

Stanisław STRYCZEK, Andrzej GONET, Rafał WIŚNIEWSKI  
Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu

## MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA PYŁÓW CEMENTOWYCH Z CEMENTOWNI DO SPORZĄDZANIA ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH DO PRAC GEOINŻYNIERYJNYCH

**Streszczenie.** Zagadnienia ochrony środowiska zyskują coraz to większe znaczenie, a zatem korzystne jest poszukiwanie potencjalnych dodatków do zaczynów uszczelniających spośród produktów odpadowych z różnych gałęzi przemysłowych, jak choćby w przemyśle produkującym cement. Ogólnie przyjęto, że nowoczesny proces produkcji cementu jest procesem bezodpadowym, gdyż produkty uboczne, uzyskiwane w postaci alkalicznych pyłów, są w niewielkich ilościach wykorzystywane w różnych etapach tego procesu. A zatem, uzasadnione wydaje się pytanie, czy wykorzystanie ubocznego produktu, jakim są pyły cementowe w postaci dodatków do zaczynów uszczelniających, pozwoli na kształtowanie właściwości technologicznych zaczynów do uszczelniania i wzmacniania ośrodka gruntowego i masywu skalnego.

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wpływu różnych koncentracji pyłów cementowych na parametry technologiczne świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających o współczynniku wodno-mieszaninowym 0,5 i różnych koncentracjach pyłów cementowych. Szczególnie zwrócono uwagę na kształtowanie się właściwości reologicznych badanych zaczynów. W tym celu stosowano program numeryczny *Rheosolution* opracowany w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie.

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono optymalne koncentracje dodatku popiołów cementowych w zaczynach, mogących mieć aplikacje do prac geoinżynierskich związanych z uszczelnianiem i wzmacnianiem ośrodka gruntowego i masywu skalnego, a zwłaszcza metodami iniekcji otworowej.

## POSSIBILITIES OF USAGE CEMENT ASHES FROM CEMENT PLANT TO PREPARE CEMENT SLURRY FOR GEOENGINEERING WORK

**Summary.** This paper is showing analyses from laboratory investigation on cement slurry with addition of different cement ashes. Results are showing influence of different cement ashes for technological parameters of fresh and hardened cement slurry having water

– mixture coefficient 0,5. The sealing slurries were analyzed in view of the most optimum rheological model for a given cement ash concentration. Accordingly a numerical program *Rheosolution* worked out at the Department of Drilling and Geoengineering AGH-UST has been used.

As a result, optimum concentration of cement ashes were established for sealing slurries to be used in geoenvironmental works related to sealing and strengthening rock ground especially with well injection methods.

## 1. Wstęp

Podczas produkcji cementu nierozłącznym elementem tego procesu technologicznego są pyły cementowe, które powstają we wszystkich operacjach technologicznych. Procesom rozdrabniania i mielenia, wypalania, transportu, składowania itd. towarzyszy wydzielanie się pyłu. W mokrej metodzie produkcji cementu pył nie powstaje tylko w operacjach związanych z przeróbką szlamów [1, 4, 5].

W procesie produkcyjnym wyróżnić można dwie grupy operacji, którym towarzyszy pylenie. Do pierwszej należą procesy technologiczne: wypalanie, chłodzenie, kruszenie, mielenie, separacja itp., w których powstają lub są stosowane gazy, odprowadzane następnie z urządzenia technologicznego. Gazy te unoszą za sobą znaczne ilości pyłów powstających w procesie i zmiana koncentracji pyłu w gazach przez zmiany technologii produkcji jest bardzo trudna. Urządzenia odpylające muszą być dostosowane do stopnia zapylenia gazów typowego dla danego procesu.

Drugą grupę emitatorów pyłów cementowych stanowią procesy transportu, magazynowania, załadunku itp., w których wydzielanie się pyłu z klinkieru lub cementu następuje w wyniku jego ruchu. Ilość pyłu wydzielającego się w tych przypadkach zależy od zasady działania urządzenia i jego rozwiązania konstrukcyjnego. Aby zapobiec i zredukować stopień zapylenia, stosuje się hermetyzację urządzeń oraz specjalne osłony, z których powietrze jest kierowane do urządzeń odpylających.

Pyły cementowe piecowe zawierają duże ilości tlenu wapniowego i pyłu klinkierowego, które wykazują określone właściwości hydrauliczne i z tego powodu są zaliczane do kategorii hydraulicznych dodatków do cementu [2, 3, 5, 6, 8].

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu koncentracji pyłów cementowych z cementowni Rudniki oraz Chełm na kształtowanie się właściwości technologicznych zarówno świeżych, jak i stwardniałych zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementu hutniczego CEM III/A 32,5.

