

# Badania laboratoryjne granulowania mułów węglowych

Jacek FELIKS – Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2012, 66, 5, 388-395

## Wstęp

Odpady górnicze, zwane również wydobywczymi, to skały pochodzące z robót górniczych i przygotowawczych, udostępniających złożę kopaliny głównej, przede wszystkim skały nadkładu i przewarstwień. Odpady te stanowią znaczną część ogólnej ilości odpadów; stanowią one ok. 27% wszystkich odpadów przemysłowych (Rys. 1).



Rys. 1. Odpady (bez odpadów komunalnych) wytworzone wg rodzajów w 2007 r. [1]

Ilość tych odpadów, jak pokazują raporty środowiskowe, nie maleje (Tab. 1), chociaż większość nowotworzonych odpadów zostaje poddana odzyskowi, to jednak ok. 1,6 mln Mg rocznie jest unieszkodliwiana przez składowanie.

Tablica 1

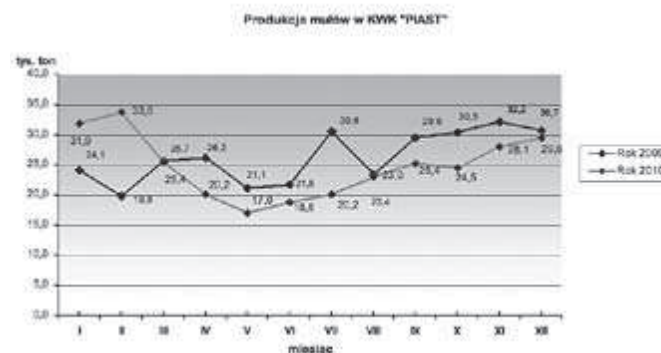
Odpady z wydobycia węgla kamiennego i nagromadzone w latach 2004-2007, mln Mg [2]

Odpady z wydobycia węgla kamiennego	Lata			
	2004	2005	2006	2007
Ogółem	36,77	36,37	36,5	36,79
Poddane odzyskowi	35,15	34,56	32,5	33,89
Unieszkodliwione – składowane	1,57	1,68	2,45	1,64
Magazynowane czasowo	0,05	0,13	1,55	1,26
Nagromadzone	548	543	517	506

Największą część odpadów górniczych stanowią odpady przeróbki, które obejmują materiał skalny wydobyty wraz z urobkiem i oddzielany w procesach wzbogacania kopaliny (np. w trakcie sortowania, rozdrabniania, płukania, flotacji), a ich udział w ogólnej masie odpadów wynosi średnio 88%. Z dotychczasowych badań wynika, że odpady węglowe mają cechy umożliwiające liczne zastosowania:

- w budownictwie hydrotechnicznym i inżynieryjnym
- w produkcji wyrobów budowlanych i ogniotrwałych
- w rolnictwie jako nawóz lub podłoże
- przy odzysku węgla, oraz jako surowiec niskoenergetyczny (muły) do spalania w elektrowniach,
- jako podsadzka i materiał uszczelniający w robotach inżynierskich.

Dużą część wymienionych odpadów stanowią muły węglowe, które powstają w trakcie procesów wzbogacania węgla w zakładach przeróbki mechanicznej kopalni węgla kamiennego. Są to najdrobniejsze klasy o uziarnieniu poniżej 1 mm, w tym klasy poniżej 0,035 mm stanowią nawet do 60% składu ziarnowego mułów. W zależności od parametrów jakościowych (zawartość popiołu i siarki, wartość opałowa), muły te mogą być kierowane bezpośrednio do mieszanek energetycznych lub są deponowane w osadnikach ziemnych poszczególnych kopalni. W pracy zajmowano się mułami dostarczonymi z Kopalni Węgla Kamiennego „Piaś”, których wytwarzane ilości pokazano na Rysunku 2.



Rys. 2. Produkcja mułów węglowych

Struktura rozchodu tych mułów wygląda następująco: 72% zagospodarowywane jest jako odpad; 24% sprzedawane w mieszanek energetycznych, a reszta jako deputat i sprzedaż drobnicowa.

