

# Ekonomiczne aspekty gospodarki ubocznymi produktami spalania węgla (ups)

## Economic aspects of coal combustion products (CCPs) management

Doświadczenia wielu krajów, w tym Polski, jednoznacznie podkreślają, że uboczne produkty spalania węgla w energetyce z odpadów stały się uzupełniającym składnikiem wielu surowców i produktów oraz źródłem bezpośredniego wytwarzania produktów handlowych spełniających wymagania produktowe.

Analizy krajowego zagospodarowania ubocznych produktów spalania węgla są imponujące (p. tab. 1), nawet w porównaniu z wieloma krajami wysoko rozwiniętymi. Porównywanie stopnia zagospodarowania ups z okresu gospodarki centralnego planowania z okresem gospodarki wolnorynkowej wykazuje znaczące różnice o charakterze ekonomicznym, przy analogicznej argumentacji ekologicznej.

Wartości surowcowe i produktowe ubocznych produktów spalania niejednokrotnie podkreślano wtedy i dzisiaj nie tylko w konwencji ekologicznej, ale przede wszystkim ekonomicznej i bilansowania zużycia surowców mineralnych, decydujących o przyszłości danego społeczeństwa [1-6, 16].

W okresie gospodarki planowej, w wyniku silnego oddziaływania naukowców, inżynierów i ówczesnych menedżerów dochodziło do realizacji inwestycji, niejednokrotnie w sąsiedztwie elektrowni i elektrociepłowni. Większość tych inwestycji wynikała z realizacji planów centralnych i resortowych. Jednak przemiany polityczne i gospodarcze wykazały (niejednokrotnie) brak ekonomicznych i gospodarczych podstaw do kontynuowania dalszej ich działalności. W ten oto sposób energetyka i budownictwo pozbyła się instalacji odzysku pyłu magnetytowego, kruszyw żużlowych i granulowanych popiołów wapniowych dla rolnictwa oraz - co stanowiło największą stratę - utratę kilku zakładów produkcji betonów komórkowych.

W miarę rozwoju gospodarki rynkowej i rozwoju gospodarczego kraju następował wzrost zagospodarowania ubocznych produktów spalania węgla wykorzystujący ekonomiczne zasady ich deponowania i zagospodarowania. Duży postęp w zagospodarowaniu ubocznych produktów spalania w ostatnich

Tabela 1

Bilans produkcji i zagospodarowania ubocznych produktów spalania węgla z energetyki zawodowej [3,5]

Uboczne produkty spalania węgla	Maksymalne wykorzystanie, Gg/rok osiągnięte w latach		Bilans roczny, Gg	
	1975 - 1982	1985 - 2008	1980	2008
Wytworzone ups w energetyce, w tym:	19 458/1980	22 978/1989	19 458	15 975
- popiół lotny	-	19 759/1989	+	+
- żużel	-	3 335/1985	+	+
- pył magnetytowy	12/1977	0/0	7	0
- produkty specjalne (mikrosfery, zasypki, popiół modyfikowany, elporyt) i spełniające wymagania norm, aprobat itp.	1 200/1982	-	-	+
- gips	0/0	+	0/0	1 169
Zagospodarowanie ubocznych produktów spalania do: - materiałów budowlanych	1 865/1971-1981	2 380/2008	11 340	11 068
w tym do:			1 607	2 380
- betonu komórkowego	1 041/1076	+	878	-
- betonów kruszywowych	472/1977	+	423	-
- wyrobów ceramicznych	271/1981	?	249	-
- elementów budowlanych	81/1978	?	57	-
- produkcji cementu	719/1978	1 095/2006	569	841
- budowy dróg	1 064/1980	829/2004	1 064	649
- górnictwa	391/1980	5 635/2004	-	2 045
- inne	6 525/1975-1980	5 143/2008	8 095	5 143
w tym:				
- niwelacja terenów	5 745/1980	+	5 745	-
Zagospodarowanie ubocznych produktów spalania węgla, %	-	83/2004	58	69

