

WYKORZYSTANIE ODPADÓW ELEKTROWNIANYCH W ASPEKcie OCHRONY ŚRODOWISKA

Na tle znanych i stosowanych metod utylizacji odpadów elektrownianych przedstawiono sytuację w elektrowni „Turów”. Na podstawie badań zawartości uciążliwych zanieczyszczeń w popiołach lotnych i żużlach wskazano bezpieczne drogi zagospodarowania odpadów, a przede wszystkim przedstawiono niebezpieczeństwo dla ludzkiego zdrowia, powodowane niewłaściwą utylizacją odpadów. Wysoka radioaktywność przekreśla możliwości zastosowania popiołów lotnych w budownictwie mieszkaniowym, należy natomiast rozwijać zastosowanie tychże odpadów do produkcji poszukiwanych: tlenku i siarczanu glinu.

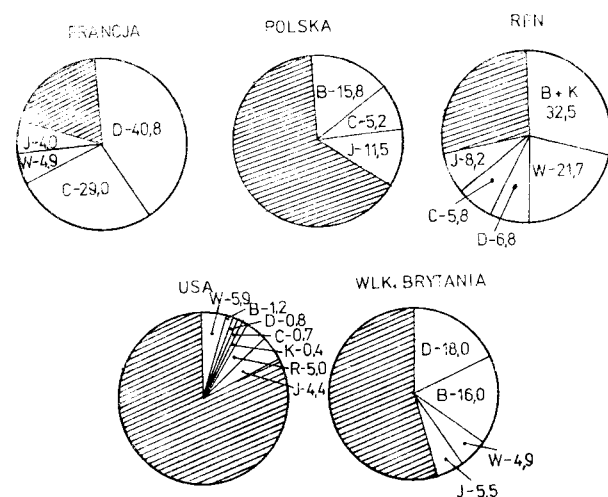
Analizując prognozy zapotrzebowania na energię nietrudno zauważyć, że podstawowym źródłem będzie nadal węgiel. Energetyka oparta na spalaniu węgla ma wiele zalet, szczególnie w naszym kraju, nie należy jednak zapominać o wadach, wśród których na czoło wysuwa się nadmierne zanieczyszczenie środowiska. Zanieczyszczenia powstałe podczas spalania węgla trafiają do środowiska głównie w wyniku emisji spalin do atmosfery i dalej migracji do pozostałych komponentów środowiska oraz w wyniku niewłaściwej utylizacji odpadów stałych: żużli i popiołów lotnych. O ilościowym i jakościowym rozdziale zanieczyszczeń na żużel, popiół lotny i popiół kominowy, a więc praktycznie o drogach migracji zanieczyszczeń do środowiska decyduje mechanizm wzbogacania poszczególnych pierwiastków w strumieniu spalin na drodze palenisko—komin. Mechanizm wzbogacania zanieczyszczeń został opracowany wcześniej [1], a celem niniejszej pracy jest przedstawienie w oparciu o uzyskane wyniki możliwości bezpiecznego dla środowiska naturalnego wykorzystania stałych odpadów elektrownianych.

Sposoby zagospodarowania odpadów elektrownianych

Stosowanie popiołów lotnych i żużli do celów gospodarczych na szerszą skalę rozpoczęło się po roku 1950, głównie w krajach, które produkują niewielkie ich ilości, np. Francji czy Danii [2, 3]. W Polsce wykorzystanie odpadów elektrownianych nie było do tej pory specjalnie popularne. Wynosi ono ok. 35% całkowitej, powstałej po spaleniu węgla masy popiołów. Dotyczy to popiołów lotnych, powstałych w wyniku spalania węgla kamiennego. Wykorzystanie popiołów z węgla brunatnego jest znacznie mniejsze. Głównym odbiorcą tych popiołów jest drogownictwo [4, 5, 6]. Przewiduje się, że do roku 1990 drogownictwo zagospodaruje ok. 12%

