



# Możliwość wykorzystania w technologiach górniczych niebezpiecznych odpadów wtórnych z termicznego przekształcania odpadów komunalnych

Wacław ANDRUSIKIEWICZ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> dr hab. inż., prof. AGH; Department of Mining Engineering & Occupational Safety, Faculty of Civil Engineering and Resource Management, AGH University of Krakow; email: andus@agh.edu.pl; ORCID: 0000-0002-4845-1404

<http://doi.org/10.29227/IM-2023-02-65>

Submission date: 21-11-2023 | Review date: 29-11-2023

## Abstrakt

Problem związany z ciągłym wzrostem ilości wytwarzanych odpadów komunalnych wymaga podjęcia zdecydowanych działań zarówno u źródła (edukacja „producentów” odpadów) jak i związanych ze sposobem ich utylizacji. Jednym ze sposobów jest przekształcenie termiczne odpadów. Działanie to nie rozwiązuje całkowicie problemu, gdyż w efekcie procesu termicznego powstają odpady wtórne. Pozwala to jednak na znaczne ograniczenie pierwotnej masy odpadów o ok. 60–70% i objętości o ok. 80–95%. Od strony fizycznej odpady wtórne stanowią żużle, popioły i pyły, a te – zgodnie z obowiązującą klasyfikacją – w części zaliczane są do odpadów niebezpiecznych.

W artykule przedstawiono koncepcję ich wykorzystania w technologiach górniczych związanych z wypełnianiem pustek podziemnych. W tym celu należy wyselekcjonowane odpady poddać badaniom pod kątem możliwości ich wykorzystania w instalacjach odzysku odpadów.

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań parametrów fizycznych wybranych odpadów, a także badań chemicznych związanych z ustaleniem ich składu. Wskazano kierunek dalszych badań parametrów „technologicznych”, których znajomość będzie niezbędna na potrzeby zaprojektowania przyszłej instalacji odzysku odpadów.

**Słowa kluczowe:** odpady komunalne, odpady wtórne, badania odpadów, odzysk odpadów

## Wstęp

Problem powstawania odpadów jest nierozdzielalnym elementem towarzyszącym rozwojowi cywilizacji. Na przestrzeni setek, a nawet tysięcy lat, problem ten był marginalizowany. Dopiero rozwój zorganizowanych osad ludzkich spowodował, że – mówiąc dzisiejszym językiem – zaczęto wdrażać procedury związane z gospodarką odpadami. Początkowo ograniczało się to do gromadzenia odpadów w pewnej odległości od osad ludzkich, jednak powstawanie zabudowy w postaci form miejskich spowodowało, że pierwsze regulacje prawne związane z zachowaniem czystości w obrębie miast pojawiły się jeszcze w średniowieczu.

Dziś, w dobie dynamicznego rozwoju gospodarczego świata, problem gospodarki odpadami stał się problemem globalnym. Nie ma na świecie państwa, które w tym zakresie nie wprowadziło regulacji prawnych. Oczywiście nie są one identyczne we wszystkich krajach, jednak można zauważyć, że im bardziej rozwinięte gospodarczo państwo, tym przepisy dotyczące odpadów są bardziej restrykcyjne, a generalnie sprowadzają się do wskazywania kierunków zagospodarowania bądź utylizacji odpadów. Jest to wprost konsekwencją tegoż rozwoju. Skomplikowane procesy technologiczne pozwalają na uzyskanie zaawansowanych dóbr materialnych, ale też skutkują coraz trudniejszymi do utylizacji odpadami pochodzącymi z tych procesów. W efekcie dzisiejsza cywilizacja wytwarza całą gamę odpadów, od najprostszych po wyjątkowo skomplikowane. I właśnie stopień skomplikowania odpadów będzie wytyczał kierunki postępowania z nimi.