Ekonomicznie opłacalne jest zagospodarowanie mułów w mieszanek energetycznych, jednak problemem jest forma występowania mułu surowego. Duża wilgotność powierzchniowa mułu, wynosząca po odwodnieniu na filtrach ok. 25 do 30% powoduje specjalne trudności przy wyładunku tego produktu z wagonów, zwłaszcza w okresie zimowym, z powodu braku skutecznych tanich środków zabezpieczających przed zamrażaniem. Muł w klasie 0,1 mm z dodatkiem rozmytych ilów stanowi zawiesinę praktycznie niedającą się skutecznie w tani sposób odvodnić. Przykładowe parametry techniczne mułów pokazano w Tablicy 2.

Tablica 2

Parametry techniczne mułów węglowych

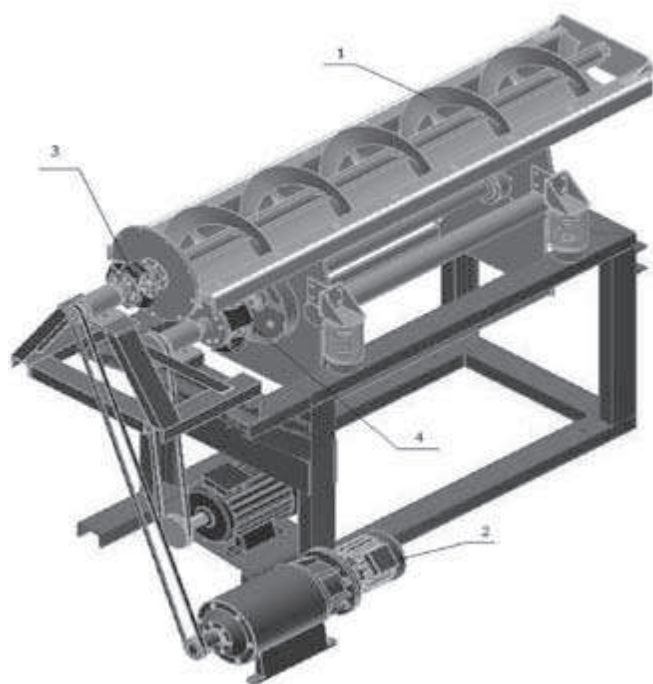
Zawartość	KWK „Jas-Mos”	KWK „Piaś”	Nowa Zelandia
Wody, %	34,9	25,5	40
Wartość opałowa, kJ/kg	11 935	8327	25 MJ/kg
Popiołu (w stanie roboczym), %	30,25	41,4	<4,5
Siarki, %	0,71	0,88	-

W pracy zajmowano się mułami dostarczonymi z Kopalni Węgla Kamiennego „Piast”, ponieważ dla tego zakładu była projektowana nowa instalacja do granulowania. Celem badań było określenie sposobu i parametrów pracy urządzeń, aby rozdrobniony i zgranulowany produkt umożliwiał transportowalność zbliżoną do własności mąłu węglowego i pozwalał na duży stopień rozproszenia podczas tworzenia mieszanek. Badania granulowania przeprowadzono na dwóch typach urządzeń: rynnowym granulatorze wibracyjnym i granulatorze talerzowym. Jako środek wiążący stosowano wapno hydratyzowane i wapno palone (CaO).

## Przeprowadzone badania

### Rynnowy granulator wibracyjny

Pierwsze badania przeprowadzono na laboratoryjnym rynnowym granulatorze wibracyjnym konstrukcji AGH (Rys. 3).



Rys. 3. Rynnowy granulator wibracyjny [6, 7]

Z dostarczonego mułu węglowego wydzielono próbki, o masie 1 kg. Wszystkie próbki rozdrobniono mechanicznie, a następnie do próbek dodawano odpowiednią ilość wapna hydratyzowanego. Parametry pracy granulatora ustalono na podstawie wcześniejszych doświadczeń [3 ÷ 5].