## 2. Pyły cementowe i ich właściwości technologiczne

Pyły powstające w procesie produkcji cementu możemy podzielić na [1, 4, 5]:

- pyły powstające z surowców, tj: pyły z wapienia, marglu, gliny, dodatków , żelazonośnych, żużla, gipsu itp.,
- pyły powstające z mieszanin surowcowych,
- pyły węglowe,
- pyły pieców do wypalania klinkieru,
- pyły klinkierowe,
- pyły cementowe.

Z wyjątkiem pyłów wydalanych z pieców obrotowych służących do wypalania klinkieru wszystkie pozostałe powstające pyły są drobnymi ziarnami surowców półproduktów lub produktów; ich skład chemiczny, jest w zasadzie identyczny ze składem materiału, z którego powstaje klinkier cementowy.

Skład chemiczny pyłów unoszonych z pieców różni się od składu mąki surowcowej podawanej do pieca, bowiem powstaje na całej długości walczaka pieca, i chłodnika.

Rozdrobnienie pyłów jest podstawową właściwością braną pod uwagę przy doborze urządzenia odpylającego.

Pyły, które są wytrącane w urządzeniach odpylających instalacje do rozdrabniania, suszenia i przemiału, są po prostu zawracane do homogenizacyjnych silosów mąki surowcowej i razem z nią wypalane w piecach. Podobna sytuacja jest z pyłami pochodzącymi z odpylania instalacji do przemiału na cement klinkieru portlandzkiego z dodatkami. Pyły tego pochodzenia stanowią gotowy cement i mogą być odprowadzane bezpośrednio do silosów gotowego produktu. Pyły z odpylania instalacji suszących i przemiałujących węgiel na pył do opalania pieców obrotowych są doprowadzane do zbiorników gotowego pyłu lub są doprowadzane z głównym strumieniem paliwa do pieca. W przypadku pyłów pochodzących z odpylania instalacji piecowych w cementowniach pracujących metodą suchą są odprowadzane do homogenizacyjnych silosów mąki surowej i wraz z nią są dokładnie mielone oraz wprowadzane do pieców do powtórnego wypalania. W cementowniach pracujących metodą mokłą utylizację pyłów można podzielić na dwie grupy:

- użytkowanie pyłu przez zawracanie ich do procesu produkcji cementu,
- użytkowanie pyłu poza procesem produkcji cementu.

Podstawowe znaczenie w procesie odpylania elektrostatycznego ma oporność właściwa pyłu. Określa ona zachowanie się naładowanego ziarna pyłu po zetknięciu z elektrodą w elektrofiltrze. W przypadku małej oporności ziarno pyłu po zetknięciu się z elektrodą zbiorczą oddaje jej swój ładunek natychmiast, ładuje się dodatnio od tej elektrody i będąc przez nią odpychane wraca z powrotem do strumienia przepływającego gazu. Pyły mające wysoką oporność właściwą silnie przylegają do elektrody zbiorczej, bardzo wolno oddają ładunek

i nie opadają pod wpływem wstrząsania; tworząc na elektrodzie warstwę izolacyjną. W miejscach przebicia tej warstwy zamiast wyładowania koronowego tworzy się łuk elektryczny. Zmusza to do obniżenia napięcia w elektrofiltrze, co z kolei zmniejsza skuteczność działania odpylacza. Korzystne warunki pracy odpylacza elektrostatycznego występują wówczas, gdy oporność właściwa pyłu wynosi od  $10^4$  do  $10^{10} \Omega \text{ cm}$ .

Oporność właściwa pyłów w bardzo dużym stopniu zależy od ich temperatury i wilgotności. Duży wpływ na nią mają zaadsorbowane przez ziarna pary i gazy, a więc zależy ona także od składu ośrodka gazowego. W gazach o małej zawartości pary wodnej najwyższe oporności wykazują pyły w zakresie temperatur ( $150\text{-}200^\circ\text{C}$ ), co tłumaczy się całkowitą utratą w tych warunkach zaadsorbowanej wilgoci. W wyższych temperaturach oporność pyłów szybko maleje. Absorpcja pary wodnej przez pył obniża jego oporność właściwą, szczególnie w zakresie temperatur do  $300^\circ\text{C}$ , stąd duża wilgotność odpylanych gazów jest czynnikiem korzystnym dla pracy elektrofiltru. Potwierdzeniem tego są dobre wyniki osiągane przy odpylaniu gazów z pieców do wypalania klinkieru, pracujących metodą moką. W metodzie suchej, dla osiągnięcia podobnych wyników, konieczne jest stosowanie wież nawilżających gazy przed ich skierowaniem do elektrofiltru.