Polskie prawo dzieli odpady na 20 podstawowych grup [5]. Ostatnią, 20. grupę odpadów stanowią odpady komunalne łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie. Odpady,

określane mianem komunalnych, to właśnie te, które towarzyszą człowiekowi „od zawsze”. Grupa 20. w ustawie [5] definiowana jest jako odpady powstające 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.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że problem z zagospodarowaniem odpadów komunalnych szczególnie nabrzmiał w okresie rewolucji przemysłowej. Gwałtowny rozwój przemysłu i związana z tym duża migracja ludzi do miast stały się przyczyną poszukiwania nowych rozwiązań problemu utylizacji odpadów komunalnych. Efektem było uruchomienie w latach 70. XIX w. w Nottingham pierwszej na świecie spalarni odpadów. Dziś na świecie funkcjonuje ok. 2 tys. spalarni odpadów komunalnych, z czego tylko w Japonii ok. 1200, ok. 500 w Europie, w tym 8 w Polsce [7].

## Źródło powstawania odpadów wtórnych

Spalanie odpadów komunalnych zmieszanych (a więc tych, które nie podlegały zbiórce selektywnej) określane terminem termicznego przekształcania odpadów, może być uznane w świetle polskiego prawa [5] jako proces unieszkodliwiania odpadów, jeżeli nie towarzyszy temu odzyskanie energii. Z kolei w procesie odzysku następuje przekształcenie termiczne z odzyskiem energii. W 2022 r. w Polsce w procesie odzysku przekształcono termicznie 2,7 mln Mg odpadów, natomiast w procesie unieszkodliwiania 0,1 mln Mg odpadów [5].

W procesie termicznym odpad pierwotny (tzw. wsad), będący de facto mieszaniną odpadów komunalnych o różni-

Tab. 1. Masa odpadów komunalnych poddanych procesowi termicznego przekształcania oraz orientacyjna masa uzyskanych odpadów wtórnych. Źródło: opracowanie własne na podst. [2]

Tab. 1. Mass of municipal waste subjected to thermal transformation and approximate mass of secondary waste obtained. Source: own elaboration based on [2]

Rok	Łączna masa zebranych odpadów komunalnych	Masa odpadów komunalnych przekształconych termicznie (odpady pierwotne)		Orientacyjna masa uzyskanych odpadów wtórnych <sup>1)</sup>
	tys. Mg	tys. Mg	%	tys. Mg
2013	9 474	766	8,1	268
2014	10 330	1 560	15,1	546
2015	10 864	1 439	13,2	504
2016	11 654	2 266	19,4	793
2017	11 969	2 922	24,4	1 023
2018	12 485	3 018	24,2	1 056
2019	12 753	2 921	22,9	1 022
2020	13 117	2 822	21,5	988
2021	13 674	2 873	21,0	1 006
2022	13 420	2 854	21,3	999

<sup>1)</sup> nie obejmuje użytych sorbentów (np. węgla aktywnego) z procesu oczyszczania spalin

Tab. 2. Przykładowy bilans masy odpadów wtórnych powstających w spalarni odpadów komunalnych. Źródło: opracowanie własne na podst. [3]

Tab. 2. Example of mass balance of secondary waste generated in a municipal waste incineration plant. Source: own elaboration based on [3]

Masa odpadów komunalnych 1000 kg						
Miejsce powstania produktów spalania	Komora spalania		Wymiennik ciepła	Układ odpyłania	System oczyszczania spalin	Emisja do atmosfery
Rodzaj produktów spalania	Żużel	Popiół paleniskowy	Popiół lotny	Pył z odpyłania	Produkty „suchego” oczyszczania spalin	-
Ilość produktów spalania	200–350 kg	20–40 kg		7–45 kg	32–80 kg	0,05 kg

cowanym składzie ulega przekształceniu. W wyniku tego procesu powstają nowe odpady, tzw. odpady wtórne. Znacznej redukcji ulega masa przetwarzanych w ten sposób odpadów – o ok. 60–70%, oraz ich objętość – o ok. 80–95% [1]. To z kolei przekłada się na znaczne ograniczenie ilości budowy nowych składowisk odpadów. W Tab. 1 zestawiono masy odpadów zebranych, przekształconych termicznie (odpady pierwotne) oraz uzyskanych odpadów wtórnych.