20 latach nastąpił w wyniku powołania specjalistycznych jednostek gospodarczych z udziałem lub bez udziału energetyki. Wiele działających podmiotów gospodarczych nie tylko zajmuje się unieszkodliwianiem ups, dystrybucją z energetyki do odbiorców, ale także dysponuje własnymi technologiami i zakładami odzysku i produkcji wysoko wartościowych produktów mineralnych; do nich należą między innymi; *EKO EXPORT, EKOTECH, ELTUR-WAPORE, EPO, GREENBET, RENEVIS, ZUMIR, UTEX*.

Te znaczące efekty mogą zostać podważone przez tendencję zaliczenia ubocznych produktów spalania do grupy odpadów niebezpiecznych. Komisja Europejska zleciła opracowanie przeglądu europejskiej listy odpadów i ich właściwości niebezpiecznych, powołując grupę roboczą ds. Listy Odpadów (LOW). Planowane działania niosą ze sobą zagrożenie zmiany statusu ubocznych produktów spalania na odpady niebezpieczne [7,8].

## Koszty i efekty ekonomiczne zagospodarowania ups w kraju

Określenie kosztów gospodarki ups jest trudne z wielu względów, między innymi z następujących powodów:

- różnic w procesach spalania węgla w paleniskach pyłowych, fluidalnych i warstwowych oraz sposobów odsiarczania spalin, decydujących o różnicach ilościowych i jakościowych ups;
- duże zróżnicowanie układów odpowielania, odżużlenia i odsiarczania spalin oraz ich gospodarki w poszczególnych elektrowniach i elektrociepłowniach, a nawet na poszczególnych blokach;
- w niektórych elektrowniach, oprócz systemu suchego transportu i magazynowania popiołów lotnych, eksploatowany jest system hydraulicznego transportu żużla i nadmiaru popiołu lotnego;
- niezagospodarowane ups są deponowane we własnych składowiskach lub zlecane do unieszkodliwiania lub odzysku uprawnionym firmom;
- coraz częściej wytwórca popiołów poprzez ich waloryzację dostarcza popioły lotne i żużle jako produkty do cementowni, betoniarni i na budowy inżynieryjne;
- rozwoju zagospodarowania odpadów paleniskowych ze składowisk, jako źródła produktów handlowych lub sposobu odzysku pojemności składowej składowiska oraz potężenia tych działań.

Tak zróżnicowana gospodarka popiołami lotnymi i żużłami oraz produktami odsiarczania utrudnia ujednoczenie kosztów ups i wymaga indywidualnego analizowania i porównywania kosztów w poszczególnych elektrowniach i elektrociepłowniach. Większość tych kosztów jest praktycznie związana z procesem wytwarzania ciepła i nie obciąża (nie powinna obciążać) gospodarki wytwarzanych ups.

W tych warunkach analizy ekonomiczne gospodarki ups należy ograniczyć do kosztów ich składowania i odzysku, co umożliwi następującą zależność:

$$E_n = \frac{S_w x_1 + S_z x_2 - D x_3}{x_1 + x_2 + x_3} + K_w + M_w + I_w \quad (1)$$

gdzie:

- $E_n$  – całkowity koszt gospodarki określonego rodzaju lub grupy ups „i” u ich wytwórcy, w określonej jednostce czasu;
- $S_w$  – koszty ponoszone przez producentów ups z tytułu ich składowania wraz z wszelkiego rodzaju opłatami, włącznie z opłatami za korzystanie ze środowiska itd.;
- $S_z$  – koszty ponoszone przez producentów z tytułu zlecanego unieszkodliwiania/składowania lub/i odzysku ups;
- $D$  – dochód uzyskiwany przez producenta z tytułu sprzedaży produktów wytwarzanych z ups, na podstawie certyfikatów zgodności, aprobat technicznych, dokumentów odzysku itp.;
- $x_1, x_2, x_3$  – udział ups w poszczególnych rodzajach ich zagospodarowania;
- $K_w$  – koszty badań, aprobat i kontroli jakości ups;
- $M_w$  – koszty marketingu i promocji ups;
- $I_w$  – inne koszty nieuwzględnione.