### 3. Badania laboratoryjne

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu pyłu cementowego z cementowni Rudniki oraz Chełm na parametry technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na osnowie cementu hutniczego CEM III/A-32,5.

Badania laboratoryjne były prowadzone dla współczynnika wodno-mieszaninowego 0,5 oraz zawartości pyłów cementowych 0%, 5%, 10%, 15% oraz 20% (wagowo w stosunku do masy suchego cementu) na podstawie następujących norm:

1. PN – EN 197 – 1: 2002. Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
2. PN – EN 197 – 4 : 2005. Cement. Część 4. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów hutniczych o niskiej wytrzymałości wczesnej.
3. PN - EN 196-1 : 1996. Metody badania cementu. Oznaczanie wytrzymałości. Grudzień 1996.
4. PN – EN 480 – 1 : 1999. Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Beton wzorców i zaprawa wzorcowa do badań.
5. PN – EN ISO 10426 – 2. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2. Badania cementów wiertniczych. 2003.
6. PN – EN ISO 10426 – 1. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 1. Specyfikacja.

Przeprowadzone badania laboratoryjne obejmowały pomiar następujących parametrów:

a) dla świeżych zaczynów uszczelniających:

- gęstość (masa) – za pomocą wagi ramiennej typu Baroid,
- rozlewność – za pomocą stożka ściętego (AzNII),
- lepkość umowna (względna) za pomocą kubka Forda nr 4,
- filtracja – za pomocą prasy filtracyjnej typu Baroid,
- sedymentacja (odstój) – za pomocą cylindra pomiarowego,
- czas wiązania – za pomocą aparatu Vicata,
- właściwości reologiczne – za pomocą lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach typu Chan 35 API Viscometer o dwunastu prędkościach obrotowych oraz płynnej regulacji obrotów

b) dla stwardniałych zaczynów uszczelniających:

- wytrzymałość na zginanie – za pomocą aparatu Michealisa,
- wytrzymałość na ściskanie – za pomocą prasy hydraulicznej.

#### 4. Wyniki badań laboratoryjnych

W tabeli 1 przedstawiono parametry technologiczne świeżych zaczynów uszczelniających z dodatkiem 5, 10, 15 oraz 20% pyłu cementowego z cementowni Rudniki oraz Chełm dla współczynników wodno- mieszaninowych (w/s ) równego 0,5.



Tabela 2 przedstawia czasy wiązania zaczynów w temperaturze 20°C.

W tabelach 3 oraz 4 przedstawiono wyniki obliczeniowe z programu Rheosolution [9, 10] odnośnie do doboru modeli reologicznych oraz ich parametrów dla badanych zaczynów w funkcji koncentracji dodawanych popiołów cementowych [9, 10].

W tabeli 5 zamieszczono wyniki wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałych zaczynów uszczelniających w funkcji koncentracji badanych popiołów cementowych po 2, 7 i 28 dniach ich utwardzania w środowisku wodnym.

## 5. Wnioski końcowe

1. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że dodatek pyłów cementowych z cementowni Rudniki oraz Chełm do zaczynów cementowych sporządzanych na osnowie cementu hutniczego CEM III/A 32,5 powoduje :

- niewielkie obniżenie gęstości,
- znaczne obniżenie rozlewności,
- znaczny wzrost lepkości względnej,
- obniżenie odstoju,
- niewielkie obniżenie ilości filtratu,
- wzrost czasu filtracji,
- pogorszenie parametrów reologicznych,
- wydłużenie czasu wiązania,
- obniżenie wytrzymałości na zginanie,
- obniżenie wytrzymałości na ściskanie.

2. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można stwierdzić, że badane zaczyny uszczelniające pod względem reologicznym opisywane są modelem Herschel-Bulkleya.

3. Wytrzymałość mechaniczna stwardniałych zaczynów cementowych nie powinna stanowić podstawowego kryterium świadczącym o celowości stosowania pyłów cementowych jako dodatku do zaczynów. Zaczyny tego typu gwarantują odpowiednią współpracę z ośrodkiem gruntowym oraz masywem skalnym.

4. Za celowe uznaje się dalsze prowadzenie badań laboratoryjnych z zakresu optymalizacji technologii stosowania opracowanych receptur do uszczelniania górotworu metodami geoinżynierskimi.