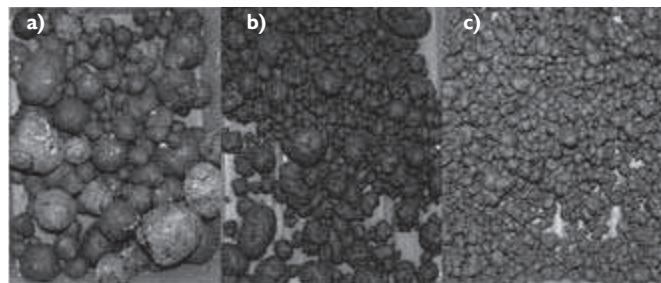


Rys. 4. Granulat uzyskany z mułu węglowego KWK „Piast” bez dodatku czynnika wiążącego

Jako pierwszy eksperyment, w celach porównawczych, przeprowadzono proces granulowania próbki mułu węglowego bez użycia czynnika wiążącego, którego produkt został przedstawiony na Rysunku 4. Powstały granulat posiadał skład ziarnowy daleki od zamierzony. Ziarna były duże o średnicy powyżej 50 mm i o bardzo dużym rozrzucie (Rys. 4). Powodem takiego zjawiska była zbyt duża wilgotność przemijająca, wynosząca ok. 26%, która powoduje w trakcie prób zbijanie się materiału w duże niekształtne bryły. Konieczne okazało się dodanie substancji, która zwiąże część wody zawartej w mule. Otrzymany granulat charakteryzuje się dużą plastycznością oraz ma skłonność do zlepiania się, co dyskwalifikuje go jako produkt do dalszej eksploatacji.

Jako pierwszą substancję wiążącą wytypowano wapno hydratyzowane; jest ono bowiem łatwo dostępne i tanie. Dodanie do mułu węglowego wapna hydratyzowanego miało na celu poprawienie przebiegu formowania się grudek (obniżenie wilgotności) surowych przez co zwiększenie stopnia jednorodności wymiarowej grudek; zwiększenie wytrzymałości grudek po wysuszeniu (sezonowaniu) oraz zapobieganie pękaniu grudek podczas ich nagrzewania i podwyższenie temperatury wstrząsu cieplnego.

Eksperymenty przeprowadzono dla 1, 2, 3% zawartości wapna, czyli odpowiednio 10, 20, 30 g (Rys. 5 a, b, c).



Rys. 5. Granulat uzyskany z mułu węglowego z dodatkiem wapna hydratyzowanego w ilości: a) 1% masy mułu; b) 2% masy mułu; c) 3% masy mułu

Uzyskane granulaty z próbki zawierającej 10 g wapna hydratyzowanego wykazywały się lepszymi parametrami uziarnienia niż te, które powstały bez użycia czynnika wiążącego (Rys. 4). Uzyskano granulę charakteryzującą się nieco mniejszym rozrzutem wielkości, o mniejszej wilgotności, plastyczności i skłonności do zlepiania się. Otrzymany produkt procesu grudkowania nie spełnia niestety stawianych wobec niego oczekiwań (Rys. 5a).

Jeszcze lepsze rezultaty otrzymano przy granulowaniu próbki mułu węglowego zawierającej 20 g wapna hydratyzowanego (2% masy mułu węglowego), czego efekt przedstawiono na Rysunku 5b. Otrzymany produkt charakteryzuje się znacznie mniejszą wielkością granulek, niższą wilgotnością, zanikającą skłonnością do zlepiania się oraz większą wytrzymałością.

Granulki o najlepszych własnościach otrzymano w procesie granulowania próbki zawierającej 30 g wapna hydratyzowanego, co stanowi 3% udziału procentowego mułu węglowego. Powstały w wyniku tego procesu produkt przedstawiono na Rysunku 5c. Uzyskane granulaty z próbki, która zawierała 30 g wapna hydratyzowanego wykazywały zadowalające parametry uziarnienia. Otrzymane granulki charakteryzują się odpowiednią wielkością o małym rozrzucie, małą wilgotnością, brakiem skłonności do zlepiania oraz znacznie większą wytrzymałością.

