

Właściwości fizyczne odpowiedzialne za trwałość BWW z cementów hutniczych

Dr hab. inż. Wojciech Piasta, Politechnika Świętokrzyska, Kielce

1. Wprowadzenie

Nie trzeba udowadniać, że takie właściwości fizyczne jak wodoprzepuszczalność i nasiąkliwość odpowiadają w sposób bezpośredni za trwałość betonu. Są one ściśle związane z ruchem (transportem) wody i jej roztworów. Ruch ten w betonie zawsze będzie miał miejsce, choćby ze względu na obecność w nim wody zarobowej, kontakt z wilgotnym powietrzem, a także ze środowiskiem wodnym (cyklicznym lub stałym) lub chemicznie agresywnym.

Przepuszczalność jest związana z różnicą ciśnienia zewnętrznego wywołującą w porach ciągłych betonu ruch wody lub roztworu, opisywany przez prawo Darcy'ego:

$$\frac{1}{A} \frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta h}{L}$$

gdzie: A – pole przekroju, dq/dt – szybkość przepływu, Δh – różnica ciśnienia w m słupa wody, L – grubość elementu, K – współczynnik przepuszczalności.

Współczynnik materiałowy K ma swoistą wartość dla każdego betonu (zależną od jego składu i mikrostruktury) i dlatego dobrze charakteryzuje podatność na przepuszczanie wody danego betonu i może być stosowany do prognozowania trwałości betonu. Jednak wielkością wygodniejszą i czytelniejszą do porównywania przepuszczalności betonów jest głę-

bokość wnikania wody w próbkę przy zachowaniu stałego ciśnienia i czasu jego oddziaływania.

Sorpcja to ruch wody zachodzący bez różnicy ciśnienia zewnętrznego w niecałkowicie suchym i niecałkowicie nasiąkniętym materiale o ciągłych kapilarnych porach otwartych. Wraz z kontaktem z wodą ciśnienie kapilarne podciąga ją przez ciągłą włosową strukturę porów do wnętrza betonu. Względna ilość wody nasycająca beton (nasiąkliwość, absorpcja) jest proporcjonalna do objętości dużych porów kapilarnych ciągłych o średnicy większej niż około 50 nm [1]. Nasiąkliwość można uznać za właściwość przydatną do prognozowania trwałości betonu.

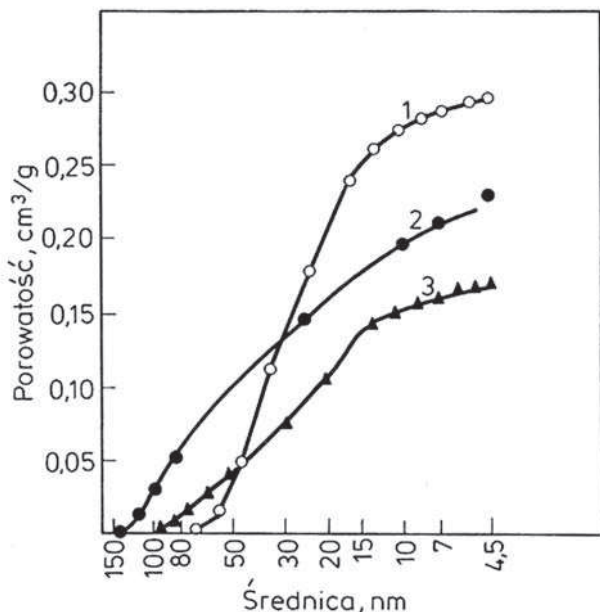
Do procesów biorących udział w transporcie roztworów wodnych należy także zaliczyć **dyfuzję** związaną z różnicą stężenia roztworu, choćby dlatego, że w porach zaczynu występuje *de facto* roztwór porowy, a w pozornie „czystej” wodzie – dwutlenek węgla, czyli roztwór kwasu węglowego.

Co do każdego z opisanych zjawisk istnieje zastrzeżenie dotyczące występowania w betonie ciągłych porów kapilarnych jako nieodzownego warunku transportu roztworu wodnego. Okazuje się, że wymienione procesy ruchu są związane z mikrostrukturą (składem fazowym, obecnością ziaren niehydratyzowanych, porowatością kapilarną, rozkładem wielkości porów kapilarnych, zawartością porów ciągłych) zaczynu

cementowego i warstwy kontaktowej w betonie. Natomiast mikrostruktura betonu jest kształtowana przez **w/c, rodzaj cementu, rodzaj i zawartość dodatków mineralnych oraz stopień hydratacji cementu**, a w mniejszym stopniu przez kruszywa i to tylko w obszarze strefy kontaktowej [2]. Dlatego wszystkie czynniki należy uwzględnić przy projektowaniu BWW o wysokiej trwałości.

