

MOHAMED AHMAD

Wyższa Szkoła Zawodowa w Krośnie

WYKORZYSTANIE ODPADÓW BUDOWLANYCH W BUDOWNICTWIE JAKO CZYNNIK ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU

Abstract: Utilizing Building Material Waste in Construction as a Factor of Balanced Development. Utilizing building material waste is an important element of balanced development. Building material waste constitutes 32% of the general waste mass and this percentage is still increasing. Excessive building waste is a serious threat to the natural environment. Rendering building waste is varied and depends on the level of ecological knowledge, technology and economic development. It is estimated that in Poland about 70% of the building waste undergoes the process of recycling and other parts are neutralised and temporarily stored (Gorzyński 1998). Building waste is produced during building new objects, their renovation or demolition. The main directions of using building waste *e.g.* brick or concrete rubble are: terrain levelling, road engineering and recycling aggregate used for producing concrete (Jaworski 1999). This paper presents aspects of using building material wastes in building industry, the analysis of using aggregates recycled from concrete and brick to make ordinary concretes of low strength classes, the results of the laboratory research concerning selected features of concrete mixtures and hardened concretes from recycling aggregates are presented.

Wstęp

Budownictwo w Polsce rozwija się bardzo intensywnie. Dzięki ogólnej działalności tej branży możliwe jest tworzenie nowych obiektów budowlanych, wykonywanie różnego rodzaju remontów i napraw, modernizacja, lub całkowita rozbiórka już istniejących obiektów i zabytków, a także przebudowa cennych, z punktu widzenia społeczeństwa, elementów krajobrazu. Idąc z ciągłym postępem cywilizacji nie możemy jednak zaprzestać troski o środowisko naturalne. Troska o wspólne dobro i świadomość podejmowanych kroków to podstawowe zasady, które muszą towarzyszyć wszystkim działaniom przemysłowym. Budownictwo jest sektorem gospodarki, który powoduje duże obciążenie środowiska obok pozostałych gałęzi przemysłu. Odpowiednie zagospodarowanie odpadowych materiałów budowlanych to nie tylko poważny problem logistyczny, ale i palący problem społeczny. Tworząc nowe obiekty i przyczyniając się do ich perfekcyjnego wykańczania nie możemy pominąć odpadów, które w finalnym rezultacie pozostają po ukończonym dziele.

1. Ekonomiczne aspekty wykorzystania odpadów materiałów budowlanych

W 2000 r. odpady materiałów budowlanych w Polsce szacowano na 2186 tys. ton pochodzących z budowy, remontów, demontażu obiektów budowlanych i infrastruktury drogowej (Sas, Sobańska 2010), natomiast w 2002 r. nagromadziło się ok. 3 mln ton gruzu, a w 2007 r. sektor budownictwa wytworzył ogółem 818,4 tys. ton odpadów, z czego 569,6 tys. ton poddane zostało odzyskowi (Gus 2008). Stanowi to 69,60% wytworzonych ogółem odpadów budowlanych w 2007 r. Respektowania zasad zrównoważonego rozwoju obliuguje sektor budownictwa do wznoszenia budynków spełniających określone kryteria społeczne, ekologiczne i ekonomiczne (Aysin 2009). Recykling gruzu budowlanego przynosi różne korzyści ekonomiczne firmom budowlanym. Dzięki przetwarzaniu kruszyw recyklingowych w miejscu powstawania gruzu budowlanego można obniżyć koszty związane z wywozem i składowaniem odpadów budowlanych (Jaworski 1999). Recykling gruzu budowlanego powinien być lokalizowany w tych regionach Polski, które są najdalej położone od źródła wydobywania i przerobu kruszyw naturalnych. Recykling stwarza ponadto możliwości powstawania nowych miejsc pracy, a także nowych stanowisk, wpływa na obniżanie kosztów produkcji, przez co cena produktu ostatecznego również jest niższa. Na podstawie analizy dostępnych danych, można wnioskować, że Polska to kraj o znacznych opóźnieniach rozwojowych w sektorze recyklingu i utylizacji odpadów budowlanych. Opóźnienia te rzutują na aspekty ekologii i oszczędności surowców. Gruz budowlany zamiast przekruszenia i powtórnego użycia nadal trafia w przeważającej części na wysypiska. Recykling odpadów materiałów budowlanych eliminuje negatywny wpływ budownictwa na środowisko naturalne i przyczynia się do zachowania oszczędności zasobów naturalnych i zastąpienie ich wszelkimi innymi recyklatami.