odpadów elektrownianych. Zakłada się, że z tej ilości odpadów ok. 30% przypadać będzie na popioły lotne z węgla brunatnego i ok. 70% na popioły z węgla kamiennego [7]. Przykładem największego zagospodarowania popiołów lotnych przez drogownictwo są obecnie Francja i USA [2, 8]. Stwierdzenie to ilustruje rys. 1 przedstawiający procentowe ilości i kierunki wykorzystania odpadów elektrownianych z węgla kamiennego w 1972 r. we Francji, RFN, Wielkiej Brytanii, Polsce i USA. Innymi sposobami zagospodarowania odpadów elektrownianych są:

- wykorzystanie popiołów lotnych jako materiału budowlano-drogowego,
- stosowanie popiołów lotnych do stabilizacji gruntów.



Rys. 1 Procentowe ilości i wykorzystanie odpadów elektrownianych z węgla w 1972 r. we Francji, RFN, Wielkiej Brytanii, Polsce i USA 30.
B — beton, C — produkcja cementu, D — drogownictwo, I — inne, K — kruszywa lekkie, R — niezidentyfikowane, W — wypełniacze wyrobisk.

Pełne wykorzystanie tych odpadów wiąże się z wieloma czynnikami, tak natury gospodarczej i organizacyjnej jak i badawczej. Do tej pory nie ma dokładnego rozeznania na temat niedogodności stosowania popiołów lotnych i żużli, wynikających ze składu fizykochemicznego popiołów, ich radioaktywności itp. w wymienionych dziedzinach gospodarki. W związku z powyższym na terenie elektrowni Turów podjęto badania właściwości fizyko-chemicznych węgla brunatnego, żużli i popiołów lotnych, w aspekcie ich (odpadów) bezpiecznej utylizacji. W niniejszej pracy zaprezentowano dotychczas uzyskane wyniki. I tak w tab. 1 zestawiono udziały głównych tlenków metali w żużlach elektrownianych i popiołach lotnych z elektrowni Turów. Są to wartości średnie z pomiarów

Tabela 1
WYNIKI POMIARÓW STĘŻEŃ GŁÓWNYCH TLENKÓW
METALI W ODPADACH ELEKTROWNIANYCH

Tlenki metali	Jednostki	Żużel	Popiół lotny
SiO ₂	%	47,4	51,4
Fe ₂ O ₃	%	4,0	5,4
Al ₂ O ₃	%	39,4	30,6
MgO	%	2,0	4,7
CaO	%	0,6	1,4
K ₂ O	%	0,5	1,4
Na ₂ O	%	0,4	0,9
SO ₃	%	0,7	0,4
P ₂ O ₅	%	0,1	0,2
Mn ₂ O ₄	%	0,2	0,1
ZnO	%	0,1	0,3

Tabela 2
WYNIKI POMIARÓW STĘŻEŃ METALI W ODPADACH
ELEKTROWNIANYCH

Pierwiastki	Jednostki	Żużel	Popiół lotny
As	μg/g	95,0	229,0
Cu	μg/g	108,0	216,0
Hg	μg/g	0,06	0,02
Mo	μg/g	29,0	92,0
Nb	μg/g	20,2	25,8
Pb	μg/g	24,8	62,5
Rb	μg/g	100,0	96,0
Sb	μg/g	15,2	29,3
Se	μg/g	8,9	12,5
Sr	μg/g	1180,0	1120,0
Y	μg/g	85,6	87,0
Zn	μg/g	81,1	226,0
Zr	μg/g	360,0	330,0