Największe znaczenie dla wytrzymałości i trwałości betonu ma faza C-S-H, której duża zawartość występuje w zaczynie z cementu hutniczego przy dużym stopniu hydratacji. W badaniach [3] stwierdzono, że po 1 roku zawartość fazy C-S-H w zaczynie z cementu portlandzkiego wynosiła około 60%, a z hutniczego (o zawartości 50% żuźla) prawie 70% (przy 15% niehydratyzowanego żuźla), a zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ odpowiednio 22% i 7%.

Podczas wydłużonej w czasie hydratacji cementu hutniczego, w dużych porach kapilarnych stwardniałego zaczynu cementowego (utworzonych na początku hydratacji) powstaje z żuźla faza C-S-H z bardzo drobnymi porami [4]. W efekcie zmniejsza ona światło (średnice) powstałych w początkowej hydratacji dużych porów, a niekiedy nawet odcinkami je zamyka. Doprowadza to do niekoniecznie dużego zmniejszenia całkowitej porowatości, ale co najistotniejsze, tzw. porowatości kapilarnej związanej z obecnością w zaczynie dużych porów kapilarnych odpowiedzialnych za ruch



Rys. 1. Rozkład wielkości porów w stwardniałych zaczynach z cementu portlandzkiego z dodatkiem żuźla [5]; zawartość żuźla: 1 – 70%, 2 – 0%, 3 – 30%

roztworu, natomiast przepływ bardzo drobnymi porami odbywa się w sposób ograniczony.

W wynikach badań rozkładu wielkości porów [5] w czytelny sposób wyjaśniono, że w stwardniałych zaczynach z cementu portlandzkiego z dodatkiem granulowanego żuźla wielkopiecowego nie występują pory o średnicach $d > 100$ nm, a zawartość porów $d > 50$ nm jest niewielka (krzywe 1 i 3 na rysunku 1), natomiast w zaczynie bez dodatku żuźla zawartość porów nazywanych „dużymi” $d > 50$ nm, a więc drożnych dla ruchu roztworów, jest wcale niemała, gdyż wynosi nawet ponad 10%.

Od strony praktycznej interesujące jest, jaki jest wpływ zmian zachodzących podczas przedłużonej hydratacji cementów hutniczych w mikrostrukturze zaczynu na właściwości użytkowe betonów wysokowartościowych oraz jaka jest optymalna zawartość żuźla w cemencie hutniczym wobec jej dopuszczalnego szerokiego zakresu (od 36 do 80%).

2. Materiały i metody badań

Badaniom **przepuszczalności, nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie** poddano betony wykonane z 3 cementów hutniczych i w celu porównawczym z cemen-

tu portlandzkiego. Cementy użyte do wykonania betonów były następujące:

- CEM III/A 32,5N – NA LH HSR zawierający 57% żuźla wielkopiecowego;

Tabela 1. Skład chemiczny i fazowy klinkierów i żużli (w % mas.) i wybranych właściwości

Składnik	CEM I 32,5R	CEM III A 42,5N		CEM III A 32,5N CEM III B 32,5N	
	klinkier	klinkier	żuźel	klinkier	żuźel
Skład chemiczny					
Cz. nierozpuszcz.	0,2	0,2	0,1	0,15	0,1
SiO ₂	20,9	20,9	39,2	21,8	38,1
Al ₂ O ₃	5,8	5,8	6,1	5,1	7,7
Fe ₂ O ₃	3,3	3,3	0,4	2,9	1,5
CaO	65,4	65,4	44,3	65,9	43,7
MgO	1,5	1,5	6,4	1,4	6,2
SO ₃	1,2	1,2	0,08	0,5	0,06
Na ₂ O	0,16	0,16	0,60	0,1	0,5
K ₂ O	1,3	1,3	0,58	0,8	0,6
Cl ⁻	0,038	0,038	0,039	0,02	0,08
Skład fazowy					
C ₃ S	55,5	55,5		65	
C ₂ S	18,0	18,0		13	
C ₃ A	10,0	10,0		8,5	
C ₄ AF	9,8	9,8		10	
CaO wolne	1,0	1,0		0,7	
Pow. właściwa cm ² /g	2944	4000		4300 4700	
Pocz. wiązania min.	194	228		220 190	
Wytrzymałość po 28 dniach MPa	52,5	49,8		42,1 46,4	

- CEM III/B 32,5N – NA LH HSR zawierający 75% żuźla wielkopiecowego;
- CEM III/A 42,5N – NA zawierający 46% żuźla wielkopiecowego;
- CEM I 32,5R.

