

*Paweł Kielbik\**, *Marcin Papierkowski\*\**,  
*Marian Rotko\*\**, *Jan Skorodecki\**, *Wiesław Zieliński\*\**

## CIĄGŁY POMIAR ZAWARTOŚCI POPIOŁU W WĘGLU BRUNATNYM NA PRZENOŚNIKACH Z TAŚMAMI Z LINKAMI STALOWYMI

---

### 1. Wprowadzenie

Rozwój technik pomiarowych, również radiometrycznych, w odniesieniu do pomiarów podstawowych parametrów jakości węgla transportowanego na przenośnikach taśmowych, w tym węgla brunatnego, nastąpił w ostatnich 20–30 latach. Większość tych technik, zwłaszcza w odniesieniu do pomiarów zawartości popiołu w węglu bezpośrednio na przenośnikach taśmowych, można podzielić na trzy zasadnicze grupy: metody z wykorzystaniem zewnętrznego źródła promieniowania gamma, z wykorzystaniem tzw. promieniotwórczości naturalnej oraz z zastosowaniem promieniowania neutronowego [1].

Na tym tle zaprezentowany został nowy sposób pomiaru zawartości popiołu w węglu transportowanym przenośnikiem z taśmą z linkami stalowymi. W Polsce taśmy te stosowane są niemal wyłącznie w odkrywkowych kopalniach węgla brunatnego. W skali światowej metodami odkrywkowymi wydobywa się też znaczną część węgla kamiennego, częściowo z wykorzystaniem przenośników z taśmami z linkami stalowymi, a prezentowana metoda pozwala również na pomiar zawartości popiołu w tym rodzaju węgla. Należy zauważyć, iż metoda ta pozwala na bezpośredni pomiar na przenośniku, bez tzw. „bypasów”, znacznie komplikujących konstrukcję mechaniczną, obniżających reprezentatywność wyników pomiarów i podrażających znacząco koszty rozwiązania urządzenia. Metoda przedstawiona w niniejszym referacie jest też wielokrotnie tańsza w realizacji od metod neutronowych, które głównie z tego tytułu nie znajdują szerokiego zastosowania.

Opracowana metoda przetestowana została początkowo w warunkach laboratoryjnych, lecz uzyskane pozytywne wyniki nie gwarantowały ich potwierdzenia w warunkach w pełni przemysłowych. W PWP „Wilpo” Sp. z o.o. w Mysłowicach zaprojektowano więc i wykonano prototyp urządzenia pomiarowego, który poddano testom w PGE KWB „Bełchatów” SA.

---

\* PGE KWB „Bełchatów” SA, Rogowice

\*\* PWP WILPO Sp. z o.o., Mysłowice

## **2. Metody pomiaru zawartości popiołu w węglu transportowanym na przenośnikach taśmowych**

Pierwsze urządzenia do kontroli jakości węgla wprost na przenośnikach taśmowych powstały w Wielkiej Brytanii, Niemczech i krajach byłego ZSRR, a od późnych lat 60. XX wieku także w Polsce oraz w USA, Australii i Czechach.

W wyniku prowadzonych badań powstały następujące, bazujące głównie na technikach radiometrycznych, rozwijane do chwili obecnej, metody pomiarowe [1, 2]:

- metody bazujące na wykorzystaniu promieniowania gamma ze źródeł zewnętrznych, w tym metody transmisyjne i rozproszeniowe;
- metody bazujące na pomiarze promieniotwórczości naturalnej węgla [3];
- metody neutronowe.

### **2.1. Metody transmisyjne i rozproszeniowe**

#### **Dwuenergetyczna metoda absorpcyjna**

##### **— bazująca na transmisji promieniowania gamma**

U podstaw wszystkich odmian metody transmisyjnej leży zjawisko zróżnicowania absorpcji promieniowania gamma przez materię, a w odniesieniu do węgla technicznego przez jego część organiczną i mineralną. To zróżnicowanie pochłaniania najsilniej uwidacznia się dla tzw. „miękkiego” promieniowania, czyli promieniowania gamma o energiach kwantów z przedziału do ok. 60 keV. Osłabienie wiązki promieniowania rośnie ze wzrostem zawartości popiołu w węglu. Ten fakt stanowi podstawę absorpcyjnej (transmisyjnej) metody pomiaru zawartości popiołu. Zastosowanie w pomiarach drugiej energii promieniowania gamma, o większej energii, umożliwi uzyskanie dodatkowych danych pomiarowych, informujących o wysokości warstwy węgla lub gęstości powierzchniowej węgla objętego wiązką, co pozwala na przeliczenie uzyskanych danych do procentowej zawartości popiołu.