Z przeprowadzonych badań widać, że zastosowanie wapna hydratyzowanego jako czynnika wiążącego mułu węglowego daje zadowalające efekty, co można zaobserwować na Rysunku 5c. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych można stwierdzić, że ilość dodawanego wapna hydratyzowanego powinna oscylować w granicach 3% masy granulowanego mułu węglowego.



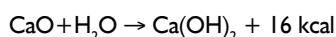
### Granulator talerzowy

Ponieważ rynnowy granulator wibracyjny nie daje zadowalającej wydajności (maksymalnie 10 Mg/h), postanowiono przeprowadzić próby granulowania na granulatorze talerzowym, który umożliwia uzyskanie założonej wydajności 50 Mg/h.

Wapno hydratyzowane w badaniach zastąpiono wapnem palonym (tlenek wapna). Tlenek wapna CaO, pospolicie zwany wapnem palonym, otrzymuje się poprzez prażenie wapieni, tj. węglanu wapiennego CaCO<sub>3</sub> zgodnie z reakcją:



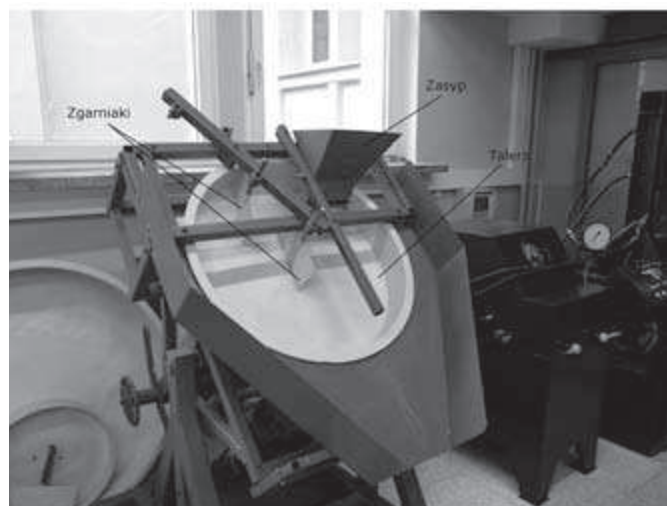
a poprzez działanie wodą na tlenek wapna otrzymamy



Połączenie wody z wapnem spowoduje znaczne obniżenie wilgotności i dodatkowo cała mieszanina mułu i wapna podwyższy swoją temperaturę, co w konsekwencji spowoduje dalsze obniżenie wilgotności mułu i pozwoli na pracę urządzenia w niskich temperaturach.

Badania zostały przeprowadzone na laboratoryjnym granulatorze talerzowym konstrukcji AGH (Rys. 6). Granulator napędzany jest silnikiem elektrycznym o mocy 2,2 kW o prędkości obrotowej 1440 obr/min połączonym z reduktorem, który napędza przekładnię pasową napędzającą wał talerza. Prędkość obrotowa talerza regulowana jest za pomocą falownika firmy Siemens i osiąga maksymalną prędkość 50 obr/min. Granulator posiada mechanizm regulacji kąta nachylenia talerza umożliwiającą zmianę pochylenia talerza w przedziale 0÷70° (od poziomu).

Granulator talerzowy AGH posiada konstrukcję umożliwiającą zastosowanie talerzy o średnicach 400 mm, 850 mm oraz 1000 mm oraz wyposażony jest w układ zgarniaków dopasowany do odpowiedniej średnicy talerza (Rys. 6).



Rys. 6. Widok granulatora

Wstępnie przeprowadzono kilka prób granulowania w celu określenia parametrów pracy granulatora, a następnie próby dla różnej ilości dodawanego wapna. Badania zostały przeprowadzone na talerzu o średnicy 850 mm, o zadanej prędkości obrotowej talerza 10 obr/min i kącie nachylenia talerza 44° z układem dwóch zgarniaków.

W badaniach wykorzystano muł węglowy dostarczony z KWK „Piast”. Jako dodatek wiążący (obniżający wilgotność) zastosowano wapno palone wysoko reaktywne dostarczone przez Zakład Przemysłu Wapiennego „Trzuskawica”, o parametrach określonych w Świadectwie Kontroli Jakości Nr/04/2010 (Rys. 7).