Skład klinkierów i żużli stosowanych do cementów przedstawiono w tabeli 1.

Zgodnie z tabelą 1 cementy CEM III/A 42,5N i CEM I 32,5R zostały wykonane z tego samego klinkieru, natomiast cementy CEM III/A 32,5N i CEM III/B 32,5N z tego samego żuźla i z tego samego klinkieru.

Betony o stosunku $w/c=0,32$ wykonano z grubego kruszywa łamanego dolomitowego (2÷16 mm) z Łaskowej Góry oraz naturalnego piasku kwarcowego (0÷2 mm). Procentowa zawartość piasku w stosie okrucowym wynosiła 34%, a jamistość stosu okrucowego 24%. Do mieszanek betonowych stosowano domieszkę upłynniającą najnowszej generacji

z grupy polikarboksylianów w ilości 0,85% w stosunku do ilości cementu. Skład mieszanek betonowych był następujący:

W = 152 kg/m³
 C = 480 kg/m³
 D_m = 4,10kg/m³
 K₂₋₈ = 620 kg/m³
 K₈₋₁₆ = 620 kg/m³
 P = 635 kg/m³

Konsystencja mieszanek miała charakter ciekły. Po 15 minutach opad stożka mieścił się w granicach od 15 do 19 cm, a średnica rozptywu od 54 do 57 cm. Wszystkim mieszankom przypisano klasę konsystencji S4 i F5.

W celu przeprowadzenia badań wodoprzepuszczalności, nasiąkliwości i wytrzymałości wykonano normowe próbki sześciennie o długości krawędzi 15 cm. Po rozformowaniu próbki były przechowywane cały czas w wodzie. Do każdego pojedynczego badania używano po 3 próbki, natomiast do badania wytrzymałości po 28 dniach i po 1 roku – 5 próbek.

Wszystkie badania betonów przeprowadzono po 28 dniach i po 1 roku dojrzewania, a wytrzymałość badano dodatkowo po 3 dniach. Każdą z 3 właściwości badano metodami normowymi. Przy czym wobec przewidywanej małej nasiąkliwości BWW i ciągłego przechowywania próbek w wodzie, badając nasiąkliwość próbki wyjmowano, wycierano i ważono, a następnie suszono i ważono ustalając różnicę masy próbki całkowicie nasyconej wodą i próbki suchej bez powtarzania kolejnego zanurzenia i suszenia. W badaniu wodoprzepuszczalności (wg PN-88/B-06250) najwyższe ciśnienie wody, któremu były poddane próbki wynosiło 1 MPa. Pod tym ciśnieniem próbki pozostawały przez 3 dni zamiast zalecanych 24 h. Po badaniu rozłupywano próbki i mierzono głą-

bokość wnikania wody w próbkę. Według autora czytelną miarą przepuszczalności betonu, szczególnie do celów porównawczych, jest głębokość wnikania wody w próbkę przy zadanym ciśnieniu przez określony czas.

3. Wyniki badań i dyskusja

W tabeli 2 podano średnią głębokość wnikania wody w próbki podczas badania przepuszczalności betonów po dojrzewaniu przez 28 dni i przez 1 rok.

Z wyników badania wynika, że przepuszczalność wszystkich betonów jest niezwykle mała w związku z małym stosunkiem w/c. Po 28 dniach dojrzewania głębokość wnikania wody była najmniejsza (18 mm) w beton z cementu CEM I 32,5R, a największa (37 mm) w beton z CEM III/B 32,5N, natomiast po 1 roku głębokość wnikania wody była najmniejsza (tylko 5 mm) w beton z cementu hutniczego o zawartości żużla 46%. W beton z cementu zawierającego 57% żużla była ona niewiele większa i wynosiła 9 mm. Nieco większą przepuszczalność (21mm wnikania wody) w porównaniu z pozostałymi betonami z cementów hutniczych wykazał beton z cementu zawierającego 75% żużla, mimo dużego spadku w okresie od 28 dni do 1 roku.