2. Odpadowe materiały budowlane

Odpadowe materiały budowlane stanowią 32% ogólnej masy wszystkich odpadów. Powstają przede wszystkim na placach budowy nowych budynków oraz w wyniku remontów, modernizacji, demontażu i rozbiórek już istniejących obiektów budowlanych. Zaliczamy do nich również odpady z obiektów infrastruktury drogowych i innych (*Rozporządzenie* 2001). W tab. 1 przedstawione są struktury budowlanych materiałów odpadowych zgodnie z *Rozporządzeniem*. Sposób zagospodarowania odpadów budowlanych jest różny w poszczególnych krajach Europy Zachodniej. W Hiszpanii i Luksemburgu recykling wynosi ok. 10%, podczas gdy we Włoszech i Irlandii ok. 55%, a w Niemczech, Danii i Holandii aż 90%. Różnice te wynikają przede wszystkim z różnego poziomu świadomości ekologicznej społeczeństw, posiadanej infrastruktury i poziomu technologii i rozwoju gospodarczego. Wśród odpadowych materiałów budowlanych największą część stanowi gruz budowlany: betonowy i ceglany, który po przetworzeniu w znacznym stopniu mogą być wykorzystywane jako kruszywo recyklingowe do wytwarzania betonu lub do innych celów (Chimiczewski *et al.* 1997; Hupka, Rzechuła 2004; Rzezyński 2003; Wiszniewski 2003). Beton obok wody i energii należy do podstawowych czynników materialnych w strategii zrównoważonego rozwoju.

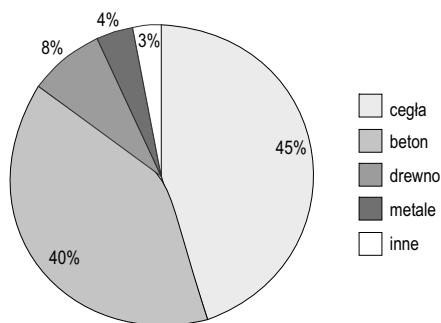
Tabela 1

Odpady materiałów i elementów budowlanych oraz infrastruktury drogowej
(np. beton, cegły, płyty, ceramika)

Kod odpadu	Rodzaj odpadu
17 01 01	Odpady betonu oraz gruz betonowy z rozbiórek i remontów
17 01 02	Gruz ceglany
17 01 03	Odpady innych materiałów ceramicznych i elementów wyposażenia
17 01 06	Zmieszane lub wysegregowane odpady z betonu, gruzu ceglanego, odpadowych materiałów ceramicznych i elementów wyposażenia zawierające substancje niebezpieczne
17 01 07	Zmieszane odpady z betonu, gruzu ceglanego, odpadowych materiałów ceramicznych i elementów wyposażenia inne niż wymienione w 17 01 06
17 01 80	Usunięte tynki, tapety, okleiny itp.
17 01 81	Odpady z remontów i przebudowy dróg
17 01 82	Inne niewymienione odpady

Źródło: (Rozporządzenie 2001).

Produkcja betonu na świecie jest ogromna i osiąga średnio rocznie w ostatniej dekadzie masę rzędu 7 mld ton, czyli ponad tonę na każdego mieszkańca Ziemi. Produkcji tej towarzyszy oczywiście stale rosnący nadmiar odpadów betonowych i brak miejsca do ich składowania. Ilość wytwarzanych odpadów betonowych na świecie też jest duża, szacowana na ok. 1,2 mld ton rocznie, z tego w UE wynosi ok. 200 mln ton rocznie. Przyczyną powstawania dużej ilości i różnorodnej jakości betonu odpadowego są katastrofy (trzęsienia ziemi na obszarach sejsmicznych, powodzie, pożary itp.), rozbiórki i remonty kapitalne obiektów budowlanych. Japończycy prognozują, że w ich kraju do 2035 r. całkowita ilość odpadów betonowych znacznie wzrośnie ze 170 mln ton/rok do 250 mln ton/rok, natomiast zużycie nowego kruszywa zmaleje z 4,8 mln ton/rok do 3,8 mln ton/rok. W Holandii (kraju uboższego w kruszywo naturalne) od 1995 r. obowiązkowo należy stosować co najmniej 20% wtórnego kruszywa grubego przy produkcji betonu. Typowy dla Europy procentowy udział głównych materiałów budowlanych w rozbieranych budynkach jest przedstawiony na ryc. 1.



Ryc. 1. Procentowy udział głównych materiałów budowlanych w rozbieranych budynkach

Źródło: (Ajdukiewicz, Kliszczewicz 2009)

Stwierdzono, że tradycyjne wyburzenie nie jest najlepszym sposobem rozbiórki natomiast stopniowy demontaż obiektu z jednoczesnym sortowaniem materiałów z rozbiórki zapewni, że 60-90% materiałów będzie przerabiana i ponownie stosowana. Taki sposób postępowania doskonale funkcjonuje już od lat w krajach Europy Zachodniej, Japonii, Singapurze i USA.