Zakład Przemysłu Wapiennego „Trzuskawica”  
36-650 Trzuskawica 6-Kielec

Świadectwo Kontroli Jakości Nr 104/2010

Nazwa wyrobu: Wapno budowlane

X - substancja drażniąca: wysoko reaktywne

Wapno palone EN 125-1 CL 90-Q	EN 125-1 CL 90-Q
w bryłach	hydratyzowane

Nr zgarniaka WZ: .....

CaO i MgO %	MgO %	CO <sub>2</sub> %	SO <sub>3</sub> %	Is min	Isn min	Tem °C
54,84	0,62			0,37	5,55	74,14
Wapno woda %	Siłko w % po gaszeniu	CaO %			Przezierność na sicie	
		4,04	50,5		0,2 mm	0,09 mm
						2,48

Deklaruję, że partia dostarczonego wyrobu spełnia wymagania Normy PN-EN 459-1 / wymagania odbiorcy  
Ochrona gwarancji pod warunkiem prawidłowego transportu i magazynowania:  
- Wapno palone 14 dni od daty wysyłu  
- Wapno hydratyzowane 90 dni od daty wysyłu

Data wysyłu / produkcji: 15.04.2010

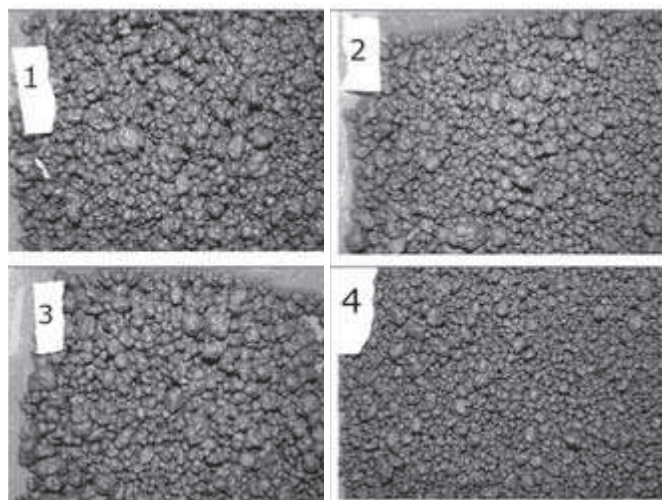
Odbiorca: .....

Dokładniejsze informacje znajdują się w karcie charakterystyki produktu.

Rys. 7. Świadectwo kontroli jakości wapna

W badaniach na granulatorze talerzowym używano próbek większych o masie 1,7 kg. Pierwszą próbę przeprowadzono dodając do próbki 8,5 g wapna, co stanowiło 0,5% masy granulowanego mułu węglowego. Powstały granulat został zaprezentowany na Rysunku 8-1. W tym przypadku ilość dodanego wapna była zbyt mała, co skutkowało szybkim wydostawaniem się wilgoci z wnętrza granułu na ich powierzchnię, a to z kolei powodowało oblepianie mułem ścianek talerza granulatora. Otrzymany granulat charakteryzował się dużą wilgotnością, czego wynikiem jest ich duża plastyczność oraz skłonność do zlepiania się, co dyskwalifikuje je jako produkt do dalszej eksploatacji.

Drugą próbę przeprowadzono dodając do próbki 17 g wapna, co stanowiło 1% masy granulowanego mułu węglowego. Powstały granulat został zaprezentowany na Rysunku 8-2. Z przeprowadzonych badań wynika, że ilość dodanego wapna była wystarczająca, co objawiało się poprawnością zachodzącego procesu granulowania. Materiał ulegał granulacji w poprawny sposób i nie oblepiał ścianek talerza granulatora, a uzyskane granulaty wykazywały się lepszymi parametrami uziarnienia niż te, które powstały z próbki z dodatkiem wapna w ilości 0,5% masy mułu węglowego. Charakteryzowały się one mniejszym rozrzutem wielkości, mniejszą wilgotnością, plastycznością oraz skłonnością do zlepiania się.