Ostrożne szacunki, bazujące na trudno dostępnych materiałach konferencyjnych pozwalają przyjąć, iż ogólna ilość przemysłowych aplikacji popiolomierzy (aktualnie pracujących) bazujących na metodzie transmisji promieniowania gamma, w skali ogólnosiwiatowej, może wynosić ok. 400 egz.

Metoda ta nie może być stosowana na taśmach z linkami stalowymi ze względu na dużą zmianę tłumienia wprowadzanego przez linki stalowe, wchodzące losowo w obszar pomiarowy, co stanowi ogromne zakłócenie pomiaru.

#### **Metoda rozproszeniowa**

##### **— bazująca na zjawisku wstecznego rozpraszania promieniowania gamma**

W tej metodzie stosuje się zewnętrzne, niskoenergetyczne źródło promieniowania gamma o energii kwantów nieprzekraczającej  $E = 60 \text{ keV}$  /Am-241/. Głowica ze źródłem i detektorem promieniowania gamma umieszczana jest nad taśmą z węglem (w rozwiązaniu

„nadaśmowym”) lub też pomiędzy górną a dolną taśmą przenośnika (w rozwiązaniu „podtaśmowym”). Metoda polega na pomiarze ilości  $N$  kwantów gamma dochodzących do detektora po wstecznym rozproszeniu pierwotnego promieniowania gamma w strudze węgla.

Nie ma możliwości zastosowania tej metody do pomiarów na taśmach z linkami stalowymi, gdyż w konfiguracji „od dołu” linki całkowicie ekranują promieniowanie gamma, a w przypadku konfiguracji „od góry” występujące realnie granulacja węgla i prędkości taśm nie pozwalają na zastosowanie tego rozwiązania (dotyczy to głównie węgla brunatnego).

Aktualnie, w górnictwie krajowym, w warunkach eksploatacji przemysłowej, pracuje około 100 ciągłych popiołomierzy radiometrycznych różnych firm, bazujących na metodach transmisyjnych oraz wstecznego rozpraszania promieniowania gamma, w tym ponad 60 rozwiązań firmy WILPO. W polskim górnictwie węgla brunatnego pracuje aktualnie 10 ciągłych popiołomierzy, wszystkie produkcji PWP „Wilpo” Sp. z o.o. (popiołomierze podtaśmowe WILPO C 212).

## **2.2. Metody bazujące na pomiarze promieniotwórczości naturalnej węgla**

W węglu występują pierwiastki promieniotwórcze z rodziny uranu U i rodziny toru Th oraz promieniotwórczy izotop potasu K-40. Te pierwiastki promieniotwórcze skupiają się głównie w substancji mineralnej węgla (w popiele), natomiast w substancji organicznej węgla występują śladowe ilości tych pierwiastków. Wymienione pierwiastki promieniotwórcze wysyłają promieniowanie „alfa”, „beta” i „gamma” stanowiące ich promieniotwórczość naturalną. Między naturalną promieniotwórczością gamma węgla i zawartością w nim popiołu istnieje związek korelacyjny. Związek ten stanowi podstawę metody określania zawartości popiołu w węglu na podstawie wyniku pomiaru jego promieniotwórczości naturalnej gamma. Wynikiem pomiaru jest na ogół częstość (prędkość) zliczania impulsów z detektora, proporcjonalna do zawartości popiołu w węglu.

Niski poziom mierzonego sygnału powoduje, że popiołomierze oparte na pomiarze promieniotwórczości naturalnej są urządzeniami o dużej bezwładności pomiarowej o minimalnym czasie pomiaru rzędu minut. Dodatkowo ogromnym zakłóceniem jest tutaj zmienność składu chemicznego substancji mineralnej, co w przypadku rozległych kopalń odkrywkowych praktycznie uniemożliwia taki pomiar.