Tabela 3
WYNIKI POMIARÓW AKTYWNOŚCI RADIONUKLIDÓW
W ODPADACH ELEKTROWNIANYCH

Radionuklidy	Jednostki	Żużel	Popiół lotny
U	μg/g	4,80	6,00
Th	μg/g	14,61	16,07
K	μg/g	7300,0	7840,0
⁴⁰ K	pCi/g	6,26	6,80
²⁸⁸ Th	pCi/g	1,66	72
²⁸⁸ Ra	pCi/g	1,65	1,71
²¹⁰ Pb	pCi/g	0,52	1,31
²²⁶ Ra	pCi/g	2,05	2,10
²³⁸ U	pCi/g	1,63	1,96
²³⁵ U	pCi/g	0,082	0,097

prowadzonych w latach 1970—1980. Z kolei w tab. 2 przedstawiono wyniki pomiarów stężeń niektórych metali zawartych w żużlu i popiele lotnym, a w tab. 3 wyniki pomiarów aktywności radionuklidów w tych odpadach. Spośród różnych pierwiastków, stanowiących zanieczyszczenie węgla jako paliwa energetycznego do badań wytypowano te, które występują w węglu w największych ilościach oraz te, które są najbardziej toksyczne. Dane zawarte w ostatnich dwóch tabelach są wartościami średnimi z pomiarów prowadzonych w latach 1977—1980. Aby mieć pełną inwentaryzację zanieczyszczeń niesionych do środowiska z odpadami elektrownianymi należy dodać, że rocznie „produkuje” się w el. Turów ok. 4 mln ton odpadów stałych. Niewielka część emitowana jest bezpośrednio do atmosfery, zdecydowana większość pozostaje jednak do zagospodarowania. Jak zatem przedstawiają się możliwości bezpiecznej utylizacji odpadów elektrownianych z elektrowni Turów?

Popioły lotne i żużle elektrowniane stosowane w drogownictwie

Jednym ze wskazanych zastosowań odpadów elektrownianych jest ich zagospodarowanie w drogownictwie. Popioły lotne i żużle są używane jako:

- materiały na nasypy [2—4, 8—16]
- wypełniacze do mas bitumicznych [2, 8, 9, 11, 17, 18]
- dodatki ulepszające przy stabilizacji gruntów sypkich cementem [19—21]
- betony popiołowe i wykonane z nich podbudowy [22—24].

Przy wbudowywaniu w nasypy drobnoziarnistych popiołów lotnych zaleca się je chronić zarówno od spodu, przed kapilarnym podciąganiem wody, jak i z góry, przed nawilgoceniem wodą pochodzenia opadowego. Ponieważ kapilarność popiołów lotnych jest duża a żużli mała, należy stosować mieszankę odpowiednio dobraną o wymaganym zagęszczeniu. Jako czynniki kryterialne doboru popiołów lotnych i żużli przyjęto więc zawartość frakcji <0,075 mm, gęstość pozorną i wilgotność. Mieszaninę popiołowo-żużlową podzielono na dwie strefy: gruboziarnistą — I i drobnoziarnistą — II. W tab. 4 przedstawiono wyniki badań niektórych właściwości fizycznych mieszanin z elektrowni Turów. Z zestawienia widać, że żużle i popioły lotne z tej elektrowni stanowią dobry materiał na nasypy, przy czym decyduje o tym odpowiednie uziarnienie mieszanin (dużo cząstek gruboziarnistych), stosunkowo mała gęstość pozorną i wilgotność, odpowiedzialna za migrację zanieczyszczeń do wód gruntowych i agresywność w stosunku do materiałów budowlanych. Z kolei w tab. 5 zestawiono wartości parametrów, będących kryterium popiołu lotnego, stosowanego jako dodatek przy stabilizacji gruntów sypkich cementem, jako wypełniacze do mas bitumicznych i jako betony popiołowe i wykonane z nich podbudowy. Stwier-

Tabela 4

**WYNIKI BADAŃ NIEKTÓRYCH WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH
MIESZANIN POPIOŁOWO-ZUŻŁOWYCH Z EL. TURÓW**

Strefa	Gęstość po- zorna (kg/m ³)	Wilgotność (%)	Zawartość frakcji 0,075 mm (%)
I	765,0	46,5	48,6
II	736,0	62,5	59,1