Analizując powyższe dane można stwierdzić, że ostatnie kilka lat to w miarę stabilna sytuacja, wynikająca wprost z ilości działających w Polsce instalacji i ich przepustowości. W najbliższych latach można się spodziewać oddania do użytkowania kolejnych instalacji, w związku z czym niewątpliwie zmieni się wolumen odpadów pierwotnych przekształcanych termicznie, a co za tym idzie, także wzrośnie wolumen odpadów wtórnych.

Odpady wtórne to stała pozostałość spalania w postaci żużli, popiołów paleniskowych oraz popiołów lotnych. Ich rodzaj oraz ilość w głównej mierze zależy od struktury spalanych odpadów komunalnych, charakteryzuje się pewną zmiennością w czasie – sezonowością, co jest związane z porami roku, w których powstają. Wpływ ma także technologia spalania oraz oczyszczania spalin.

Poniżej w Tab. 2 przedstawiono przykładowy bilans masy odpadów wtórnych powstających w spalarni odpadów komunalnych. Podane wielkości należy traktować jako orientacyjne.

Oprócz produktów spalania opisanych w Tab. 2 występują również jako odpady wszelkiego rodzaju sorbenty wykorzystane w procesie oczyszczania spalin, albo w postaci ciał stałych (np. węgiel aktywny w przypadku metody „suchej”) bądź szlamów (w przypadku technologii „mokrej” lub „pół-suchej”). Wysuszone szlamy określane są jako tzw. placki filtracyjne.

Każdy produkt spalania (odpad wtórny) podlega zaklasyfikowaniu do właściwej grupy odpadów zgodnie z katalogiem

odpadów [4]. Klasyfikację tę w odniesieniu do odpadów zidentyfikowanych w Tab. 2 przedstawiono w Tab. 3.

Jak widać w Tab. 3, część odpadów jest kwalifikowana jako niebezpieczne z uwagi na zawartość w nich związków niebezpiecznych. W zdecydowanej większości żużle i popioły paleniskowe nie są kwalifikowane jako odpady niebezpieczne, dzięki czemu mogą być wykorzystane gospodarczo np. Niemniej jednak przed skierowaniem ich do ponownego wykorzystania poddaje się je wstępnej obróbce, której celem jest separacja frakcji metalicznej. Po kilkumiesięcznym sezonowaniu materiał ten najczęściej wykorzystywany jest w budownictwie drogowym bądź do produkcji prefabrykatów budowlanych.

Problem stanowią żużle, popioły paleniskowe oraz odpady z oczyszczania gazów spalinowych (popioły lotne, pyły z oczyszczania gazów odlotowych), które zawierają znaczne ilości metali ciężkich oraz produkty niepełnego spalania (dioksyny, bifenyle, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne itp.). Ponieważ są to odpady zaliczane do grupy odpadów niebezpiecznych, w większości krajów należących do UE odpady te kierowane są – po wcześniejszej dodatkowej obróbce (immobilizacji) – na specjalnie przygotowane powierzchniowe składowiska odpadów niebezpiecznych. Alternatywnym rozwiązaniem jest skierowanie odpadów do podziemnych składowisk odpadów niebezpiecznych lub wypełnianie nimi wyeksploatowanych wyrobisk podziemnych. W przypadku polskich spalarni ta grupa odpadów stanowi „tylko” ok. 4-5% całej masy uzyskiwanych odpadów wtórnych, jednak z uwagi na swoje niebezpieczne właściwości wymaga specjalnego traktowania.

#### Wstępne badania niebezpiecznych odpadów wtórnych pod kątem ich ewentualnego wykorzystania w procesie odzysku

W górnictwie podziemnym doskonale jest znana możliwość wykorzystania odpadów drobnofrakcyjnych na potrzeby

Tab. 3. Klasyfikacja produktów termicznego przekształcania odpadów komunalnych wg katalogu odpadów. Źródło: opracowanie własne na podst. [4]  
 Tab. 3. Classification of products for thermal processing of municipal waste according to the waste catalog. Source: own elaboration based on [4]