Ostateczne określenie kosztów gospodarki ups jest możliwe po zsumowaniu kosztów poszczególnych rodzajów ubocznych produktów:

$$\sum E_{1+n} = \frac{\sum (E_{1+n})}{\sum (X_{1+n})} \quad (2)$$

Producent uzyskuje obniżenie kosztów gospodarki ups nie tylko w wyniku sprzedaży odpadów i produktów z nich uzyskiwanych, ale przede wszystkim, jak dotychczas, z różnicy kosztów własnego i podzlecanego składowania i zagospodarowania ups. Ta teza może wydawać się wątpliwą, jeżeli jednak uwzględnić współczesne wymagania związane z tworzeniem składowisk i koszty tych inwestycji, to dotychczasowe sposoby rozwiązywania problemów gospodarki ups należy uznać za efektywne.

Ocena efektów ekonomicznych u producenta z tytułu gospodarki odpadami powinna być dokonywana w stosunku do kosztów ponoszonych (planowanych/prognozowanych) przy braku zewnętrznego zagospodarowania ups. W tych to warunkach przekazywanie ups nawet za symboliczną złotówkę do odbiorców zewnętrznych też może być/jest dobrym biznesem dla dwóch stron.

Pozyskanie pełnych informacji o kosztach zagospodarowania ups, ze względu na ich charakter, jest trudne. Przeprowadzone przez PSE [9] analizy wykazują, że w roku 2000 udział kosztów zagospodarowania ups w średniej cenie energii elektrycznej wahał się od -0,2 do +1,2%. Autorzy analizy podkreślają jednak, że po uwzględnieniu kosztów transportu, składowania i utylizacji zdeponowanych odpadów udział kosztów gospodarki ups może wzrosnąć do 4,5% (8,9 zł/MWh), przy kosztach pozyskania mieszanki dla odbiorców zewnętrznych wynoszących około 1% ceny energii elektrycznej (1,9 zł/MWh).

Natomiast koszty zagospodarowania poszczególnych rodzajów ubocznych produktów spalania w roku 2000 wahały się w szerokim zakresie od -6,5 do 51,00 zł/Mg, co ilustrują dane w tabeli 2.

## Koszty zagospodarowania stałych produktów spalania węgla w 2000 r. [9]

Rodzaj stałych produktów spalania	Koszty, zł/Mg	
Deponowanie na składowiskach żużla i popiołu	30,00 – 51,00	-
Wykorzystanie:		
– żużla	0 – 16,90	-
– popiołu	12,00 – 25,00	-
– mieszanki żużlowo-popiołowej	-6,50 – 22,00	-
– gipsu	-3,80 – 5,00	-
– popiołu z odsiarczania suchego*	12,00 – 28,00	-
– popiołu z odsiarczania półsuchego*	14,00 – 39,00	-
– popiołu fluidalnego	13,70 – 31,20	-
Produkty na bazie ups:		
– stabilizat na bazie popiołów z odsiarczania	28,00 – 39,00	-
– spojwa popiołowe	-	20 – 200
– mikrosfery wilgotne	-	400 – 600
– mikrosfery suche	-	1.600 – 8.000

\* Koszty maksymalne obejmują przygotowanie stabilizatu

Nieoficjalny podgląd na obecnie kształtujące się koszty przekazywania przez energetykę ups wykazuje, że podane powyżej wartości nie uległy zasadniczym zmianom. Można natomiast, na podstawie średnich arytmetycznych niepublikowanych oficjalnie kosztów zagospodarowania ups, ułożyć w kolejności malejących kosztów następujące ups:

- popioły z odsiarczania suchego i półsuchego,
- popioły lotne,
- popioły fluidalne,
- mieszanki żużlowo-popiołowe,
- żużel.