Tabela 5

**ZESTAWIENIE WARTOŚCI PARAMETRÓW BĘDĄCYCH KRYTERIUM
JAKOŚCI POPIOŁU LOTNEGO, STOSOWANEGO JAKO DODATEK
PRZY STABILIZACJI GRUNTÓW SYPKICH CEMENTEM, JAKO
WYPEŁNIACZE DO MAS BITUMICZNYCH I JAKO BETONY
POPIOŁOWE**

Parametr kryterialny	Jednostka	Wartość dla Turowa	Wartość kryterialna
Zawartość SiO ₂	%	51,4	40,0
Zawartość MgO	%	0,9	4,0
Zawartość Na ₂ O	%	1,4	1,5
Zawartość SO ₃	%	0,4	3,0
Zawartość calc. CaO	%	4,7	2,0
W tym zaw. woln. CaO	%	1,3	0,4
Straty prażenia (800 C)	%	2,4	10,0
Pow. właściwa	m ² /kg	3960,0	250,0
Wilgotność	%	12,8	10,0

dzić należy, że popioły lotne z elektrowni Turów spełniają w większości wymagania kryterialne. Szczególnie istotne przy tym kierunku zagospodarowania odpadów elektrownianych, jest poznanie własności morfologicznych cząstek popiołów lotnych. Dyskutowano je na podstawie badań mikroskopowych, wyszczególniając 11 głównych klas morfologicznych (od A do K) [25, 26]. Przy podziale kierowano się nieprzezroczystością, ukształtowaniem i rodzajem inkluzji. Klasę A stanowiły cząstki przezroczyste, bezpostaciowe a ostatnią klasę K cząstki nieprzezroczyste i niekuliste. Nieprzezroczystość cząstek jest związana z ich składem chemicznym, a ukształtowanie zależy od czasu spalania i temperatury w komorze. Analizując cząstki popiołu lotnego z elektrowni Turów, okazało się, że dla frakcji drobnych przeważa typ J, a więc są to cząstki kuliste i przezroczyste, dla frakcji grubszych natomiast przeważa typ G, a więc cząstki również przezroczyste ale niekuliste. Przezroczystość kulek świadczy o dużej zawartości krzemionki, zarówno w węglu brunatnym z Turowszowa jak i w powstałym po jego spalaniu żużlu i popiele lotnym. Węgiel brunatny z Turowszowa zawiera duże ilości popiołu — ok. 27% i po spalaniu powstają duże ilości żużla i popiołu lotnego, bogate w krzemionkę. Potwierdziły to m. in. opisane badania morfologiczne. Biorąc pod uwagę, że zawartość krzemionki jest jednym z głównych parametrów decydujących o przydatności popiołów lotnych i żużli w drogownictwie, można wyciągnąć wniosek, że ten kierunek zagospodarowania odpadów elektrownianych jest dla elektrowni Turów zalecany.

Popioły lotne i żużle elektrowniane stosowane w budownictwie mieszkaniowym

Poważnym mankamentem stosowania popiołów lotnych ogólnie a kruszywa w betonach w szczególności, jest duża radioaktywność popiołów lotnych. Biorąc jako dane wyjściowe:

— zawartości poszczególnych radionuklidów naturalnych w węglu i popiołach lotnych

— znajomość procesu wzbogacania poszczególnych radionuklidów podczas spalania węgla [1]

— założenie z projektu TVA (Tennessee Valley Authority w USA) [21], że proporcja cementu portlandzkiego 250 do popiołu lotnego wynosi jak 2,5 do 1,0. Obliczono dawki promieniowania dla organizmu ludzkiego przy stosowaniu popiołów lotnych jako dodatków hydraulicznych lub części kruszywa w betonach cementowych.