3. Właściwości kruszyw recyklingowych

Kruszywo recyklingowe jest materiałem heterogenicznym o wysokim stopniu rozrzutu właściwości, musi więc spełniać dodatkowe wymagania w celu zapewnienia wystarczającego bezpieczeństwa konstrukcji. Dotyczy to dopuszczalnej ilości zanieczyszczeń, gęstości w stanie suchym i absorpcji wody. Stara zaprawa i zaczyn oraz obecność lekkich zanieczyszczeń powodują, że gęstość kruszywa recyklingowego zawiera się w granicach 2340-2490 kg/m³ i jest mniejsza od gęstości kruszyw tradycyjnych (2500-2610 kg/m³) (Wolska-Kotańska 2005). Wartości te nie zależą od jakości betonu pierwotnego, natomiast są różne dla różnych frakcji kruszywa, np. 2340 kg/m³ dla kruszywa o uziarnieniach 4-8 mm, a 2490 kg/m³ dla kruszywa 16-32 mm. Kruszywa wtórne mają gorsze parametry dotyczące odporności na siarczany i mrozoodporności w porównaniu z kruszywami naturalnymi (Mechowski, Sybilski 1996). Kruszywa z recyklingu betonu nie są obojętne chemicznie, co ma wpływ na zachowanie się zarówno świeżego, jak i stwardniałego betonu z udziałem tego kruszywa. Do zastosowań w betonie zalecenia RILEM¹ określają takie właściwości kruszyw recyklingowych, jak uziarnienie, wytrzymałość, wskaźnik kształtu, współczynnik ścierania, zawartość chlorków oraz zawartość żelaza i wanadu. Na podstawie danych z literatury można stwierdzić, że kruszywa recyklingowe mają większą nasiąkliwość, w granicach 5-10%, przy czym wyższe wartości stwierdzono w recyklingowych kruszywach drobnych. Dlatego przy produkcji nowego betonu obok grubych kruszyw z recyklingu zaleca się stosowanie naturalnego piasku. Gruz budowlany w czasie zgromadzenia powinien być segregowany na poszczególne grupy materiałowe. Gruz betonowy i ceglany po ich rozdrobieniu i segregacji na poszczególne frakcje ziarnowe może stanowić produkt handlowy i być wykorzystywany w budownictwie jako kruszywo recyklingowe (Pniewczuk, Pisarska-Jamroży 2004). Wartości użytkowe takiego kruszywa zależą w dużym stopniu od wytrzymałości, porowatości i rodzaju materiału (Hubka, Rzechuła 2004).

4. Zastosowanie kruszywa z recyklingu do produkcji nowego betonu

Problem optymalnego wykorzystania gruzu betonowego i ceglanego od dłuższego czasu jest przedmiotem badań doświadczalnych. W Japonii już w 1971 r. rozpoczęto prace badawcze nad betonem odpadowym, w 1977 r. opublikowano projekt pierwszej normy o stosowaniu kruszywa wtórnego i wykonywaniu z niego betonu, a w 1978 r. przekruszony beton był już towarem handlowym. Na podstawie japońskich doświadczeń wiadomo, że przekruszony beton rozbiórkowy może być pełnowartościowym surowcem do betonów konstrukcyjnych. W Europie Zachodniej i Stanach Zjednoczonych od kilkunastu lat gruz betonowy i ceglany przetwarzany na kruszywo recyklingowe stosowany jest do wytwarzania betonów konstrukcyjnych. W Polsce również od wielu lat prowadzone są badania nad możliwością zastosowania kruszyw recyklingowych w szerszym zakresie, niż dotąd w budownictwie. Jednym z problemów ogra-

¹ RILEM - International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures.

niczających zastosowanie kruszyw recyklingowych do produkcji betonów konstrukcyjnych jest możliwość przeniesienia zanieczyszczeń z gruzu do nowego wyrobu (Grodzicka *et al.* 2002). Betony z kruszyw recyklingowych mogą stwarzać problemy technologiczne, które są związane z krótszym czasem wiązania i szybszą utratą urabialności. Wytrzymałość betonu z kruszyw recyklingowych zmniejsza się wraz ze wzrostem proporcji kruszywa recyklingowego w betonie. Kruszywo recyklingowe w betonie powoduje redukcję modułu sprężystości, zwiększenie pęcznienia oraz pogorszenie przyczepności między kruszywem i zaprawą. Istnieje ogólne przekonanie, że kruszywa recyklingowe niekorzystnie wpływają na cechy trwałości betonu, tj. odporność na ścieranie, skurcz, przepuszczalność dla wody i chlorków, odporność na karbonatyzację, mrozoodporność i odporność na siarczany. Analiza danych literaturowych (Nagataki *et al.* 2000) pozwala na ogólne stwierdzenie, że betony z kruszyw recyklingowych, w porównaniu z betonami z kruszyw naturalnych, charakteryzują się: a) niższą wytrzymałością na ściskanie (od 10 do 30%) i wysoką zmiennością wytrzymałości, b) niższą wytrzymałością na rozciąganie (ok. 10%), c) niższym modułem sprężystości (od 10 do 40%), d) większym skurczem (ok. 55%). Największy wpływ na właściwości nowego betonu ma klasa betonu pierwotnego, zwłaszcza dla betonów wysokowartościowych. Materiał wytworzony w wyniku recyklingu musi być właściwy dla odpowiednich zastosowań, powinien odpowiadać nie tylko granicom uziarnienia, ale minimalnym poziomom zanieczyszczeń i spełniać wymagania dotyczące stabilności i trwałości.