Praca została wykonana w ramach badań statutowych nr 11.11.190.01. na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

## BIBLIOGRAFIA

1. Biskup T.: Wpływ koncentracji pyłów cementowych z cementowni Chełm na właściwości technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na osnowie cementu hutniczego CEM III/A 32,5. Praca niepublikowana. WwNiG AGH, Kraków 2008.
2. Brylicki W., Małolepszy J.: Własności cementów zawierających odpady z fluidalnego spalania paliw w paleniskach cyrkulacyjnych – atmosferycznych. Biuletyn Wydziału Inżynierii Materiałowej i Ceramiki nr 66/2001.
3. Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Górażdże Cement, Opole 2002.
4. Hojda Ł.: Wpływ koncentracji pyłów cementowych z cementowni Rudniki na właściwości technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementu CEM III/A 32,5. Praca niepublikowana. WwNiG AGH, Kraków 2008.
5. Kurdowski W.: Chemia materiałów budowlanych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo – Dydaktyczne, Kraków 2003.
6. Neville A.M.: Własności betonu. Polski Cement, Kraków 2000.
7. Sadłós M.: Wpływ koncentracji pyłów cementowych z cementowni Rudniki na właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementu CEM I – 42,5R. Praca niepublikowana. WwNiG AGH, Kraków 2008.
8. Stryczek S., Gonet A.: Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych. Sympozjum Naukowo-Techniczne, Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice, Piła – Płotki 2001.
9. Wiśniowski R.: Metodyka określania modelu reologicznego cieczy wiertniczej, Wiertnictwo, Nafta, Gaz. - 2001 R. 18/1, Kraków 2001.
10. Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow Fluid Coef. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe. nr 2-3, Kraków 2001.

Tabela 1

## Parametry technologiczne świeżego zaczynu uszczelniającego

Lp	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Współczynnik wodno-mieszaninowy [-]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]		Rozlewność wg stożka AzNII [mm]		Lepkość względna wg Kubka Forda nr 4		Odstój [%]		Filtracja właściwa $\Delta P = 0,7$ MPa [cm <sup>3</sup> /s]	
			C	R	C	R	C	R	C	R	C	R
1	CEM III + 0%	0,5	1820		150		n.m.		2,1		47/20 2,350 51/13,1	
2	CEM III + 5%	0,5	1820	1820	140	160	n.m.		2,0	1,2	47/20 2,350	51/13,1 3,893
3	CEM III + 10%	0,5	1810	1820	150	130	n.m.		1,6	1,0	54/11 4,091	49/14,2 3,450
4	CEM III + 15%	0,5	1820	1820	125	115	n.m.		1,0	0	42/24 1,750	55/17,1 3,216
5	CEM III + 20%	0,5	1830	1790	120C	0	n.m.		0,4	0	40/18 2,222	53/18,5 2,865

Gdzie:

- C – pył z cementowni Chetm
- R – pył z cementowni Rudniki
- n.m. – parametr niemierzalny



Tabela 2

## Czasy wiązania zaczynów uszczelniających

Lp.	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Składniki zaczynu uszczelniającego przypadające na 100 dm <sup>3</sup> cieczy zarobowej			Czas wiązania [godz.]					
		Ciecz zarobowa [dm <sup>3</sup> ]	CEM III/A 32,5 [kg]	Pył cementowy [kg]	Początek wiązania		Koniec wiązania		Czas wiązania	
					C	R	C	R	C	R
1	0,5/0	100	200	-	6 h 20 min		9 h 30 min		3 h 10 min	
2	0,5/5	100	190	10	5 h 40 min	6 h 30 min	8 h 0 min	9 h 50 min	2 h 20 min	3 h 20 min
3	0,5/10	100	180	20	9 h 30 min	6 h 50 min	12 h 0 min	10 h 10 min	2 h 30 min	3 h 20 min
4	0,5/15	100	170	30	6 h 0 min	7 h 10 min	8 h 30 min	10 h 40 min	2 h 30 min	3 h 30 min
5	0,5/20	100	160	40	4 h 40 min	7 h 20 min	6 h 50 min	10 h 50 min	2 h 20 min	3 h 30 min

Gdzie:

- C – pył z cementowni Chełm
- R – pył z cementowni Rudniki

Tabela 3

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających z dodatkiem pyłów cementowych z cementowni Chetm