Nazwa odpadu wg Tab. aa	Kod odpadu	Grupy, podgrupy i rodzaje odpadów wg katalogu odpadów [4]
Żużel, popiół paleniskowy	19 01 11*	Żużle i popioły paleniskowe zawierające substancje niebezpieczne
	19 01 12	Żużle i popioły paleniskowe inne niż wymienione w 19 01 11
Popiół lotny	19 01 13*	Popioły lotne zawierające substancje niebezpieczne
	19 01 14	Popioły lotne inne niż wymienione w 19 01 13
Pył z odpylania	19 01 15*	Pyły z kotłów zawierające substancje niebezpieczne
	19 01 16	Pyły z kotłów inne niż wymienione w 19 01 15
Produkty oczyszczania spalin	19 01 05*	Osady filtracyjne (np. placek filtracyjny) z oczyszczania gazów odlotowych
	19 01 06*	Szlamy i inne odpady uwodnione z oczyszczania gazów odlotowych
	19 01 07*	Odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych
Zużyte sorbenty (węgiel aktywny)	19 01 10*	Zużyty węgiel aktywny z oczyszczania gazów odlotowych

Odpady oznaczone \* (gwiazdką) oznaczają odpady niebezpieczne

Tab. 4. Własności fizyczne badanych odpadów. Źródło: opracowanie własne

Tab. 4. Physical properties of the tested waste. Source: own study

Wielkość	Jednostka	Rodzaj odpadu		
		19 01 07*	19 01 13*	19 01 15*
Gęstość właściwa	Mg/m <sup>3</sup>	2,30 – 2,55	2,60 – 2,85	2,70 – 2,79
Gęstość nasypowa	Mg/m <sup>3</sup>	0,30 – 0,50	0,44 – 0,91	0,85 – 1,12
Straty suszenia 105 °C	%	0,04 – 1,14	0,03 – 0,56	0,02 – 0,21

Tab. 5. Skład chemiczny badanych odpadów. Źródło: opracowanie własne

Tab. 5. Chemical composition of the tested waste. Source: own study

Składnik	Jednostka	Rodzaj odpadu		
		19 01 07*	19 01 13*	19 01 15*
CaSO <sub>4</sub>	% s.m.	6,16 – 14,13	9,82 – 23,82	10,11 – 28,54
CaCO <sub>3</sub>	% s.m.	3,89 – 10,96	4,07 – 8,77	2,05 – 5,1
CaCl <sub>2</sub>	% s.m.	11,31 – 14,87	n.o.	n.o.
CaO	% s.m.	16,7 – 36,7	13,8 – 20,8	11,9 – 16,1
NaCl	% s.m.	4,73 – 12,15	0,74 – 4,58	1,99 – 3,51
KCl	% s.m.	4,46 – 6,52	1,6 – 4,86	2,52 – 3,95
SiO <sub>2</sub>	% s.m.	2,97 – 9,25	20,6 – 49,3	28,2 – 44,9
HCl - nierozp.	% s.m.	0,63 – 3,47	5,34 – 10,57	4,41 – 5,98
CaO wolny	%	14,44 – 26,2	1,4 – 4,09	1,18 – 2,75
Antymon	mg/kg s.m.	226 – 386	125 – 294	250 – 279
Arsen	mg/kg s.m.	6,8 – 16,4	5,74 – 8,71	8,57 – 11,8
Ołów	mg/kg s.m.	993 – 2250	121 – 571	408 – 637
Kadm	mg/kg s.m.	85 – 223	13,0 – 34,6	35,3 – 48,5
Kobalt	mg/kg s.m.	4,27 – 9,66	25,8 – 49,7	22,5 – 29,7
Miedź	mg/kg s.m.	293 – 523	301 – 425	271 – 533
Nikiel	mg/kg s.m.	12,8 – 28,6	53 – 244	45,4 – 67,5
Rteć	mg/kg s.m.	6 – 24	n.o.	n.o.
Cynk	mg/kg s.m.	4600 – 11600	3580 – 6360	4580 – 7720
pH (eluat)		12,2 – 12,3	12,3 – 12,5	12,0 – 12,6

wypełniania pustek. Dotychczasowe doświadczenia pochodzą z kopalni węgla kamiennego, gdzie mieszaniny powstałe na bazie drobnofrakcyjnych odpadów pochodzących z procesów spalania węgla kamiennego wykorzystywane są głównie do wypełniania zrobów zawałowych. Działanie to ma z jednej strony skutek proekologiczny – zagospodarowanie odpadów pod ziemią a nie na powierzchni, z drugiej zaś poprawia bezpieczeństwo pracy w przypadku profilaktyki przeciwpożarowej czy też w przypadku zagrożenia gazowego.