## **2.3. Metody neutronowe**

W ostatnich 20 latach pojawiły się głównie w USA rozwiązania bazujące na metodach neutronowych wykorzystujących technologię PGNAA, polegającą na aktywowaniu węgla neutronami i pierwiastkowej analizie spektralnej widma pozwalającej na procentowe określenie niemal wszystkich składników popiołu.

Metoda ta daje ciągłą informację o składzie chemicznym popiołu, w tym także zawartości siarki. Jej wadą jest bardzo wysoka cena urządzeń (0,5 do 1 mln USD), oraz występujące duże zagrożenie dla ludzi związane z zastosowanym promieniowaniem neutronowym. Nie bez znaczenia jest też duży ciężar urządzeń /rzędu 5 ton/ oraz konieczność częstej wy-

miany krótkotrwałych (czas półrozpadu 2,5 roku) i drogich źródeł Cf-252 stosowanych w tych urządzeniach.

### **3. Rozproseniowo — absorpcyjna metoda pomiaru**

Dotychczas stosowane metody pomiarowe oraz rozwiązania urządzeń nie pozwalały na realizację ciągłego pomiaru zawartości popiołu w węglu transportowanym na przenośniku z taśmą z linkami stalowymi. Wszystkie te metody, zarówno rozproseniowe (stosowane powszechnie w polskim górnictwie węgla brunatnego), jak i absorpcyjne nie pozwalały na taki pomiar ze względu na duże wsteczne rozproszenie promieniowania gamma (źródła izotopowe lokalizowane pod taśmą transportującą węgiel) oraz na silne pochłanianie tego promieniowania przez stalowe linki stanowiące zbrojenie taśmy.

Podstawą nowej metody stała się więc zmiana konfiguracji układu źródło — detektor, przy jednoczesnym zwiększeniu aktywności tego źródła. Dodatkowo zamiast pojedynczego detektora wprowadzono układ dwóch detektorów, usytuowanych odpowiednio w stosunku do wiązki promieniowania: w geometrii rozprosenia i w geometrii absorpcji. To pozwoliło z jednego źródła promieniowania uzyskać informacje zarówno o zmienności zawartości popiołu, jak i gęstości powierzchniowej badanego węgla. Powyższa metoda bazuje na naświetleniu promieniowaniem gamma (od góry) warstwy węgla oraz na rejestracji przez zespół detektorów, odpowiednio rozmieszczonych pod z taśmą przenośnika, silnie rozkolinowanych wiązek promieniowania gamma.

Opisana metoda poddana została pierwszym testom w warunkach laboratoryjnych. Dla różnych wysokości warstw i różnych wielkości zapopielenia w badanych próbkach węgla brunatnego na obu detektorach otrzymano zadawalająco duże ilości zliczeń impulsów oraz odpowiednią dynamikę ich zmienności, dobrze korelującą ze zmianami zawartości popiołu w węglu, warunkujące istnienie możliwości pomiarowych. Uzyskane w warunkach laboratoryjnych wyniki, mimo próby maksymalnego zbliżenia się do warunków normalnej instalacji przemysłowej (próbki węgla w ziarnie rzeczywistym, masa próbek po ok. 200 kg, standardowe taśmy z linkami stalowymi itp.) nie mogły dać gwarancji uzyskania równie zadawalających wyników w normalnych warunkach ruchowych (prędkość taśmy rzędu 5 m/s, duża zmienność wysokości warstwy węgla na taśmie przenośnika, wahania geometrii pomiaru w wyniku drgań konstrukcji mechanicznej i zmiennego obciążenia taśmy). Z tego względu uznanie metody za nadającą się do wdrożenia przemysłowego wymagało poparcia badaniami przemysłowymi.

### **4. Wyniki badań przemysłowych prototypu popiolomierza w PGE KWB „Belchatów” SA**

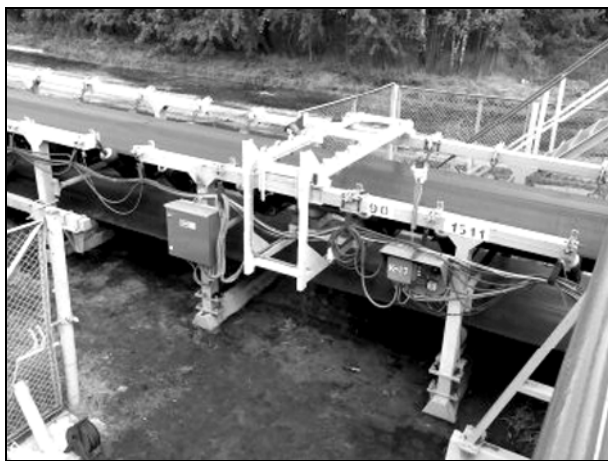
Sprawdzenie metody w warunkach przemysłowych, niezbędne dla potwierdzenia jej aspektu wdrożeniowego, wymagało zaprojektowania i wykonania prototypu popiolomierza