Parametry Reologiczne	Koncentracja popiołu C [%]					
	0	5	10	15	20	
Model Newtona						
Lepkość dynamiczna Newtona [Pa*s]	0,1328	0,2658	0,1637	0,2841	0,4285	
Współczynnik korelacji [-]	0,9045	0,9480	0,9230	0,9315	0,9509	
Model Bingham						
Lepkość plastyczna [Pa*s]	0,1115	0,2294	0,1393	0,2402	0,3669	
Granica płynięcia [Pa]	13,7957	12,2729	15,7265	14,8187	13,3698	
Współczynnik korelacji [-]	0,9672	0,9856	0,9752	0,9816	0,9931	
Model Ostwalda de Waele						
Współczynnik konsystencji [Pa*s <sup>n</sup> ]	2,9491	3,3643	3,2791	4,0654	5,0857	
Wykładnik potęgowy [-]	0,5265	0,5623	0,5413	0,5452	0,5288	
Współczynnik korelacji [-]	0,9982	0,9956	0,9989	0,9975	0,9810	
Model Cassona						
Lepkość Cassona [Pa*s]	0,0831	0,1702	0,1049	0,1735	2,2561	
Granica płynięcia [Pa]	5,3823	4,5304	5,9561	5,8145	5,5118	
Współczynnik korelacji [-]	0,9820	0,9940	0,9876	0,9919	0,9992	
Model Herschel-Bulkleya						
Granica płynięcia [Pa]	0,4769	1,9945	1,6735	1,8850	6,4472	
Współczynnik konsystencji [Pa*s <sup>n</sup> ]	2,6228	2,1973	2,4980	2,9878	1,5810	
Wykładnik potęgowy [-]	0,5468	0,6407	0,5846	0,6002	0,7512	
Współczynnik korelacji [-]	0,9986	0,9994	0,9998	0,9991	0,9999	
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s <sup>-1</sup> ] [Pa*s]	0,1125	n.m.	0,1425	n.m.	n.m.	

Tabela 4

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających z dodatkiem pyłów cementowych z cementowni Rudniki

Koncentracja popiołu R [%]		0	5	10	15	20
Parametry reologiczne						
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa*s]	0,1328	0,1453	0,1598	0,3182	nm
	Współczynnik korelacji [-]	0,9045	0,9021	0,8454	0,8844	nm
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa*s]	0,1115	0,1218	0,1284	0,2574	nm
	Granica płynięcia [Pa]	13,7957	15,1762	20,2624	20,5315	nm
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik korelacji [-]	0,9672	0,9657	0,9475	0,9686	nm
	Współczynnik konsystencji [Pa*s <sup>n</sup> ]	2,9491	3,2077	4,4677	6,1480	nm
Model Cassona	Wykładnik potęgowy [-]	0,5265	0,5279	0,4967	0,4947	nm
	Współczynnik korelacji [-]	0,9982	0,9983	0,9979	0,9981	nm
Model Herschel-Bulkleya	Lepkość Cassona [Pa*s]	0,0831	0,0910	0,0929	0,1763	nm
	Granica płynięcia [Pa]	5,3823	5,8818	8,5195	8,9628	nm
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s <sup>-1</sup> ] [Pa*s]	Współczynnik korelacji [-]	0,9820	0,9807	0,9687	0,9847	nm
	Granica płynięcia [Pa]	0,4769	0,1540	-2,9602	-1,1965	nm
Model Herschel-Bulkleya	Współczynnik konsystencji [Pa*s <sup>n</sup> ]	2,6228	3,0185	6,0184	5,8090	nm
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5468	0,5396	0,4527	0,5101	nm
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s <sup>-1</sup> ] [Pa*s]	Współczynnik korelacji [-]	0,9986	0,9986	0,9985	0,9993	nm
	Lepkość pozorna przy 1022,04 [s <sup>-1</sup> ] [Pa*s]	0,1125	0,1225	0,1300	0,2720	nm

Tabela 5

Wytrzymałość na zginanie i ściskanie stwardniałych zaczynów cementowych

Lp	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Współczynnik wodno mieszanimowy [-]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]						Wytrzymałość na ściskanie [MPa]					
			po czasie utwardzania [doba]			28			po czasie utwardzania [doba]			28		
			2	7	28	2	7	28	2	7	28	2	7	28
	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R		
1	CEM III + 0%	0,5	2,505		5,425		9,616		5,625		13,542		29,166	
2	CEM III + 5%	0,5	1,976	2,31	4,596	5,33	8,903	9,57	5,000	5,21	11,250	12,71	29,588	
3	CEM III + 10%	0,5	1,624	2,26	4,024	3,97	7,572	8,67	4,375	5,00	8,958	12,50	23,333	
4	CEM III + 15%	0,5	2,753	2,18	4,437	4,00	8,776	8,24	5,208	4,37	11,458	12,08	37,291	
5	CEM III + 20%	0,5	1,803	1,92	4,135	3,78	6,853	7,64	5,416	3,96	11,041	11,25	28,333	

Gdzie:

- C – pył z cementowni Chełm
- R – pył z cementowni Rudniki