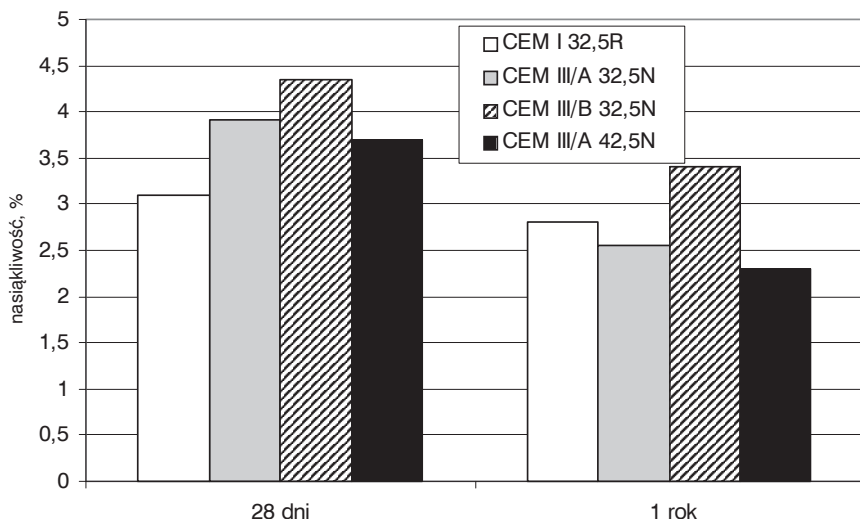
Wyniki badania nasiąkliwości, przedstawione na rysunku 2, wskazują na generalnie małą nasiąkliwość wszystkich betonów. Po 28 dniach dojrzewania nasiąkliwość betonów mieściła się w granicach od 3,1% do 4,3%. Zdecydowanie najmniejszą nasiąkliwość miał beton z cementu portlandzkiego (3,1%). Nasiąkliwość betonów z cementów hutniczych była większa. W przypadku zastosowania do betonów cementu o zawartości

żużla 46% i cementu o zawartości żużla 57% wynosiła odpowiednio 3,65% i 3,9%. Największą nasiąkliwość po 28 dniach miał beton z cementu o zawartości 75% żużla, przekraczała ona 4% mimo niskiego w/c=0,32, natomiast po 1 roku dojrzewania w wodzie nasiąkliwość betonów z wszystkich cementów hutniczych znacząco się zmniejszyła. Z wyjątkiem betonu z cementu CEM III/B 32,5N, nasiąkliwość betonów w wieku 1 roku była niższa niż 3%.

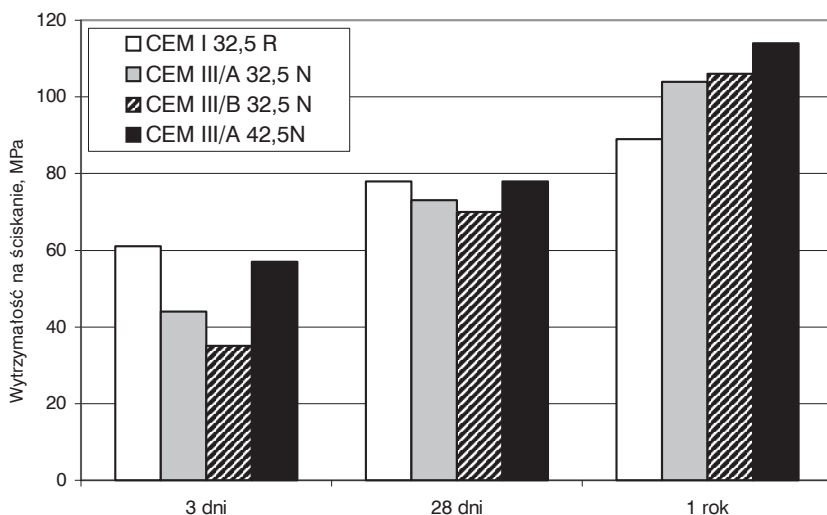
Po 3 dniach najwyższą wytrzymałość na ściskanie (około 60 MPa) osiągnęły betony z cementów portlandzkiego i hutniczego o zawartości 46% żużla (rys. 3) ze względu na odpowiednio wysoką wytrzymałość wczesną cementu CEM I 32,5R i wysoką klasę cementu CEM III/A 42,5N. W wieku 28 dni wszystkie betony wyrównały wytrzymałości, które wynosiły od 71 MPa do 78 MPa. Pomiędzy 3 a 28 dniami dojrzewania w wodzie największy przyrost wytrzymałości odnotowano w przypadku betonów z cementu CEM III/B 32,5N, aż o 34 MPa i z cementu CEM III/A 32,5N – o 29 MPa. Wszystkim betonom można przypisać klasę wytrzymałości C55/67. Po 1 roku przechowywania w wodzie nastąpiły kolejne zmiany wytrzymałości betonów, lecz o innym charakterze. Doszło do dalszego bardzo dużego przyrostu wytrzymałości betonów wykonanych ze wszystkich cementów hutniczych. W przypadku betonu z cementu CEM III/A 42,5N (zawierającego 46% żużla) przyrost wytrzymałości betonu wyniósł aż 37 MPa i ostatecznie wytrzymałość osiągnęła aż 114 MPa. Wytrzymałości betonów z pozostałych cementów hutniczych zawierających 57 i 75% po przyrostach o ponad 30 MPa były również bardzo wysokie i wyniosły odpowiednio 104 i 106 MPa, natomiast wytrzymałość betonu z cementu portlandzkiego 1-rocznego była najniższa (88 MPa) ze względu na jej mały przyrost (10 MPa).