5. Badania własne

5.1. Metodyka i zakres badań

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w Laboratorium Materiałów Budowlanych Zakładu Budownictwa Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Krośnie. W okresie wykonania oznaczeń utrzymane były normowe wymagania w pomieszczeniu laboratoryjnym (PN-EN 12390-2 2011). Wszystkie składniki mieszanek betonowych, jak woda zarobowa, cement, kruszywo recyklingowe miały temperaturę pomieszczeń laboratoryjnych, w których wykonano badania. Mając na uwadze cel opracowania, szczególną uwagę zwrócono na metodykę badań laboratoryjnych. Zarówno warunki wykonania, pielęgnowania i dojrzewania, a później oznaczania wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych spełniły wymagania normowe w tym zakresie. Do wykonania próbek betonowych zastosowano formy sześciennie o wymiarach 150x150x150 mm (PN-EN 206-1 2003; PN-EN 12390-1 2001). Próbki pozostały w formach w temperaturze $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ przez dwa dni i były zabezpieczone przed wstrząsami i utratą wody (PN-EN 12390-3 2011). Po wyjęciu ich z form, były przechowywane w komorze klimatycznej w temperaturze $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $\geq 95\%$ do czasu poddania badaniom wytrzymałościowym (28 dni). Zaobserwowano również charakter i prawidłowość zniszczenia próbek betonowych. Zakres badań laboratoryjnych obejmował badania konsystencji mieszanek betonowych, nasiąkliwość i wytrzymałość stwardniałego betonu.

5.2. Charakterystyka materiałów użytych do badań laboratoryjnych

Do wytwarzania mieszanki betonowej została zastosowana woda z miejskiego wodociągu, którą na podstawie normy (PN-EN 1008 2004) uznano za przydatną do stosowania w betonie bez żadnych badań. Mając na uwadze, że temperatura wody ma wpływ na wiązanie i twardnienie cementu, woda przeznaczona do sporządzania mieszanki betonowej była przechowywana w specjalnych pojemnikach w warunkach laboratoryjnych przez 24 godziny. Bezpośrednio przed użyciem wody jej temperatura wynosiła 20°C. Do projektowania mieszanek betonowych zastosowano cement powszechnego użytku CEM II/B-V 32,5 R odpowiadający wymaganiom normy (PN-EN 197-1 2002). Jest to cement portlandzki z dodatkami mineralnymi, który ma wiele zalet istotnych w praktycznym stosowaniu w budownictwie. Właściwości cementu CEM II/B-V 32,5 R podane są w tab. 2.

Tabela 2

Właściwości cementu CEM II/B-V 32,5 R według PN-EN 197-1

Klasa wytrzymałości	Wytrzymałość na ściskanie			Czas wiązania	Stołość objętości (rozszerzalność)	Zawartość siarczanów SO ₃	Zawartość chlorków Cl ⁻
	po 2 dniach	po 28 dniach					
	MPa						
32,5 R	≥ 10,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10	≤ 3,5	≤ 0,10

Źródło: Opracowanie własne (tab. 2-9).

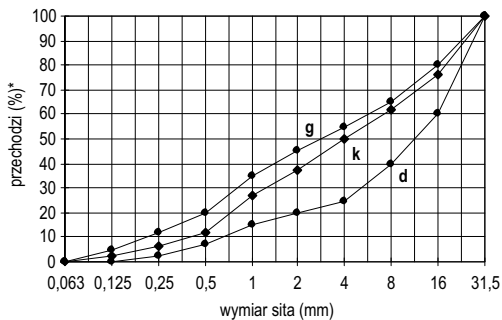
Do sporządzania mieszanek betonowych zastosowano kruszywa recyklingowe pochodzące z gruzu betonowego i ceglano-ceglastego o uziarnieniu 0-31,5 mm – fot 1 (kolorowa wkładka, s. 33).

Krzywe graniczne przesiewu (d – dolne i g – górne zostały przyjęte na podstawie (Jamróży 2008; Śliwiński 1999), jak dla kruszyw mineralnych. Skład ziarnowy kruszyw recyklingowych betonowych i ceglanych przedstawiony jest w tab. 3, a krzywe uziarnienia na tle krzywych granicznych na ryc. 2 i 3.