Do tych obliczeń przyjęto kolejne założenia: — 15-godzinne przebywanie w ciągu doby w pokoju o pow. 20 m². Z normatywnego zużycia materiałów wynika, że na wybudowanie 1 m² powierzchni pokoju (biorąc pod uwagę mury, tynki, jeden strop i warstwę wyrównawczą) w budownictwie jednorodzinnym potrzeba średnio: 160 sztuk cegieł, 260 kg cementu portlandzkiego 250, 1,1 m³ piasku, 0,9 m³ wody, 0,17 m³ żwiru i ok. 110 kg wapna hydratyzowanego. Na podstawie wcześniej podanych założeń obliczono, że na 1 m² powierzchni potrzeba ok. 100 kg popiołu lotnego. Mając dane dotyczące aktywności poszczególnych radionuklidów naturalnych w popiele lotnym (tab. 3) przystąpiono do obliczania dawek przyjmowanych przez organizm ludzki w pomieszczeniu mieszkalnym o powierzchni 20 m². Obliczenie wykonano zakładając absorpcję promieniowania wewnątrz murów. Skorzystano ze wzoru zaproponowanego przez Shapiro [27]:

$$D = \frac{5000 C E f t k}{d^2}$$

gdzie:

D — dawka promieniowania pochłoniętego (mrem/rok)

C — aktywność poszczególnych radionuklidów (mCi)

E — energia fotonu (MeV)

f — udział fotonów o energii E

t — czas = 15 h/dobę · 365 dni

k — współczynnik absorpcji promieniowania

d — średnia odległość od źródła (w cm) (założono 100 cm).

Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 6. Z zestawienia tego wynika, że wartość sumaryczna dawki jest mniejsza od dawki maksymalnej dopuszczalnej w ciągu roku, obliczanej na całe ciało. Według zaleceń Międzynarodowej Komisji Ochrony przed Promieniowaniem (ICRP) wartość ta dla ludności zamieszkującej w sąsiedztwie obszarów kontrolowanych wynosi 500 mrem/rok [28]. Zatem człowiek mieszkając w pomieszczeniu zbudowanym z użyciem popiołów lotnych z el. Turów, jako dodatków hydraulicznych lub części kruszywa w betonach cementowych otrzymuje dawkę promieniowania na całe ciało mniejszą od dopuszczalnej. W przypadku Turowa dawka ta stanowiłaby ok. 25% dawki maksymalnej dopuszczalnej. Według

Tabela 6

**WYNIKI OBLICZEŃ AKTYWNOŚCI RADIONUKLIDÓW W POWIETRZU
W POMIESZCZENIU DO BUDOWY KTÓREGO UŻYTO POPIÓŁ LOTNY
Z ELEKTROWNI TURÓW**

Radionuklidy	Aktywność w powietrzu	Doza na całe ciało mrem/rok
228 Th	4,65	20,50
228 Ra	4,65	20,50
210 Pb	4,36	19,23
238 U	8,70	38,37
226 Ra	5,53	24,39
235 U	0,43	1,90
Suma	28,32	124,89