Na podstawie wstępnie przeprowadzone selekcji podjęto decyzję, że nie wszystkie odpady „z gwiazdką” pokazane w Tab. 3 znajdują zastosowanie w przyszłej instalacji do odzysku odpadów. Z uwagi na zawartość wody nie brano pod uwagę osadów filtracyjnych (np. placek filtracyjny) z oczyszczania gazów odlotowych (19 01 05\*) oraz szlamów i innych odpadów uwodnionych z oczyszczania gazów odlotowych (19 01 06\*).

Zrezygnowano ze zużytego węgla aktywnego z oczyszczania gazów odlotowych (19 01 10\*) z uwagi na jego własności:

- hydrofobowość (materiał trudno zwilżalny, „pływający” na powierzchni);
- duża zawartość węgla pierwiastkowego;
- łatwopalność;
- zmniejszanie gęstości mieszanin.

Zrezygnowano również z żużli i popiołów paleniskowych (19 01 11\*), ponieważ te odpady wymagałyby wcześniejszej

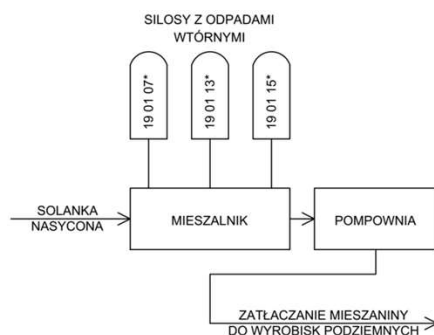
obróbki (mielenia), ale też z powodu możliwości ich wykorzystania w drogowych technologiach budowlanych.

Ostatecznie do dalszych badań zakwalifikowano:

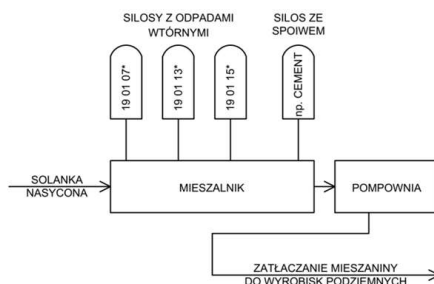
- odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych (19 01 07\*);
- popioły lotne zawierające substancje niebezpieczne (19 01 13\*);
- pyły z kotłów zawierające substancje niebezpieczne (19 01 15\*).

Badaniom własności fizycznych oraz składu chemicznego poddano odpady z wybranych instalacji termicznego przekształcania odpadów, w których poszczególne rodzaje odpadów były gromadzone w osobnych zbiornikach. Przykładki, w których gromadzono w jednym zbiorniku dwa rodzaje odpadów pominięto. Uzyskane wyniki zestawiono w Tab. 4 i 5.

Analiza danych z Tab. 5 pozwala na stwierdzenie, że badane odpady charakteryzują się niestabilnością składu chemicznego w sensie ilościowym. Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że jest to konsekwencja zróżnicowania komponentów wsadowych (odpadów komunalnych przeznaczonych do ich termicznego przekształcania), o czym już wcześniej wspomniano. W tej sytuacji wszelki próby określenia receptury wskazującej na proporcje udziału poszczególnych odpadów wtórnych w docelowej mieszaninie, którą



Rys. 1. Schemat ideowy sporządzania mieszaniny do wypełniania wyrobisk podziemnych. Źródło: opracowanie własne  
 Fig. 1. Schematic diagram of preparing a mixture for filling underground workings. Source: own study



Rys. 2. Schemat ideowy sporządzania mieszaniny do wypełniania wyrobisk podziemnych z uwzględnieniem spoiwa. Źródło: opracowanie własne  
 Fig. 2. Schematic diagram of preparing a mixture for filling underground workings, including the binder. Source: own study

miałyby być wypełniane pustki podziemne wydaje się być zadaniem karkołomnym, lub wręcz niemożliwym.