Tabela 2. Głębokość wnikania wody w próbki w badaniu przepuszczalności

Średnia głębokość wnikania wody, mm							
CEM I 32,5R		CEM III/A 32,5N		CEM III/B 32,5N		CEM III/A 42,5N	
28 dni	1 rok	28 dni	1 rok	28 dni	1 rok	28 dni	1 rok
18	14	20	9	37	21	20	5



Rys. 2. Średnia nasiąkliwość betonów po 28 dniach i 1 roku dojrzewania w wodzie



Rys. 3. Średnia wytrzymałość betonów na ściskanie po 3, 28 dniach i 1 roku dojrzewania w wodzie

4. Podsumowanie

Efekt zróżnicowanej zawartości żużla w cementach najlepiej można zauważyć na podstawie wzrostu wytrzymałości betonów w czasie od 3 dni do 1 roku podczas przechowywania ich w wodzie (rys. 3). W porównaniu tym łatwo odczytywalne jest wolniejsze, lecz długo trwające twardnienie betonów z cementów o dużej zawartości żużla (57%, 75%) i szybkie, lecz skrócone twardnienie betonu z cementu portlandzkiego. Z punktu widzenia praktycznego najkorzystniejszy efekt podwójny wystąpił przy zastosowaniu cementu

CEM III/A 42,5N: szybkie twardnienie początkowe z powodu wyższej klasy wytrzymałości cementu oraz hydratacja wydłużona w czasie do jednego roku związana z zawartością 46% żużla.

Korzystny wpływ hydratacji wydłużonej w czasie zaznaczył się także w wynikach badań nasiąkliwości betonów, która po 1 roku przy zastosowaniu cementów zawierających 46% i 57% żużla wyniosła odpowiednio zaledwie 2,33% i 2,5% (po spadku od wartości 3,65% i 3,9% po 28 dniach). Odpowiednie zmniejszenie nasiąkliwości betonu z cementu zawierającego 75% żużla wynosiło także więcej niż 1%,

natomiast spadek nasiąkliwości betonu z cementu portlandzkiego w tym okresie wynosił tylko 0,3%, potwierdzając mały przyrost wytrzymałości i niewielki postęp hydratacji. Taka sama relacja wartości i zmian (spadków) przepuszczalności betonów z poszczególnych cementów potwierdza w całej rozciągłości wyniki badań nasiąkliwości.

Na podstawie prezentowanych w artykule wyników badań betonów w połączeniu z wykazaną [3] znacząco obniżoną zawartością portlandytu i wysoką zawartością fazy C-S-H w zaczynie z cementu hutniczego należy uznać, że trwałość BWW z cementów hutniczych w środowiskach chemicznie agresywnych jest bardzo wysoka i prawdopodobnie wyższa niż przy zastosowaniu cementu portlandzkiego.

Porównując zmiany w czasie badanych właściwości – wytrzymałości (rys. 3) z jednej strony oraz przepuszczalności (tab. 2) i nasiąkliwości (rys. 2) z drugiej strony – każdego betonu oddzielnie, można zauważyć, że bez względu na jego wiek, także w przypadku BWW, została dobrze potwierdzona „reguła Powersa” [6], według której wzrostowi wytrzymałości kompozytu cementowego zawsze towarzyszy spadek przepuszczalności (nasiąkliwości) i vice versa.