Jest naturalne, że występują tak duże różnice w kosztach zagospodarowania pomiędzy poszczególnymi rodzajami ups. Różnice te wynikają z powstałego i powstającego rynku różnorodnego i masowego zagospodarowania poszczególnych rodzajów odpadów z energetyki.

Należy jednak pamiętać, że ukształtowane w energetyce koszty zagospodarowania odpadów mogą silnie ewoluować w funkcji czasu. Obecnie, przy dużym rozwoju robót inżynierskich, wdrożonej profilaktyce przeciwpożarowej w górnictwie i polityce ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> obserwuje się znaczący wzrost zagospodarowania ups poza energetyką i obniżania kosztów gospodarki nimi u ich wytwórców. Prognozy zmniejszających się obszarów budownictwa inżynierskiego i rozwoju kryzysu gospodarczego mogą natomiast w poważnym stopniu wpłynąć na stopień ich zyskowego zagospodarowania przez jednostki spoza energetyki i jednocześnie będą przyczyną wzrostu kosztów zagospodarowania u ich wytwórców.

Rozwój procesów kryzysowych w gospodarce może także oddziaływać pozytywnie na rozwój zagospodarowania ups i znaczące obniżanie ich kosztów. Warunkiem takiego rozwoju jest prowadzenie w większym stopniu odzysku u i przez producentów odpadów.

Dobrym przykładem takich rozwiązań może być prowadzenie procesów odzysku na terenie elektrowni poprzez produkcję popiołów aktywowanych i kruszyw żużlowych oraz produktów specjalnych (np. superpucolana) [10,11]. W tych warunkach koszt wybudowania instalacji zwraca się w krótkim czasie, między innymi z powodu minimalizacji kosztów transportu, źródeł energii itp. Analogiczne efekty szybkiego zwrotu kosztów inwestycyjnych uzyskano w PKW SA przez zastosowanie popiołów fluidalnych do produkcji mieszanek kruszynowo-spojowych na bazie średnioziarnistych odpadów węglowych [12].

## Doświadczenia zagraniczne

Popioły lotne i żużle, a następnie produkty odsiarczania spalania, są już co najmniej od 40 lat w krajach wysoko rozwiniętych w większości produktami handlowymi. Niejednokrotnie podkreślone jest, że bez popiołów nie jest możliwe zrealizowanie w obecnych technologiach i przy zakładanym tempie, wielu przedsięwzięć budowlanych i inżynierskich (rys. 1). Uboczne produkty spalania węgla stosowane są samodzielnie lub jako surowiec albo jako aktywny dodatek w większości współczesnych technologiach i w obiektach budowlanych i inżynierskich. Budowa na przykład najwyższego wieżowca świata (Burj Khalifa Tower, 828 m) pochłonięła 330 000 m<sup>3</sup> betonu, w którego każdym m<sup>3</sup> znajdowało się od 160 do 300 kg kwalifikowanego popiołu [13]. Odwęglony popiół lotny stosowany jest także na budowie Freedom Tower (546 m) w Nowym Yorku w ilości od 20 do 40% dodatku do betonów.



Rys. 1. Przykład zastosowania popiołów lotnych na budowie Petronas Twin Towers [13]

W roku 2004 w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej [14] po raz pierwszy wykorzystanie ups przekroczyło 40% wyprodukowanych ups (122 mln Mg). Wartość rynkowa ups jest uzależniona od wielu czynników, w tym od ich jakości, odległości do użytkowników oraz przepisów stanowych i lokalnych.