### Koncepcja odzysku odpadów

W myśl obowiązującego prawa [5] poprzez odzysk odpadów rozumie się jakikolwiek 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. Z kolei pod pojęciem unieszkodliwiania odpadów rozumie się proces niebędący odzyskiem, nawet jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii.

Jak widać, pojęcia odzysku i unieszkodliwiania wzajemnie się wykluczają, wobec czego nie można równocześnie prowadzić odzysku odpadów i ich unieszkodliwiania. Zamysł wykorzystania odpadów wtórnych z procesu spalania do wypełniania wyrobisk podziemnych w związku z tym będzie procesem odzysku odpadów. Tego typu procesy realizowane są w nieczynnych wyrobiskach kopalń soli m. in. w Niemczech, Austrii, Danii [6].

Wypełnianie pustek podziemnych (np. w postaci wyeksploatowanych komór solnych) przy wykorzystaniu odpadów wtórnych z instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych otwiera nowy rozdział badań. Wiadomo, że konieczne będzie opracowanie technologii oraz instalacji do odzysku odpadów. Równocześnie oczekuje się, że wypełnione odpowiednio dobraną mieszaniną wyrobiska komorowe będą miały w znacznym stopniu ograniczone możliwości konwergencji, co poprzez analogię z kopalń węgla kamiennego czy rud metali można przyrównać do utwardzonej podsadzki hydraulicznej.

Wybór kopalń soli jako miejsca do deponowania odpadów niebezpiecznych nie jest wyborem przypadkowym.

Zgodnie z aktualną wiedzą jest to optymalne rozwiązanie dla tego typu działań. Wynika to ze specyfiki górotworu solnego, co również jest szeroko opisane w literaturze branżowej, zarówno polsko-, jak i obcojęzycznej. Niewątpliwymi zaletami górotworu solnego są m. in. jego właściwości reologiczne i związana z tym powolna konwergencja wyrobisk, jednorodność, szczelność, brak spękań, brak zaburzeń tektonicznych, czy brak zjawisk w postaci tąpnięć.

W warunkach polskich aktualnie istnieje możliwość wdrożenia procesu odzysku odpadów w Kopalni Soli „Kłodawa”, w kawernach Inowrocławskich Kopalni Soli, a w przyszłości w złożu solnym w ZG „Polkowice-Sieroszowice”. Wymaga to wcześniejszego przeprowadzenia odpowiednich badań, które będą miały na celu wskazanie odpowiednich receptur mieszanin odpadów wtórnych. Nie bez znaczenia jest forma takiej mieszaniny, która może przybierać postać od rzadkiej zawiesiny po formę pasty. Generalnie – w zależności od charakteru wypełnianych wyrobisk – chodzi o ograniczenie bądź całkowitą eliminację powstawania odcieków z mieszaniny wypełniającej. Podstawowym założeniem jest to, że bazą dla mającej powstać mieszaniny będzie solanka o nasyceniu NaCl co najmniej na poziomie 90%, co oznacza, że w każdym dcm<sup>3</sup> roztworu będzie rozpuszczone co najmniej 290 g NaCl. Uzyskanie solanki o wskazanym nasyceniu będzie możliwe poprzez wykorzystanie odpadów solnych pochodzących z procesu przeróbki soli kamiennej. Działanie to jest niewątpliwie ukierunkowane na odzysk lub unieszkodliwienie odpadów solnych i jest niejako wartością dodaną w ramach omawianych procesów. Krok ten podyktowany jest tym, że docelowo mieszanina wypełniająca pustki poeksploatacyjne będzie miała bezpośredni kontakt z górotworem solnym. Ponieważ istnieje realne przypuszczenie, że zaprojektowana mieszanina wypełniająca może emitować pewne ilości tzw. cieczy nadosadowej (choć najbardziej pożądanym efektem byłby jej brak),

konieczne jest zabezpieczenie się przed efektem ługowania górotworu przez tę ciecz. W przypadku zastosowania wody słodkiej w składzie mieszaniny wypełniającej, proces ługowania górotworu byłby nieunikniony i trudny do kontroli.