Tabela 3

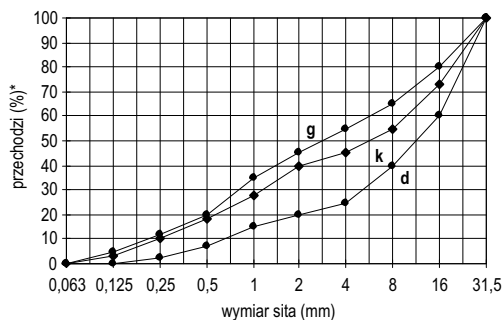
Skład ziarnowy kruszyw recyklingowych

Kruszywa recyklingowe	Analiza sitowa (sita w mm) przechodzi przez sito (%)										
	%	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Betonowe	100	100	76	62	50	37	27	12	6	2	0
Ceglano-ceglaste	100	100	73	55	45	40	28	18	10	3	0



Ryc. 2. Krzywa uziarnienia kruszywa recyklingowego
* zawartość % kruszyw, która przechodzi przez sito
o określonych wymiarach oczek w mm

Źródło: Opracowanie własne (ryc. 2-6).



Ryc. 3. Krzywa uziarnienia kruszywa recyklingowego
z gruzu betonowego i ceglanego
o wymiarach ziaren 0-31,5 mm

5.3. Projektowanie mieszanek betonowych

Do badania właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu zaprojektowano 5 mieszanek betonowych. Do trzech mieszanek zastosowano kruszywo recyklingowe z gruzu betonowego, a do pozostałych dwóch kruszywo ceglane. Zaprojektowano trzy klasy wytrzymałości betonu na ściskanie C8/10, C12/15, C16/20 dla betonu z kruszyw recyklingowych betonowych i dwie klasy dla betonu z kruszyw recyklingowych ceglanych C8/10 i C12/15. Założenia i skład mieszanek betonowych z kruszyw recyklingowych przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4

Założenia i skład mieszanek betonowych z kruszyw recyklingowych na 1 m³

Składnik mieszanki	Mieszanka I C8/10	Mieszanka II C12/15	Mieszanka III C16/20	Mieszanka IV C8/10	Mieszanka V C12/15
Klasa ekspozycji	X0				
Konsystencja	S3				
Cement CEM II/B-V 32,5 R (kg)	250	280	320	250	280
Woda (dm ³)	155	165	180	145	160
Kruszywo betonowe: 0-31,5 mm (kg)	1800	1800	1800	0	0
Kruszywo ceglane: 0-31,5 mm (kg)	0	0	0	1800	1800
Razem	2205	2245	2300	2195	2240
Punkt piaskowy (%)	37			40	
W/C	0,62	0,59	0,56	0,58	0,57

5.4. Wyniki badań laboratoryjnych

5.4.1. Konsystencje mieszank betonowych

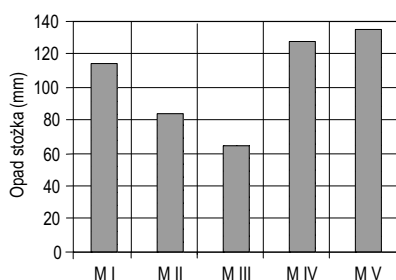
Do oznaczania konsystencji mieszank betonowych spośród kilku metod wybrano metodę opadu stożka zgodnie z normą (PN-EN 12350-2 2011). Jest to metoda miarodajna w przypadku stosowania kruszyw o wymiarach ziarn nie większych niż 40 mm. Mieszanka betonowa jest zagęszczana w formie w kształcie ściętego stożka (stożek Abramsa). Po zdjęciu formy, opad stożka mieszanki betonowej stanowi miarę jej konsystencji. Klasę konsystencji mieszanki betonowej według metody opadu stożka ustala się na podstawie danych zawartych w normie (PN-EN 206-1 2003). Uzyskane wyniki badań konsystencji mieszank betonowych zamieszczono w tab. 5 i graficznie zilustrowano na ryc. 4.