autorów w przypadku stosowania popiołów lotnych z Turowa radioaktywność powietrza w pomieszczeniu wzrasta 2,5-krotnie. Są to wartości niebezpieczne dla ludzkiego zdrowia. Maksymalne dawki dopuszczalne wydają się stanowczo za duże. W ostatnim czasie (ostatnim pięcioleciu) są one poddawane ostrej krytyce. M.in. na ostatnim Międzynarodowym Kongresie Ekologii Człowieka w Wiedniu [29] wielu dyskutantów twierdziło, że wartości, które powinny obowiązywać, stanowiłyby jedynie 1% wartości obecnie uznawanych za dopuszczalne. W tej sytuacji stosowanie popiołów lotnych w budownictwie mieszkaniowym byłoby wręcz niemożliwe. Popioły lotne z el. Turów znajdowały jednak zastosowanie do wyrobów betonowych. W stanie zwilżonym roczne dostawy dla tego rodzaju wyrobów wynosiły ok. 20 tys. ton. Odrębnym zagadnieniem jest dostawa turowskiego popiołu lotnego dla przemysłu cementowego. Już w 1968 r. przeprowadzono próby zastosowania lotnego popiołu z Turowa do produkcji cementu w cementowni „Podgrodzie”. Z kolei w Zakładach Chemicznych „Wizów” zużywano rocznie kilkanaście tys. ton popiołu lotnego w stanie zwilżonym do produkcji klinkieru portlandzkiego. Nie jest jednak celem pracy dokumentowanie gdzie i ile odpadów energetycznych z elektrowni Turów zużywano do produkcji materiałów budowlanych. Autorom zależy na wskazaniu bezpiecznych dróg utylizacji popiołów lotnych i żużli, a do takich budownictwa mieszkaniowego zaliczyć nie można. Można natomiast polecać zastosowanie popiołu lotnego do produkcji tlenku glinu.

Zastosowanie popiołu lotnego do produkcji tlenku glinu

Zapotrzebowanie na aluminium rośnie z roku na rok. Wzrost produkcji jak również konsumpcji jest rzędu 130% w każdym pięcioleciu. Rosną również ceny za 1 tonę. W tej sytuacji nieodzownym było sięgnięcie po technologie produkcji tlenku glinu, oparte na popiołach lotnych. Popioły z el. Turów nadają się do tego

wyjątkowo, zawierają bowiem w swym składzie ponad 30% Al_2O_3 . Często spotkać można stwierdzenie, że produkcja tlenku glinu opłacalna jest tylko z takich surowców, w których zawartość tlenku glinu jest wyższa od 30%. Stąd należy wysunąć wniosek, że np. wybudowanie Fabryki Tlenku Glinu w Nowinach k. Kielc byłoby ekonomicznie nieuzasadnione gdyby do produkcji użyto inne surowce niż popiół z el. Turów. Większość pozostałych odpadów elektrowniowych, występujących w dużych ilościach w Polsce, nie zawiera tak wysokiej ilości tlenku glinu jak popiół lotny z Turowa. Ze względu na konieczność granulowania popiołu — jako wsadu do pieca obrotowego, w którym łącznie z kamieniem wapiennym jest wypalany, stosowane być muszą również ropy przywęglowe z zagłębia turowskiego (zawierają również w granicach 30% Al_2O_3).

Obecnie do produkcji tlenku glinu stosowanych jest kilka technologii. Jedną z nich jest metoda spiekowo-rozpadowa, opracowana przez prof. Grzymka, inną metoda kwaśna prof. Bretsznajdera. Ze względu na łatwość elektrolitycznego wytopu aluminium, jak również koszt priorytetu obdarzono metodą spiekowo-rozpadową. Dla produkcji tlenku glinu tą metodą zamierzano od 1978 r. przekazywać ponad 300 tys. ton rocznie popiołu lotnego. Z perspektywy należy stwierdzić, że celu nie osiągnięto, a jest to przecież wyjątkowo polecana droga utylizacji odpadów elektrowniowych z punktu widzenia ochrony środowiska.