realizującego pomiar według opisanego wyżej sposobu. Taki prototyp zrealizowano w PWP „Wilpo” Sp. z o.o. na początku 2008 r.

W oparciu o umowę współpracy pomiędzy PGE KWB Bełchatów SA i PWP „Wilpo” Sp. z o.o. w kwietniu 2008 r. przeprowadzono instalację tego prototypu popiołomierza na przenośniku 15.11.



**Rys. 1.** Prototyp popiołomierza na taśmie 15.11 (widok z góry)



**Rys. 2.** Prototyp popiołomierza na taśmie 15.11 (widok z boku)

Celem badań prototypu popiołomierza było potwierdzenie skuteczności opracowanej metody pomiarowej (sposobu pomiaru), oraz oszacowanie ewentualnych błędów pomiarowych (dokładności pomiaru). W badaniach udział brali tak pracownicy PWP „Wilpo”, jak

i pracownicy KWB „Bełchatów” z oddziału T1, zajmującego się transportem urobku na kopalni oraz służby Kontroli Jakości Kopalni.

Ogólny plan badań był następujący:

- wspólnie ze służbami Kopalni przeprowadzić proces skalowania urządzenia w oparciu o próbki węgla pobrane z zatrzymanego przenośnika taśmowego 15.11, po uprzednim zmierzeniu tego urobku przez popiołomierz;
- po wyskalowaniu urządzenia przeprowadzić ocenę poprawności pomiarów realizowanych przez popiołomierz, poprzez pobranie trzech próbek z zatrzymanego przenośnika 15.11 i porównanie średniego wyniku oznaczeń laboratoryjnych tych 3 próbek ze średnim wskazaniem urządzenia z odcinka taśmociągu, na którym pobierano próbki.

#### 4.1. Skalowanie prototypu popiołomierza

W fazie skalowania, na podstawie porównania wyników z popiołomierza z wynikami oznaczeń laboratoryjnych 18 pobranych próbek węgla (na każdą próbkę, dla uzyskania dobrej reprezentatywności, składało się 5 przekrojowych próbek cząstkowych) dokonano obliczenia zależności korelacyjnych wiążących sygnały pomiarowe z popiołomierza tj. ilości zliczeń rejestrowanych przez każdy z detektorów oraz dokładnego pomiaru wysokości warstwy  $H$ , z oznaczoną chemicznie procentową zawartością popiołu w podanych próbkach węgla. Na rysunku 3 pokazano organizację pobierania próbek węglowych w fazie skalowania popiołomierza.



Rys. 3. Pobieranie próbek węgla w fazie skalowania popiołomierza

Poniżej zamieszczono tabelę stanowiącą zestawienie laboratoryjnych oznaczeń zawartości popiołów w analizowanych próbkach węgla oraz odpowiadających im wyników dynamicznych pomiarów, uzyskanych z popiołomierza w oparciu o przeliczenie odpowiadających tym próbom sygnałów pomiarowych przez końcowe równanie kalibracyjne.