Tabela 5

Klasy konsystencji badanych mieszank betonowych

Mieszanka betonowa	Klasa konsystencji				
	S1	S2	S3	S4	S5
Mieszanka I - C8/10	x	x	115	x	x
Mieszanka II - C12/15	x	84	x	x	x
Mieszanka III - C216/20	x	65	x	x	x
Mieszanka IV - C8/10	x	x	128	x	x
Mieszanka V - C12/15	x	x	135	x	x

Uzyskane wyniki badań konsystencji mieszank betonowych wykazują, że wraz ze zmniejszeniem stosunku wodno-cementowego pogarsza się urabialność mieszank betonowych, a masa betonowa staje się gęstsza (konsystencje S2). Mieszanki betonowe z kruszyw recyklingowych ceglanych zawierających więcej drobnego kruszywa recyklingowego (uziarnienia do 2 mm) wykazują lepszą urabialność od mieszank betonowych z kruszyw recyklingowych z gruzu betonowego. Jest to konsekwencją większej powierzchni drobnej frakcji zawartej w kruszywach recyklingowych ceglanych. Uzyskane wyniki konsystencji mieszank betonowych z kruszyw recyklingowych są podobne do wielokrotnie potwierdzonych w badaniach konsystencji mieszank betonowych z kruszyw naturalnych o tych samych założeniach projektowych.



Ryc. 4. Konsystencje mieszank betonowych

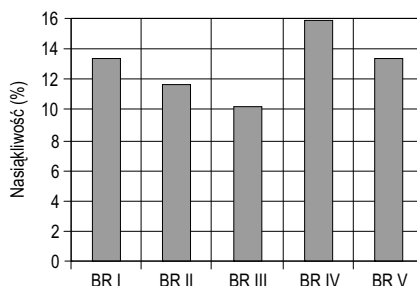
5.4.2. Nasiąkliwości stwardniałego betonu

Nasiąkliwość betonu jest to jego zdolność do wchłaniania wody przy ciśnieniu atmosferycznym. Dzieli się na nasiąkliwość objętościową i masową. Najczęściej określa się nasiąkliwość masową dla materiałów i wyrobów porowatych pochodzenia mineralnego. Wymagania dotyczące dopuszczalnej nasiąkliwości dla wszystkich betonów podane są w normie (PN-B-06250 1988). Według tej normy nasiąkliwość betonu nie powinna być większą niż 5% w przypadku betonów narażonych na bezpośrednie działanie atmosferyczne i 9% w przypadku betonów osłoniętych przed bezpośrednim działaniem czynników atmosferycznych. Nasiąkliwość zależy od porowatości betonu oraz od stosunku wodno-cementowego w mieszance betonowej. Do badania nasiąkliwości betonów recyklingowych wykonano trzy próbki sześciennie o wymiarach 150x150x150 mm z każdej projektowanej klasy zgodnie z normą (PN-B-06250 1988). Próbki betonu po całkowitym nasyceniu wodą wysuszono w laboratoryjnej suszarce w temperaturze 105-110°C do stałej masy. Masy próbki betonu w stanie suchym (stała masa) i pełnego nasycenia wodą określono z dokładnością do 0,2%, a nasiąkliwość obliczono w % z dokładnością do 0,1%. Wyniki badań nasiąkliwości betonu z kruszyw recyklingowych jako wartości średnie przedstawiono w tab. 6 oraz na ryc. 5. Próbki betonowe z kruszyw recyklingowych wykazały znaczną nasiąkliwość masową wynoszącą 9,3-15,8%. Duża nasiąkliwość stwardniałego betonu spowodowana jest nadmierną porowatością kruszyw recyklingowych. Obniżenie

Tabela 6

Wyniki badań nasiąkliwości stwardniałego betonu

Oznaczenie betonu	Nasiąkliwość masowa				Średnia nasiąkliwość
	próbka 1	próbka 2	próbka 3	próbka 4	
	%				
BR I	13,2	12,7	13,9	13,5	13,3
BR II	11,3	12,4	11,8	10,9	11,6
BR III	10,8	9,7	9,3	10,4	10,1
BR IV	15,3	14,9	15,7	14,8	15,8
BR V	13,2	13,1	12,9	13,5	13,2



Ryc. 5. Nasiąkliwość stwardniałego betonu

stosunku wodno-cementowego w mieszankach betonowych wpływa korzystnie na zmniejszenie porowatości a w konsekwencji i nasiąkliwości, ale nie gwarantuje uzyskania optymalnych wartości spełniających wymagania normowe. Na podstawie uzyskanych wyników badań laboratoryjnych, można stwierdzić, że największą nasiąkliwością odznaczały się próbki betonowe z kruszyw ceglanych (15,8%).