Rys. 8. Granulat uzyskany z mułu węglowego KWK „Piast” z dodatkiem wapna palonego w ilości: 1) 0,5% masy mułu; 2) 1% masy mułu; 3) 1,5% masy mułu; 4) 2% masy mułu

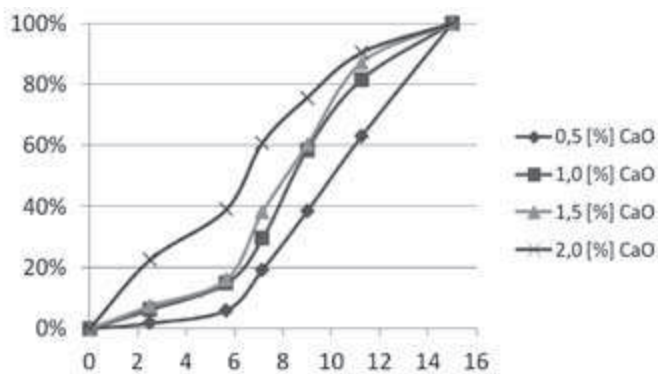
Trzecią próbę przeprowadzono dodając do próbki 25,5 g wapna, co stanowiło 1,5% masy granulowanego mułu węglowego. Powstały granulaty zostały zaprezentowane na Rysunku 8-3. Uzyskany granulaty charakteryzował się podobnymi parametrami uziarnienia jak pochodzący z próby nr 2. Otrzymane granulki charakteryzują się odpowiednią wielkością o małym rozrzucie, małą wilgotnością, brakiem skłonności do zlepiania się, co – jak w przypadku próby nr 2 – kwalifikuje je jako produkt do dalszej eksploatacji.

Czwartą próbę przeprowadzono dodając do próbki 34 g wapna, co stanowiło 2% masy granulowanego mułu węglowego. Powstały granulaty zostały zaprezentowane na Rysunku 8-4. Analiza granulatu pokazała, że otrzymany produkt jest zbyt drobny, a powstałe granulki podczas przebywania w granulatorze nie ulegały dalszemu procesowi zwiększaniu średnic.

### Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że muły węglowe bardzo dobrze granulują się na granulatorze talerzowym. Wapno palone jako dodatek wiążący i obniżający wilgotność spełnia swoje zadanie i jest lepszym rozwiązaniem od wapna hydratyzowanego. Wymagana ilość wapna waha się w granicach 1 do 1,5% masowo.

Przebadano również składy ziarnowe otrzymanego produktu (Rys. 9). Z analizy wymagań odbiorców najkorzystniejszy produkt to taki, w którym występuje najwięcej ziaren z przedziału od 5 do 10 mm. Ziarna zbyt małe powodują pylenie, a ziarna duże trudno umieścić w miałowych mieszankach energetycznych.



Rys. 9. Składy ziarnowe otrzymanych granul

Najlepszy efekt pod tym względem dały próby 2 i 3, czyli 1 i 1,5% CaO.

Wyznaczenie odpowiedniej ilości dodawanego czynnika wiążącego, wapna palonego, w skali przemysłowej wymaga przeprowadzenia badań eksperymentalnych na prototypie urządzenia do granulowania. Niemniej jednak, na podstawie wyników laboratoryjnych można stwierdzić, że ilość dodawanego wapna powinna oscylować w granicach 1 ÷ 2% masy granulowanego mułu węglowego, i jest w dużym stopniu zależy od wilgotności nadawy (mułu węglowego).

Zastosowanie wapna palonego dla zmniejszenia ilości wody w mułach węglowych przeznaczonych do grudkownika wydaje się w pełni uzasadnione. Ilość wymaganego środka wiążącego jest niewielka i dodatkowo zawarty aktywny Ca będzie reagował w trakcie spalania z siarką i wiązał ją w nierozpuszczalny związek.