Wstępną koncepcję wykorzystania badanych odpadów do wytwarzania mieszaniny wypełniającej przedstawiono na Rys. 1. Na tym etapie nie określa się proporcji poszczególnych odpadów w mieszaninie, jak również ilości solanki niezbędnej do jej wytworzenia.

Analiza wyników badań przedstawionych w Tab. 5 pozwala na stwierdzenie, że z uwagi na niestabilność składu chemicznego poszczególnych grup odpadów uzyskanie mieszaniny samozestalającej się może być co najmniej trudne. W związku z tym należy liczyć się z koniecznością uzupełnienia receptury mieszaniny o składnik mający cechy spoiwa. Takim składnikiem może być np. cement bądź odpady poprodukcyjne z procesu produkcji cementu. Nie pozbawiona sensu wydaje się być też możliwość wykorzystania REA-gipsów, których duże ilości pozyskiwane są w procesach odsiarczania spalin. Wówczas schemat pokazany na Rys. 1 należy uzupełnić o dodatkowy składnik (spoiwo), co pokazano na Rys. 2.

### Proponowany kierunek dalszych badań

Celem instalacji odzysku odpadów jest wypełnienie wskazanych pustek podziemnych mieszaniną sporządzoną na bazie niebezpiecznych odpadów wtórnych oraz solanki, a w razie potrzeby uzupełnionej spoiwem. Od sporządzonej mieszaniny oczekuje się określonych cech fizycznych, które w pierwszej fazie pozwolą na jej hydrotransport do miejsc docelowych, a następnie ich zestalenia (wiązania), najlepiej bez odcieków. Należy się spodziewać, że wypełnione w ten sposób zbędne wyrobiska zachowają swoją stateczność poprzez istotne ograniczenie konwergencji, co w konsekwencji przełoży się na ochronę powierzchni w zasięgu oddziaływania tych wyrobisk.

Przygotowana mieszanina do wypełniania pustek podziemnych będzie przemieszczana w technologii hydrotransportu, tzn. rurociągami z wykorzystaniem układu pompowego. Aby było to możliwe, mieszanina musi mieć postać upłynioną, ale z uwzględnieniem maksymalnego ograniczenia możliwości pojawienia się cieczy nadosadowej. W związku z tym przewiduje się, że mieszanina będzie miała postać pasty. Równocześnie należy mieć na uwadze fakt, że od mieszaniny będzie się wymagało pewnych właściwości wiążących, w związku z czym moment początku wiązania nie może nastąpić wcześniej, niż mieszanina znajdzie się w miejscu docelowym. W tym miejscu pojawia się wspomniany problem cieczy nadosadowej. Optymalnym rozwiązaniem jest sytuacja, w której cała ciecz zostanie wykorzystana w procesie wiązania i nie pojawi się jako ciecz nadosadowa. Z uwagi na efektywność wypełniania pustek podziemnych ważnym momentem jest czas zakończenia procesu wiązania. W tym momencie transportowana pasta staje się ciałem stałym, które będzie się charakteryzowało wytrzymałością na ściskanie, a to z kolei przekłada się na ściśliwość materiału wypełniającego pustkę. Jednak ten parametr (ściśliwość) byłby istotny, gdyby pustki podziemne były w 100% wypełnione mieszaniną.

Szacuje się, że realne jest wypełnienie pustek w ok. 70–80%. Oczywiście mając na uwadze własności reologiczne górotworu solnego można się spodziewać, że w przyszłości dojdzie do pełnego zaciśnięcia pustki niewypełnionej mieszaniną, ale biorąc pod uwagę doświadczenia krajowego i światowego górnictwa solnego, procesy te można liczyć w setkach lat. Podsumowaniem może być badanie nasiąkliwości rozumianej jako zmiana wytrzymałości na ściskanie w wyniku działania wody/solanki w określonym czasie. Badanie to może wydawać się zbędne z punktu widzenia kopalni soli, gdyż nie przewiduje się, aby do wypełnionych pustek wdarła się woda czy solanka. Niemniej jednak należy założyć taki wariant jako potencjalnie katastrofalny.