5.4.3. Wytrzymałości betonu na ściskanie

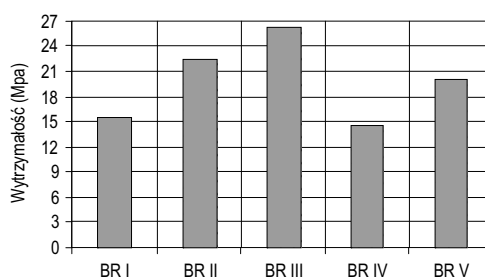
Badania wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano na sześciennych próbkach o wymiarach 150x150x150 mm zgodnie z normą (PN-EN 12390-1 2001). Próbki betonu do badań wytrzymałościowych wykonano i pielęgnowano zgodnie z normą (PN-EN 12390-2 2011). Próbki zagęszczono na stole wibracyjnym w możliwie krótkim czasie dla uzyskania należytego zagęszczenia betonu, a później pielęgnowano w warunkach laboratoryjnych pozostawiając je w formach przez dwa dni. Temperatura w pomieszczeniach laboratoryjnych w czasie przeprowadzenia badań wynosiła 20±5°C. Po wyjęciu próbek z form pielęgnowano je do chwili badania wytrzymałości w wodzie w temperaturze 20±2°C i wilgotności względnej powietrza ≥ 95%. Do utrzymania ww. warunków służyła wanna plastikowa z termostatem do sterowania temperatury z dokładnością ±5°C. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano na prasie hydraulicznej zgodnie z normą (PN-EN 12390-3 2011). Prasa wyposażona jest w oprogramowanie umożliwiające wybór stałej prędkości obciążenia z zakresu od 0,2 do 1,0 MPa/s (N/mm²·s). Obciążenie zwiększano w sposób ciągły przy stałej prędkości ±10% do uzyskania największego obciążenia. Dzięki kompatybilności ww. prasy i współpracy z PC możliwe było zaobserwowanie wykresu naprężeń w próbkach betonu w czasie ściskania. Po zgnieceniu próbki w maszynie wytrzymałościowej istnieje możliwość określenia prawidłowości wykonania badań oraz charakteru zniszczenia próbek. W tab. 7 podane są wyniki badań wytrzymałości na ściskanie projektowanych betonów, zaś graficznie zilustrowano je na ryc. 6.

Ocenę zgodności wytrzymałości projektowanych betonów z kruszyw recyklingowych dokonano na podstawie kryteriów zawartych w normie (PN-EN, 206-1 2003). Kryteria te przedstawione są w tab. 8.

Tabela 7

Wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszyw recyklingowych

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach				Średnia wytrzymałość
	próbka 1	próbka 2	próbka 3	próbka 4	
	MPa				
BR I	15,3	14,9	16,2	15,3	15,4
BR II	21,3	22,4	22,7	23,1	22,4
BR III	25,4	26,7	25,9	27,3	26,3
BR IV	14,2	14,5	14,1	15,4	14,6
BR V	19,4	20,2	21,3	19,5	20,1



Ryc. 6. Wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszyw recyklingowych

Tabela 8

Kryteria zgodności dotyczące wytrzymałości betonu na ściskanie według PN-EN 206-1

Produkcja	Liczba n wyników próbek	Kryterium 1	Kryterium 2
		Średnia z n wyników f_{cm}	Każdy poszczególny wynik f_{ci}
MPa			
Początkowa	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ci} - 4$
Ciągła	15	$\geq f_{ck} + 1,48\delta$	$\geq f_{ci} - 4$

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie z n wyników, f_{ck} – minimalna wytrzymałość charakterystyczna oznaczona na próbkach sześciennych, f_{ci} – dowolny pojedynczy wynik badania wytrzymałości betonu na ściskanie.

Na podstawie uzyskanych wyników badań wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszyw recyklingowych i kryteriów podanych w tab. 8 określono klasy wytrzymałości betonu – tab. 9.

Próbki betonowe z kruszyw recyklingowych wykazują wytrzymałość na ściskanie 14,6-26,3 MPa. Wzrost wytrzymałości obserwuje się wraz z zmniejszeniem wartości stosunku

Tabela 9

Określenie klasy betonów według [PN-EN 206-1]

Oznaczenie betonu	f_{ck}	Kryterium 1		Kryterium 2		Klasa betonu
		f_{cm}	f_{ck+4}	$f_{ci, min}$	f_{ck-4}	
MPa						
BR I	10	15,4	14	14,9	6	C8/10
BR II	15	22,4	19	21,3	11	C12/15
BR III	20	26,3	24	25,4	16	C16/20
BR IV	10	14,6	14	14,1	6	C8/10
BR V	15	20,1	19	19,4	11	C12/15

wodno-cementowego. Próbkę betonowe wykonane z kruszyw recyklingowych ceglanych odznaczają się niższą wytrzymałością od próbek betonowych z kruszyw recyklingowych z gruzu betonowego. Jest to konsekwencją właściwości kruszyw ceglanych, z których wykonano próbki betonowe. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań wytrzymałości betonu z kruszyw recyklingowych na ściskanie można stwierdzić, że wszystkie projektowane betony spełniają wymagania normowe i można zakwalifikować je do klas wytrzymałości C8/10-C16/20.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, można wnioskować, że:

1. Istnieje możliwość wykorzystania kruszyw recyklingowych betonowych i ceglanych do wytwarzania betonu zwykłego niskich klas wytrzymałościowych.
2. Kruszywa recyklingowe mogą być pełnowartościowym materiałem do produkcji betonów konstrukcyjnych, mimo potwierdzonych nieco gorszych cech wytrzymałościowych od betonów z kruszyw naturalnych.
3. Próbkę betonowe z kruszyw recyklingowych z gruzu betonowego wykazują lepsze właściwości od betonu z kruszyw recyklingowych ceglanych.
4. Właściwa prowadzona gospodarka odpadami budowlanymi, jeżeli nie rozwiązuje całkowicie problemu odpadów, to przynajmniej minimalizuje problem odpadów i prowadzi do oszczędności surowców pierwotnych, energii oraz ochrony środowiska naturalnego.
5. Konieczne jest przyspieszenie prac badawczych dotyczących ponownego wykorzystania kruszywa recyklingowego pochodzącego z gruzu betonowego i ceglanych mających na celu ustalenie wymagań, metody badania i sprawdzenia, kontroli jakości i zgodności wyrobów betonowych z kruszyw recyklingowych.

Literatura

- Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., 2009. *Recykling betonu konstrukcyjnego – cz. I*. „Inżynier budownictwa”, 2.
- Aysin S., 2009, *How Can the Construction Industry Conceptual Framework*. Sustainable Development, t. 17, wyd. 3, s. 161-173.
- Chimiczewski A., Olszewski E., Tenerowicz M., Okoń U., 1997, *Zagospodarowanie materiałów odpadowych powstających przy rozbiórce obiektów budowlanych*. „Przegląd Komunalny”, 2.
- Ekologia a budownictwo*, Ogólnopolska Interdyscyplinarna Konferencja Naukowo-Techniczna, PZTP, Bielsko- Biała.
- Gorzyński J., 1998, *Analiza emisji zanieczyszczeń w pełnym cyklu istnienia budynku*, [w:] X Ogólnopolska Interdyscyplinarna Konferencja Naukowo-Techniczna "Ekologia a budownictwo", PZTP, Bielsko-Biała, s. 63-68.
- Grodzicka A., Siemaszko-Lotkowska D., Wolska-Kotańska Cz., 2002, *Wybrane aspekty charakterystyki kruszyw pochodzących z recyklingu betonu i ich wykorzystanie*. Materiały konferencyjne, Mrągowo.

- Hupka J., Rzechuła J., 2004, *Gruz budowlany na składowiskach odpadów komunalnych*. „Recykling”, 3.
- Jamroży Z., 2008, *Beton i jego technologie*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Jaworski K. M., 1999, *Metodologia realizacji procesów budowy*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Mądrawski J., 2007, *Możliwość poprawy cech betonów na kruszywach recyklingowych*. "Architektura", 6 (1), s. 3-10.
- Mechowski T., Sybilski T., 1996, *Czy stosować w Polsce recykling nawierzchni bitumicznych na gorąco na drodze?* Drogownictwo, 10.
- Nagataki S., Gokce A., Saeki T., 2000, *Effects of Recycled Aggregate Characteristics on Performance Parameters of Recycled Aggregate Concrete*. CANMET/ACI International Conference Durability of Concrete, Barcelona, Spain, s. 51-62.
- Ochrona środowiska*, Informacje i opracowania statyczne, GUS, Warszawa, 2008.
- PN-B 06250, 1988, *Beton zwykły*.
- PN-EN 12390-1, 2001, *Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form*.
- PN-EN 197-1, 2002, *Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
- PN-EN 206-1, 2003, *Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- PN-EN 1008, 2004, *Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu*.
- PN-EN 12350-2, 2011, *Badanie mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka*.
- PN-EN 12390-2, 2011, *Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych*.
- PN-EN 12390-3, 2011, *Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badania*.
- PN-EN 12620+A1, 2010, *Kruszywa do betonu*.
- Pniewczuk K., Pisarska-Jamroży M., 2004, *Ciężki orzech do zgruzienia*. „Recykling”, 3.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów* (Dz.U.2001, nr 112, poz.1206).
- Rzeczyński B., 2003, *Recykling odpadów budowlanych, racje ochrony zasobów i przetwarzania odpadów na kruszywa wtórne*. „Ekoproblemy”, 2.
- Sas W., Sobańska K., 2010, *Przegląd naukowy. „Inżynieria i kształtowanie środowiska”*, nr 1 (47), s. 53-64.
- Śliwiński J., 1999, *Beton zwykły – projektowanie i podstawowe właściwości*. „Polski Cement”, Kraków.
- Wiszniewski A., 2003, *Nowoczesny recykling gruzu budowlanego*. „Recykling”, 5.
- Wolska-Kotańska Cz., 2005, *Właściwości i zastosowanie kruszywa z recyklingu betonu*. „Magazyn Autostrady”, nr 3, s. 18-22.