Podsumowanie

Z punktu widzenia ochrony środowiska jedne metody utylizacji odpadów elektrowniowych są polecane, inne nie, jedne są bezpieczne, inne wręcz groźne. Należy zaznaczyć, że nie wszystkie ze znanych przedstawiono. Nie prezentowano zastosowania popiołów lotnych z elektrowni Turów do produkcji wypalanych wyrobów ceramicznych, do wytwarzania piano-gazo-silikatów, czy też do produkcji rolniczej. Pominięto zastosowanie żużli w hutnictwie metali kolorowych (jako reduktora zamiast stosowanego deficytowego koksiku stanowiącego odsiew drobnych frakcji koksu), w przemyśle ceramicznym porowatych kształtek izolacyjnych czy też w energetyce (jako paliwa produkcyjnego — po wtórnym przemiale w młynach). Skoncentrowano się na tych zastosowaniach, które są bądź najszersze (w el. Turów) bądź najmniej niebezpieczne. Okazuje się, że efekty ekonomiczne, liczone w uzyskanych złotówkach nie zawsze idą w parze z daleko droższym efektem jakim jest ochrona zdrowia ludzi. Ładunek różnego rodzaju zanieczyszczeń zawartych w odpadach elektrowniowych powinien być również jednym z głównych kryteriów kwalifikacyjnych popiołów lotnych czy żużli do dalszej ich utylizacji. W pracy wskazano, że w przypadku elektrowni Turów niebezpieczne jest zagospodarowywanie odpadów w budownictwie zwłaszcza

cza mieszkaniowym. Polecić należy natomiast stosowanie popiołów lotnych do produkcji tlenku glinu i to w szerszym zakresie niż dotychczas. Z problemu szerszego zastosowania popiołów m. in. do produkcji tlenku glinu czy siarczanu glinu wiąże się sprawa ich transportu do fabryki, przede wszystkim braku wagonów kolejowych. Biorąc pod uwagę, że zapotrzebowanie łącznie iłów i popiołów lotnych z Turossowa na produkcję tlenku glinu metodą spiekowo-rozpadową wzrosło do 1990 r. do 750 tys. t/rok, problem ich transportu staje się sprawą pierwszoplanową. Do transportu dochodzi również wyposażenie elektrowni w urządzenie do zsypania popiołu lotnego na wagony-cysterny. I w tym zakresie jest wiele do odrobienia, brakuje przede wszystkim rękawów zasypowych. W tej sytuacji ciekawą wydaje się być propozycja transportu popiołów lotnych i żużli do kopalni, gdzie byłyby one użyte do wypełniania wyrobisk. Tam, nawet dość wysoka radioaktywność nie byłaby tak szkodliwa jak w przypadku stosowania odpadów w budownictwie. Należy wtedy zwrócić szczególną uwagę na możliwość infiltracji zanieczyszczeń z wodą do gleb. Do bezpiecznych zaliczyć należy także zastosowanie odpadów w drogownictwie, chociaż u kierowców zawodowych stwierdzono podwyższoną radioaktywność globalną we krwi. Są sugestie, że może ona być związana z zastosowaniem popiołów lotnych i żużli do budowy dróg i nasypów. W pracy świadomie pominięto problem ochrony środowiska związany z transportem odpadów na terenie samej elektrowni.