Amerykańskie Stowarzyszenie ACAA szacuje wartość handlową niektórych popiołów lotnych i żużli, w zależności od kierunku ich zastosowania, następująco:

popioły lotne do:	USD/Mg
produkcji cementu	40 – 60
stabilizacji gruntów	10 – 20
do odśnieżania i walki z gotoledzią wraz z żużlem	3 – 6
do podbudów dróg	4 – 8
do cementacji odwiertów naftowych i stabilizacji odpadów	15 – 25
jako wypełniacz	1

ACAA podkreśla jednocześnie, że cena sprzedaży to jednak tylko jeden aspekt ekonomiczny wykorzystania ups. Jeśli ups nie są z korzyścią zagospodarowane, elektrownie generują koszty związane z likwidacją odpadów, które mogą być niskie i wynosić 3 USD/Mg przy likwidacji na miejscu lub dochodzić do 50 USD/Mg w przypadku wyrównywania terenu na obszarach ubogich w przestrzeń lub też przy transporcie na długich dystansach.

W warunkach Wielkiej Brytanii analizowano wpływ przedsięwzięcia inwestycyjnego na efekty ekonomiczne na przykładzie elektrowni *Didcot*, wytwarzającej rocznie 2 mln Mg popiołów

lotnych [15]. Wstępną analizę zysków i strat dla zakładu przetwarzającego popiół lotny przez 9 lat przedstawiono w tabeli 3. Uruchomienie produkcji materiałów budowlanych, przy kosztach ich wytwarzania z popiołów lotnych w wysokości 25 mln GBP/rok, tworzy zysk rzędu 25 mln GBP/rok.

Na międzynarodowych rynkach surowców i produktów mineralnych spotyka się bogatą ofertę sprzedaży i dostaw ups. W zależności od ich rodzaju oraz wielkości i miejsca dostawy ceny ich znacznie się różnią:

- popiół lotny 46 USD/Mg przy dostawach powyżej 10 000 Mg (W < 3%; LOI < 6%; zaw. nadziarna na sicie 45 μm poniżej 35 %);
- popiół lotny 50 – 80 USD/Mg;
- popiół lotny na budowie drapaczy chmur w Dubaju 80 – 84 USD/Mg;
- mikrosfery 700 – 900 USD/Mg.

**Tabela 3**

**Analiza zysków i strat dla zakładu przetwarzającego 400 tys. ton/rok popiołów lotnych [15]**

Wyszczególnienie	Koszty, mln GBP	Dochód, mln GBP
Wstępny koszt zakładu obejmujący teren i budynki, dostęp do dróg, obiekty magazynowe i wyposażenie zakładu	9	
Koszty produkcji przy stawce 8 GBP/Mg popiołu	16	
Sprzedaż w cenie 25 GBP/Mg wyrobów z popiołu lotnego		50
Zysk netto przez 9 lat		25

## Perspektywy zwiększenia zagospodarowania ubocznych produktów spalania w Polsce

Analiza programów inwestycyjnych na najbliższe lata wykazuje znaczący wzrost obiektów związanych z rozwojem energetyki opartej na paliwach kopalnych (ok. 50 mld zł), wydobywaniu gazu łupkowego (ok. 50 mld zł) i morskiej energetyce wiatrowej. Realizacja wszystkich tych obiektów związana jest z używaniem dużych ilości betonów, niejednokrotnie betonów najwyższych marek.

Wdrażane w ostatnich latach betony samozagęszczalne SCC (Self Compacting Concretes), wymagające między innymi stosowania kwalifikowanych popiołów lotnych, gwarantują uzyskiwanie betonów najwyższych wytrzymałości (M60 i 80, a ostatnio M90 MPa). Ponadto, zastosowanie popiołów pozwoliło zmniejszyć nie tylko ilość cementu, ale również ilość wody w masie betonowej, przy jednoczesnym wzroście jej płynności (maksymalna wysokość pompowania betonu 601 m). Betony SCC z popiołami lotnymi wykazują także wyższą odporność na oddziaływanie środowiska agresywnego (chlorków, siarczanów itp.). Wszystkie te fakty tłumaczą powszechność stosowania popiołów i betonów SCC na największych budowach świata (wieżowce, hale, mosty chłodnie kominowe itd.).