TABELA 1

**Zestawienie wyników skalowania popiołomierza**

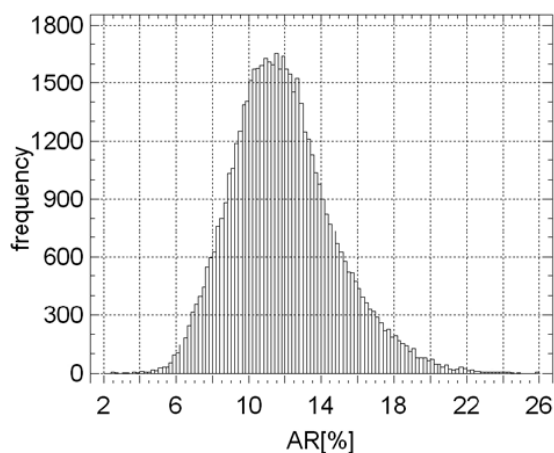
Nr próbki	$AR_{lab},$ %	$AR_{pop},$ %	$\Delta AR,$ %
1	15	13,2	1,8
3	9,8	11,5	-1,7
5	15,1	13,9	1,2
7	6,6	6,3	0,3
9	6,7	8,4	-1,7
11	6,3	5,8	0,5
13	20,5	21,1	-0,6
15	18,7	18,4	0,3
17	18,8	17,5	1,3
19	18,8	16,6	2,2
20	20,3	17,5	2,8
21	12,5	11,5	1
22	9,8	7,9	1,9
23	9,5	11,9	-2,4
24	9,7	11,3	-1,6
25	7,8	8,3	-0,5
26	10,3	10,8	-0,5
27	11,7	13	-1,3

W tabeli 1 ujęto 18 wyników pomiarowych uzyskanych na drodze skalowania dynamicznego odpowiadających zmienności wysokości analizowanych warstw węgla na przenośniku pomiędzy 15 a 50 cm. Wartość średniego odchylenia standardowego, liczonego na podstawie (zamieszczonych w ostatniej kolumnie tabeli) różnic pomiędzy wynikami laboratoryjnymi a wskazaniami popiołomierza, wyniosła:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AR_{LABi} - AR_{POPi})^2}{n-1}} = 1,55\%$$

W celu przeanalizowania poprawności przetwarzania sygnałów pomiarowych zarejestrowanych w bazie danych (ok. 54 000 serii wyników 30 sekundowych pomiarów z okresu mię-

dzy 24.06 a 28.07.2008 r.) na odpowiadające im wartości popiołu, wygenerowano histogram częstotliwości rozkładu uzyskanych w ten sposób zawartości popiołu. Histogram ten przyjął postać zaprezentowaną na rysunku 4.



Rys. 4. Rozkład zmienności zawartości popiołu w węglu w oparciu o dane z bazy popiołomierza

#### 4.2. Sprawdzanie poprawności działania prototypu popiołomierza

W fazie sprawdzania poprawności działania popiołomierza pobrano 6 próbek kontrolnych (każda próbka w innym dniu, na każdą składały się 3 próbki cząstkowe z przekrojów pobranych na długości ok. 150 m, co odpowiadało 30 s pomiaru). Wyniki pomiarów i oznaczeń laboratoryjnych (średnich z 3 próbek cząstkowych) przedstawia tabela 2.

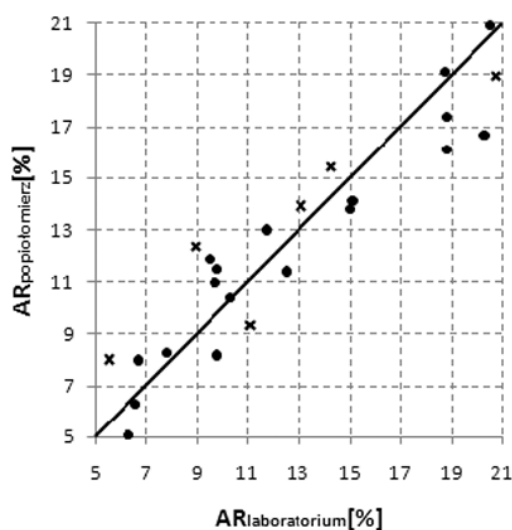
TABELA 2

##### Wyniki pomiarów kontrolnych

Data	Czas	Numer	$A^r$ , %	$H$ , cm	$A^r_{\text{Laboratorium}}$ [%]			$A^r_{\text{Lab. sr.}}$ , %	$\Delta A$ , %
					Próba A	Próba B	Próba C		
23.07	09:39	1	11,5	20	11,5	10,9	11,0	11,1	-0,4
24.07	08:35	2	14,6	36	16,7	13,3	9,3	13,1	-1,5
25.07	07:48	3	10,4	19	6,0	5,1	5,4	5,5	-4,9
28.07	08:23	4	11,7	22	8,6	8,9	9,3	8,9	-2,8
29.07	08:02	5	17,4	17	23,5	19,7	19,0	20,7	3,3
30.07	09:20	6	15,8	34	11,6	18,0	13,1	14,2	-1,6