Podsumowując można stwierdzić, że z punktu widzenia technologii oraz celu, któremu ma służyć odzysk niebezpiecznych odpadów wtórnych z instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych, należy przeprowadzić badania następujących parametrów:

- rozlewność;
- badanie własności reologicznych mieszaniny;
- określenie początku wiązania mieszaniny;
- określenie końca wiązania mieszaniny;
- wytrzymałość na ściskanie;
- ściśliwość;
- nasiąkliwość.

### Podsumowanie

Można się spodziewać, że w najbliższych latach nastąpi wzrost ilości odpadów komunalnych poddawanych przekształceniu termicznemu w specjalnie dedykowanych instalacjach. W efekcie otrzymywane są kolejne odpady (wtórne), w tym niebezpieczne. Niewątpliwą zaletą ITPO jest znaczna redukcja masy i objętości tych odpadów w stosunku do tzw. wsadu, niemniej jednak pojawia się problem ich zagospodarowania. Problem stanowią grupy odpadów niebezpiecznych, które wymagają odpowiedniego postępowania. Istnieje możliwość stworzenia instalacji odzysku tych odpadów na potrzeby wypełniania pustek podziemnych w kopalniach soli.

W Polsce od kilku lat prowadzone są badania w tym kierunku, na razie w skali laboratoryjnej. Wstępne badania wykazały, że badane odpady od strony fizycznej są mniej więcej stabilne, natomiast od strony ich składu chemicznego dostrzega się duży rozrzut zawartości poszczególnych związków chemicznych i pierwiastków. Wynika to z dużego zróżnicowania przetwarzanych odpadów komunalnych, które stanowią trudną do przewidzenia niewiadomą. To z kolei uniemożliwia stworzenia jednoznacznej receptury odpowiedniej mieszaniny, która znalazłaby zastosowanie w instalacji odzysku odpadów.

Znając oczekiwania wobec przyszłej mieszaniny, koniecznym jest kontynuowanie badań, szczególnie pod kątem jej parametrów mechaniczno-wytrzymałościowych. Zaproponowany program badań powinien dać odpowiedź, na ile zmienność składu chemicznego odpadów wtórnych ma wpływ na te parametry.

#### Literatura – References

1. Mokrosz W. Ekologiczne aspekty oczyszczania spalin ze spalarni odpadów komunalnych i przemysłowych. <https://docplayer.pl/6677159-Ekologiczne-aspekty-oczyszczania-spalin-ze-spalarni-odpadow-komunalnych-i-przemyslowych.html>.
2. Ochrona środowiska 2023. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa 2023.
3. Reference Document on BAT for Waste Incineration, EC 2006.
4. Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów, Dz.U.2020.10.
5. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1587, 1597, 1688, 1852, 2029).
6. Vehlou J. et al. Management of Solid Residues In Waste-to-Energy and Biomass Systems. Forschungszentrum Karlsruhe (FZKA 7347). Karlsruhe 2007.
7. Wielgosiński G. Termiczne przekształcanie odpadów. Wydawnictwo Nowa Energia. Racibórz 2020.

#### *Possibility of Using Secondary Waste from Thermal Processing of Municipal Waste*

*The problem related to the continuous increase in the amount of municipal waste generated requires taking decisive actions both at the source (education of waste "producers") and related to the method of its disposal. One way is to thermally transform waste. This action does not completely solve the problem because the thermal process produces secondary waste. However, this allows for a significant reduction in the original weight of waste by approximately 60–70% and the volume by approximately 80–95%. From the physical side, secondary waste consists of slags, ashes and dust, and these – according to the current classification – are partly classified as hazardous waste. The article presents the concept of their use in mining technologies related to filling underground voids. For this purpose, selected waste should be tested for the possibility of its use in waste recovery installations. The paper presents preliminary results of testing the physical parameters of selected waste, as well as chemical tests related to determining their composition. A direction for further research on "technological" parameters was indicated, the knowledge of which will be necessary for the design of a future waste recovery installation.*

**Keywords:** *municipal waste, secondary waste, waste testing, waste recovery*