W warunkach przemysłowych należy uwzględnić, że mieszanka będzie mocno podgrzewana, co spowoduje odparowywanie wody. Dlatego też badania przemysłowe należy prowadzić w różnych warunkach atmosferycznych i ustalić ilość dodawanego wapna dla danej temperatury otoczenia. Dla projektowanej instalacji o wydajności 50 Mg/h przewidywane godzinne zużycie CaO (wapna palonego) będzie zawierać się w granicach 500 do 800 kg, jednak maksymalna wydajność układu podawania wapna powinna uwzględniać zarówno większe zawilgocenie mułu, jak i dużą wilgotność otoczenia, stąd

też uwzględniając powyższe czynniki urządzenia należy dobrać na wydajność 2-3 razy większą (2 Mg/h), z możliwością płynnego regulowania ilości nadawy. Zbiorniki powinny posiadać pojemność pozwalającą na minimum 20 godzin pracy instalacji. Proponowana wielkość, to zastosowanie dwóch zbiorników o pojemności 18 m<sup>3</sup>.

### Literatura

1. Przegląd Górniczy 2009, **69**, 10, 1043.
2. Urząd Marszałkowski woj. śląskiego, Wydział Ochrony Środowiska, dane o odpadach.
3. Banaszewski T., Filipowicz A., Feliks J.: *Badania grudkowania w rynnowym grudkowniku wibracyjnym w sposób ciągły*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2003, **3**.
4. Banaszewski T., Filipowicz A., Feliks J.: *Dobór parametrów drgań dla grudkownika wibracyjnego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Inżynieria Chemiczna i Procesowa 2000, **28**.
5. Banaszewski T., Filipowicz A., Feliks J.: *Rynnowy granulator wibracyjny*. VI Ogólnopolskie Sympozjum Granulacja, Puławy – Kazimierz Dolny 2001.
6. Patent PL nr 173892: *Grudkownik wibracyjny*.
7. Patent PL nr 197521 B1: *Wibracyjny grudkownik rynnowy*.

Dr inż. Jacek FELIKS jest absolwentem Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (1997). Doktorat w Katedrze Maszyn Górniczych Przerobczych i Transportowych w 2004 r. Obecnie pracuje w tej Katedrze na stanowisku adiunkta. Jest autorem lub współautorem 2 rozdziałów monografii i 22 artykułów w prasie naukowo technicznej. Wygłosił kilkanaście referatów na konferencjach krajowych i międzynarodowych.

E-mail: feliks@agh.edu.pl, tel.: (12) 617-30-73

## IPOEX 2012

### Materiały wybuchowe.

#### Badania – Zastosowanie – Bezpieczeństwo

4-6 czerwca 2012 r.  
Hotel „Jaskółka”, Ustroń Zawodzie

#### Cel Konferencji

prezentacja, analiza oraz dyskusja na temat: technologii wytwarzania oraz zastosowania materiałów wybuchowych dla celów militarnych i cywilnych, bezpieczeństwa stosowania ich w górnictwie podziemnym i odkrywkowym, utylizacji materiałów wybuchowych.

#### Koszt konferencji

Wysokość opłaty konferencyjnej wynosi 1100 PLN + VAT (pokój 1-os.) lub 950 PLN + VAT (pokój 2-os.) i obejmuje udział w konferencji, materiały konferencyjne, noclegi oraz wyżywienie.

Opłata osoby towarzyszącej obejmuje noclegi oraz posiłki i wynosi 500 PLN + VAT.

#### Konto

Opłatę Konferencyjną należy przelać do 8 maja 2012 r. na konto:  
Instytut Przemysłu Organicznego  
ul. Annopol 6, 03-236 Warszawa,  
Bank PEKAO Oddział w Warszawie  
nr 84 1240 6074 1111 0000 4989 1458  
z adnotacją „IPOEX 2012”

#### SEKRETARIAT KONFERENCJI IPOEX 2012

tel. +48 22 811 12 31, e-mail: ipoex\_office@ipo.waw.pl  
mgr Agnieszka Lewandowska wew. 241  
mgr inż. Tomasz Słaciński wew. 306  
[www.konferencja.ipo.waw.pl](http://www.konferencja.ipo.waw.pl)