LITERATURA

1. J. PACYNA: Elektrownie węglowe jako źródło skażenia środowiska metalami i radionuklidami, Monografia habilitacyjna, prace Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej Nr 47, Wrocław, 1980.
2. S. MAJKOWSKI: Odpady elektrowniane w Wielkiej Brytanii, prace Zakładu Doświadczalnego Utylizacji Odpadów Elektrownianych Katowice, 1974.
3. A. FALKIEWICZ, S. KUZMICH, E. OLINGER, J. PACHOWSKI, J. WOŹNICA: Wykorzystanie odpadów elektrownianych w budownictwie drogowym, Instytut Budowy Dróg i Mostów. Sprawozdanie, Warszawa, 1972.
4. A. PAPROCKI: Popioły lotne w Polsce w latach 1970—75, prace Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa, 1971.
5. J. PACHOWSKI: Wdrożenie stosowania na skalę techniczną popiołów lotnych z węgla brunatnego Zagłębia Konińskiego. Prace Centralnego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Techniki Drogownictwa 14, Warszawa, 1971.
6. J. PACHOWSKI, R. TOPA: Wykorzystanie popiołów lotnych do podbudów drogowych, Mat. Konf. — Składowanie i Zagospodarowanie Odpadów Energetycznych i Hutniczych, Wyd. Geologiczne, Warszawa, 1973.
7. Decyzja nr 94/74 Prezydium Rządu z dnia 30 sierpnia 1974 r. w sprawie programu kompleksowego zagospodarowania mineralnych surowców odpadowych na lata 1976—1980 i kierunkowi do roku 1990, Warszawa, 1974.
8. S. MAJKOWSKI: Odpady elektrowniane. Wykorzystanie w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej oraz RFN, prace Zakładu Doświadczalnego Utylizacji Odpadów Elektrownianych, Katowice, 1974.
9. R. OLINGER: Dziesięć lat stosowania popiołów lotnych w drogownictwie francuskim, Nowości w Technice Drogowej, 44—45, 1970.
10. C. E. BRACKETT: Availability, quality and present utilization of ash, Fly Ash Utilization Symp., Pittsburgh, 1967.
11. M. CAMBOURNAC: L'emploi des cendres volantes dans la construction des routes, Routes, 342, 1960.
12. H. W. G. DEDMAN: The commercial utilization of pulverized fuel ash from power stations of the Central Electricity Generating Board, Fly Ash Utilization Symp., Pittsburgh, 1967.
13. Z. GRABOWSKI, M. OBRZYCKI: Niektóre geotechniczne właściwości odpadów paleniskowych składowanych hydraulicznie w zbiorniku osadowym, Mat. Konf. — Składowanie i Zagospodarowanie Odpadów Energetycznych i Hutniczych, Wyd. Geologiczne, Warszawa, 1973.
14. W. HELLER: Kierunki utylizacji popiołów lotnych i żużli w krajach Europy i w USA, CİNTE WIT 28/71, Warszawa, 1974.
15. J. A. HESTER: Fly Ash in Roadway Construction, Fly Ash Utilization Symp., Pittsburgh, 1967.
16. M. OSEKA: Popioły z paliwa ryłowego jako materiał do budowy nasypów, Nowości w Technice Drogowej, 58, 1973.
17. C. A. CARPENTER: Fillers in asphaltic concrete, J. of Highway Research, 5, 1952.
18. S. LUSZEWSKI: Wyniki badań laboratoryjnych i zakres stosowania wypełniaczy zastępczych do mas nawierzchni bitumicznych, Drogownictwo, 5, 1966.
19. A. PAPROCKI: Stosowanie popiołów lotnych do betonu, JTB, Warszawa, 1972.
20. **Praca zbiorowa:** Popioły lotne, JTB, Warszawa, 1965.
21. A. WOROPIŃSKI: Stosowanie domieszek oraz racjonalnej technologii robót betonowych w celu zmniejszenia zużycia cementu, prace Instytutu Budowy Dróg i Mostów, Warszawa, 1974.
22. E. J. BARAEBERG: Lime-fly ash aggregate mixtures, Fly Ash Utilization Symp., Pittsburgh, 1967.
23. R. W. CANNON: Proportioning fly concrete mixes for strength and economy, Concr. Inst., 11, 1968.
24. W. E. GRIET, D. C. WOLF: Concrete containing fly ash a replacement for portland blast-furnace slag cement, J. of Highway Research, 10, 1961.
25. J. A. SMALL: Ph. D. dissertation, Univ. of Maryland, College Park, 1976.
26. G. L. FISHER, D. P. Y. CHANG, M. BRUMMER: Science, 192, 1976, 553-5.
27. J. SHAPIRO: Radiation Protection, A Guide for Scientists and Physicians, Harvard Univ. Press, Cambridge, 1972.
28. Title 10, Part 50, Appendix I, Code of Federal Regulations, Revised January 1, 293—96, 1976.
29. C. J. JOHNSON: Rates of Leukemia, Lung Cancer and Congenital Malformations by Census Tract in Areas Contaminated with Plutonium, Proc. First Inter. Congress of Human Ecology, Vienna, Nov. 26—30, 1973.
30. J. PACHOWSKI: Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1976.