W porównaniu relacji „przepuszczalność i nasiąkliwość – a wytrzymałość” w zakresie wszystkich 4 betonów może zastanawiać stosunkowo duża przepuszczalność (tab. 2) i nasiąkliwość (rys. 2) betonu z cementu zawierającego 75% żużla, mimo jego bardzo wysokiej wytrzymałości równej 106 MPa (rys. 3). W tym miejscu można się odwołać do przytoczonego rysunku 1 [5], z którego wynika, że choć duża (70%) zawartość żużla zmniejsza średnicę porów, to zaczyn ma dość znaczącą porowatość kapilarną, większą niż zaczyn bez dodatku, a w szczególności niż zaczyn z dodatkiem 30% żużla. Ponadto zgodnie z przytoczonym

mi wcześniej wynikami badań [3], ilość niezhydratyzowanego żużla (cementu) w opisywanym betonie jest z pewnością największa wśród 4 badanych, sugerując możliwość dalszych zmian.

Autor podkreśla, że aby osiągnąć w praktyce tak korzystne właściwości betonów z cementów hutniczych prognozowane na podstawie wyników badań, konieczne należy zapewnić elementom betonowym kilkuletni i stały kontakt z wodą.

5. Wnioski

1. Wydłużona w czasie **do 1 roku** hydratacja cementów hutniczych bardzo korzystnie wpływa na właściwości użytkowe betonów wysokowartościowych przechowywanych **w wodzie**:

a) przepuszczalność i nasiąkliwość betonów z cementów hutniczych znacznie się zmniejszyły

w porównaniu z wartościami po 28 dniach; nasiąkliwość była nawet niższa niż 2,5%;

b) przyrost wytrzymałości na ściskanie betonów z cementów hutniczych od 28 dni do 1 roku wyniósł od 40 do 50%; wytrzymałość wszystkich betonów z cementów hutniczych była wyższa niż 100 MPa, natomiast wytrzymałość betonu z cementu portlandzkiego wynosiła 88 MPa;

c) najmniejszą przepuszczalność (5 mm wnikania wody) i nasiąkliwość (2,3%) oraz najwyższą wytrzymałość na ściskanie (114MPa) osiągnął beton z CEM III/A-42,5N zawierający 46% żużla.

2. Trudno na podstawie wyników badań betonów wykonanych z 3 różnych cementów wydawać jednoznaczne rekomendacje, nie mniej jednak narzuca się sugestia, że ze względu na badane właściwości – nasiąkliwość i przepusz-

czalność (odpowiedzialne za trwałość) – zawartość żużla od około 40 do 60% można uznać za optymalną w cemencie hutniczym do BWW.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mehta P. K., Hardened cement paste – Microstructure and its relationship to properties, 8th ICCI, Vol. 2, p.113–120, Rio de Janeiro 1986
- [2] Kurdowski W., Chemia cementu, Wydawnictwo Naukowe PWN, str. 480, Warszawa, 1991
- [3] Kurdowski W., Trybalska B., Skład fazowy zaczynu cementowego a właściwości betonu, s. 65, Konf. Dni Betonu, Wisła 2004
- [4] Kumor A., Roy D. M., Pore structure and ionic diffusion in admixture blended portland cement systems, 8th ICCI Vol. 1, p. 73–79, Rio de Janeiro 1986
- [5] Mehta P. K., Pozzolanitic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete in, Fly Ash, Silica Fume and Slag in Concrete, ACI SP-79, Detroit, 1983
- [6] Powers T. C., Structure and physical properties of hardened cement paste, J.Am. Cer.Soc., Vol. 41, 1959, p.1–6

Więcej zamówień? U nas możesz TANIO odpocząć!

OŻYWIENIE GOSPODARCZE!
Optymistyczne prognozy w branży budowlanej

WZROST gospodarczy

OŻYWIENIE!
budowlany notuje wzrost.

Noclegi pracownicze w Warszawie
już od **30 zł/osobę***

Do Państwa dyspozycji:

- Hostel Służewiec
- Hostel To-Tu
- Hotel Atos
- Hotel Aramis

Rezerwuj: ☎ (22) 20 76 550, www.puhit.pl
zakwaterowanie@puhit.pl

* w zależności od standardu noclegu, liczby osób i długości pobytu