Najwyższy czas, by uruchomić w kraju produkcję popiołów kwalifikowanych i wdrożyć betony samozagęszczalne na obiektach energetycznych (fundamenty pod turbiny i kotły, chłodnie kominowe, kominy, farmy morskie) i w wiertnictwie za gazem łupkowym. W tym ostatnim obszarze szczególne znaczenie posiadają dostawy mikrosfer.

## Podsumowanie

Na koszty zagospodarowania ubocznych produktów spalania duży wpływ ma sposób ich odzysku i unieszkodliwiania. W większości elektrowni, elektrociepłowni i ciepłowni obniżenie kosztów wynika podstawowo ze zlecenia ich zagospodarowania w górnictwie, przemyśle cementowym i specjalistycznym firmom.

Najwyższe efekty ekonomiczne uzyskuje się z tytułu odzysku ups i tworzenia surowców/produktów na ich bazie. W tych warunkach szczególne znaczenie mają prowadzone badania nad opracowaniem i wdrożeniem nowych kierunków ich odzysku oraz realizowanie nieodzownych inwestycji.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Hycnar J.: Czynniki stymulujące wykorzystanie odpadów poprodukcyjnych jako surowców wtórnych. *Gospodarka Materiałowa* 1981, nr 4.
- [2] Hycnar J.: Popioły elektrowniane – niezbilansowana baza surowców mineralnych. Konferencja ITB 1982.
- [3] Hycnar J.J.: Technologie przetwarzania odpadów kompleksu paliwowo-energetycznego. *Inżynieria Mineralna* 2002, nr S1/7.
- [4] Szczygielski T.: CCP used In Road construction. International Conference EuroCoalAsh 2010. Copenhagen, Denmark.
- [5] Szczygielski T.: Wprowadzenie do zielonej geotechniki. Politechnika Gdańska, 14 czerwca 2011.
- [6] Hycnar J.J.: Uboczne produkty spalania źródłem efektów ekonomicznych podmiotów gospodarczych. XIX Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”. Sopot, 24-26 października 2012.
- [7] Szczygielski T.: Wyzwania dla gospodarki UPS w Polsce. Tamże.
- [8] Jarema-Suchorowska S.: Analiza skutków zmiany klasyfikacji UPS na niebezpieczne. Tamże.
- [9] Gajda A., Jaworski W., Barc W.: Prognoza wytwarzania ubocznych produktów spalania w energetyce zawodowej do 2015 roku. *Biuletyn Miesięczny PSE SA* 2002, nr 11 (137), s. 2-14.
- [10] Kolorz P.: Wpływ wprowadzania przemysłowego przetwarzania popiołów i żużli na koszty zagospodarowania ups w elektrowniach zawodowych. IV Konferencja „Eksplotacja maszyn i urządzeń energetycznych”. TGPE. Szczyrk, 23-25 listopada 2005.
- [11] Lerch K., Zydawlewicz J.: Superpucolana – wysokosprawy dodatek pucolanowy [w:] Materiały XIX Międzynarodowej Konferencji „Popioły z energetyki”, Sopot, 24-26 października 2012.
- [12] Fraś A., Przysaś R., Hycnar J.J.: Zastosowanie popiołów fluidalnych dla zwiększenia zagospodarowania odpadów wydobywczych. Tamże.
- [13] Mir M.A.: Evolution of concrete skyscrapers. *eJSE* 2001, nr 1.
- [14] Clean Coal Technology. Coal Utilization By-Products Topical Report Number 24. August 2006. Market Analysis.
- [15] Riggs R., Crowley B.J.B., Kemp I.C.: PFA from Didcot power station. Raport No. SRL/PFA/001.4d. Save Radley Lakes. September 2007.
- [16] Szczygielski K.: Coal ash management - retrospective and perspective. International Conference EuroCoalAsh 2012. Thessaloniki, Greece.