Dane uzyskane w okresie pobierania próbek kontrolnych od 23.07 do 30.07.2008 r. wykorzystane zostały również do uzupełnienia podstawowej zależności kalibracyjnej, wyliczonej pierwotnie w oparciu o 18 próbek pobranych w ramach skalowania popiołomierza. Dla połączonego w ten sposób zbioru danych (24 próbki) policzono nową zależność kalibracyjną. Wyniki pomiarowe uzyskane łącznie dla tych wszystkich 24 próbek (18 próbek w trakcie skalowania i 6 próbek sprawdzających) graficznie zaprezentowane zostały na rysunku 5.



**Rys. 5.** Wspólny rozkład wskazań popiołomierza i oznaczeń laboratoryjnych w fazie skalowania i pobierania próbek kontrolnych (x — próbki kontrolne)

Średnie odchylenie standardowe wyliczone na podstawie różnic pomiędzy laboratoryjnymi oznaczeniami zawartości popiołu a wartościami popiołu wygenerowanymi w oparciu nowe równanie kalibracyjne wyniosło:

$$\sigma_{\Delta A} = 1,755\%$$

## 5. Podsumowanie i wnioski

Prezentowana nowa, nie tylko w skali górnictwa polskiego, metoda pomiaru zawartości popiołu w węglu brunatnym (również kamiennym) na przenośnikach z taśmami z linkami stalowymi, ma zapewnić szybką i ciągłą informację z punktów dotąd nie obsługiwanych żadnym pomiarem, a pozwalającą na podejmowanie ściśle technologicznych decyzji.

Przedstawione w referacie wyniki badań, uzyskane w okresie kilkumiesięcznych prac dużego, połączonego zespołu PGE KWB Bełchatów SA oraz PWP „Wilpo” Sp. z o.o., pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Opracowana metoda pomiarowa (sposób pomiaru) zrealizowana w prototypowym rozwiązaniu popiołomierza nadaje się do realizacji pomiaru zawartości popiołu w węglu transportowanym taśmami z linkami stalowymi (korelacja wiążąca sygnały pomiarowe urządzenia z oznaczeniami laboratoryjnymi wynosi  $r = 0,982$  przy obliczonym błędzie pomiarowym  $\sigma = 1,755\%$  /odchylenie standardowe/).
- 2) Podany powyżej błąd pomiaru można zmniejszyć poprzez:
  - zwiększenie ilości pobranych próbek, która dla zastosowanego rozkładu Boltzmana powinna być  $> 30$ ;
  - pobranie próbek dla krańcowych warunków wydajności i zapopielenia, których brakowało przy skalowaniu tj. dużych warstw węgla i bardzo małych popiołów.
- 3) Poprawność metody pomiarowej potwierdza też „wsteczne” przeliczenie kilkudziesięciu tysięcy wyników zarejestrowanych w bazie urządzenia co 30 sekund pomiaru. Tak przeliczone wyniki nie wychodzą poza występujące zakresy zawartości popiołu nawet przy skrajnych wartościach wydajności (wysokości warstwy).

Autorzy składają wyrazy podziękowania dla wszystkich zespołów realizujących przedstawiony eksperyment, zwłaszcza w trudnych, eksploatacyjnych warunkach, w jakich prowadzone były te badania.

#### LITERATURA

- [1] *Zieliński W., Górny W., Mirkowski Cz.*: Przegląd popiołomierzy radiometrycznych oraz uwarunkowania ich przemysłowych zastosowań w pomiarach zawartości popiołu w strudze węgla na przenośniku taśmowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Górnictwo, z. 238, 1998
- [2] *Górny W., Rotko M., Zieliński W.*: New Equipment for Coal Quality Control and their Industrial Applications”. Final Report Of Ec Thermie Action B Project On: „Dissemination Of New Technologies For Coal Quality Control And Homogenisation”. Athenas, December 1999
- [3] *Taylor P.*: On-line ash Monitoring with the Natural Gamma Coal Quality Monitor (NGCQM). Final Report Of Ec Thermie Action B Project On: „Dissemination Of New Technologies For Coal Quality Control And Homogenisation”. Athenas, December 1999