero

- odpadów dla Europy". Bruksela, dnia 25.09.2014 r. COM(2014) 398 final.
- KOMUNIKAT 2015 – Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym. Bruksela, dnia 2.12.2015 r. COM(2015) 614 final.
- KOMUNIKAT 2020a – Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. „Nowy plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy”. Bruksela, dnia 11.03.2020 r. (COM(2020) 98 final).
- KOMUNIKAT 2020b – Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. „Nowa strategia przemysłowa dla Europy”. Bruksela, 10.03.2020 r. COM(2020) 102 final.
- KOZIOŁ W., UBERMAN R. 1996 – Możliwości i warunki zagospodarowania odpadów z górnictwa i energetyki w drogownictwie, zwłaszcza do budowy autostrad i dróg ekspresowych. *Prz. Geol.*, 44 (7): 701–709.
- KUGIEL M., PIEKŁO R. 2012 – Kierunki zagospodarowania odpadów wydobywczych w HALDEX S.A. *Górnictwo i Geologia*, 7 (1).
- KULCZYCKA J., PĘDZIWIATR E. 2019 – Gospodarka o obiegu zamkniętym – definicje i ich interpretacje. [W]: Kulczycka J. (red.), *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KULCZYCKA J. 2018 – Wskaźniki gospodarki o obiegu zamkniętym dla Unii Europejskiej i Polski. *Gospodarka w Praktyce i Teorii*, 53 (4); doi: 10.18778/1429-3730.53.05
- ŁUKASZYK W., TABOR A. 1979 – Gospodarka odpadami w górnictwie węgla kamiennego. *Mat. Symp. Naukowo-Technicznego: Stan i perspektywy gospodarki odpadami w środowisku*. NOT, Warszawa.
- MARTINEK W., NOWAK P., WOYCIECHOWSKI P. 2010 – *Technologia robót budowlanych*. Oficyna Wydaw. PW.
- MARTINEK W., JACKIEWICZ-REK W., KSIĄŻEK M., KACZOREK K., ROZŁON J. 2015 – *Technologia robót budowlanych. Ćwiczenia projektowe*. Wydanie 2 zm. Of. Wydaw. PW.
- NOWOK S., SKIBA E. 1979 – Stan i perspektywy gospodarki odpadami górnictwa i hutnictwa metali nieżelaznych. *Mat. Symp. Naukowo-Technicznego: Stan i perspektywy gospodarki odpadami w środowisku*. NOT, Warszawa.
- PALARSKI J., MUSIOŁ S., KACZMARCZYK A. 1987 – Możliwości utylizacji odpadów drobnofrakcyjnych poprzez deponowanie ich w górotworze i wyrobiskach podziemnych. *Zesz. Nauk. PŚL., Ser. Górnictwo*, 158 (931).
- PIENKOWSKI D., KOŚMICKI E. 2016 – Funkcja produkcji gospodarki zamkniętego obiegu. *Ekonomia i Środowisko*, 2: 10–22. Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych.
- PIETRAS Z. 1979 – *Gospodarka odpadami przemysłu energetycznego*. Materiały Symposium Naukowo-Technicznego: Stan i perspektywy gospodarki odpadami w środowisku. NOT, Warszawa.
- REZOLUCJA 2020 – Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 10 lutego 2021 r. w sprawie nowego planu działania dotyczącego gospodarki o obiegu zamkniętym (2020/2077(INI)).
- ROZPORZĄDZENIE 2015 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 maja 2015 r. w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami. *Dz.U. z 2015 r. poz. 796*.
- ROZPORZĄDZENIE 2020 – Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów. *Dz.U. z 2021 r. poz. 10*.
- ROZWADOWSKA A. 2020 – Modele biznesowe gospodarki o obiegu zamkniętym. *Studia Prawno-Ekonomiczne*, Wyd. Łódzkie Tow.Nauk., 116: 253–268; doi: 10.26485/SPE/2020/116/14
- UCHWAŁA 2019 – Mapa Drogowa transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Załącznik do uchwały nr Rady Ministrów z dnia 3 września 2019 r.
- WOWKONOWICZ P., BOJANOWICZ-BABŁOK A., GWOREK B. 2018 – Wykorzystanie odpadów z przemysłu wydobywczego i hutnictwa w drogownictwie. *Rocznik Ochr. Środ.*, 20: 1335–1349. Wyd. PKosz.
- WÓJCIK M., STACHOWICZ F., MASŁOŃ A. 2017 – Możliwość wykorzystania popiołów lotnych w celu poprawy odwadniania osadów ściekowych. *Budow. Inż. Środ.*, 35; doi: 10.7862/rb.2017.35
- ZARĘBSKA J. 2017 – Gospodarka o obiegu zamkniętym drogą do zrównoważonego rozwoju. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, 6: 286–295.
- ZIELIŃSKA D., PACOCHA M. 2019 – Wymagania techniczno-prawne mieszanek popiołowo-żużlowych – praktyczne zastosowanie w drogownictwie. *Mat. seminarium „Recykling w drogownictwie”*, Poznań, 27 lutego 2019.

Praca wpłynęła do redakcji 21.01.2022 r.
Akceptowano do druku 11.03.2022 r.