

## Recykling betonu krokiem w stronę ochrony środowiska – przegląd i ocena metod recyklingu betonu

Katarzyna Kalinowska-Wichrowska<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok, e-mail: k.kalinowska@pb.edu.pl

### STRESZCZENIE

W artykule zamieszczono dane dotyczące stanu zasobów kruszyw naturalnych i zwrócono uwagę na ogromną skalę produkcji betonu i wytwarzanych odpadów gruzo-betonowych na świecie. Przedstawiono stosowane na świecie metody recyklingu gruzu betonowego wraz z ich subiektywną oceną. Pokróćce scharakteryzowano regulacje prawne dotyczące recyklingu betonu definiowane przez Unię Europejską i prawo polskie. Stosowanie odpowiednio efektywnej metody recyklingu gruzu betonowego pozwala na uzyskanie wysokiej jakości kruszywa wtórnego, które może być ponownie wykorzystane do nowego betonu i zaoszczędzi zużycie kruszyw naturalnych.

**Słowa kluczowe:** recykling betonu, gruz betonowy, kruszywo wtórne, zasoby naturalne

### Concrete recycling as a step towards environmental protection – an overview and evaluation of concrete recycling methods

#### ABSTRACT

The article contains the data on the state of natural aggregate resources and attention has been paid to the enormous scale of the production of concrete and produced rubble-concrete waste in the world. The methods of recycling concrete debris used in the world along with their subjective assessment are presented in the paper. The legal regulations on concrete recycling defined by the European Union and Polish law are briefly characterized. The use of an appropriately effective method of recycling concrete debris allows obtaining a high quality secondary aggregate, which can be reused for the production of new concrete and reduces the consumption of natural aggregates.

**Keywords:** concrete recycling, concrete rubble, secondary aggregate, natural resources

#### WSTĘP

Beton jest obecnie najczęściej stosowanym materiałem budowlanym wykorzystywanym niemal w każdej nowo wznoszonej konstrukcji inżynierskiej. Szacunki podają, iż nawet 25 mld ton betonu corocznie jest wytwarzanych na całym świecie. Konsekwencją tego jest 510 mln ton odpadów budowlanych generowanych w Europie, około 325 mln ton w USA i około 77 mln ton w Japonii [Ferrari i in. 2014].

Wraz ze wzrostem zużycia betonu wzrasta zapotrzebowanie na cement i kruszywa. Konieczność ochrony naturalnych zasobów Ziemi, w tym głównie kruszyw oraz wysoka energochłonność procesu produkcji cementu nakładają na państwa członkowskie potrzebę ponownego wykorzysty-

wania składników betonu, czyli jego recykling. Szacuje się, że przemysł betonowy pochłania około 11 bilionów ton kruszywa naturalnego w skali roku [Jin i Chen 2015].

Zastosowanie efektywnej pod względem jakości uzyskiwanych produktów recyklingowych, metody przeróbki gruzu betonowego jest obiektem badań wielu naukowców.

#### STAN ZASOBÓW KRUSZYW

Według zaleceń Unii Europejskiej minimalny odsetek recyklingu odpadów „innych niż niebezpieczne” powinien wynosić co najmniej 70% ich masy do 2020 roku, podczas gdy obecnie wynosi on średnio 47% [Pacheco-Torgal i in. 2013].

Kruszywa naturalne, zarówno drobne jak i grube, dostępne są w różnym stopniu w poszczególnych regionach kraju. Szacuje się, że w Polsce około 90% złóż kruszyw grubych znajduje się w regionach południowych kraju, 6% w środkowych, a tylko 4% w regionach północnych. Powoduje to niedobór kruszyw gruboziarnistych w Polsce północnej. Dysproporcja ta, związana z lokalizacją większości złóż kruszyw grubych na południu, powoduje również zwiększone koszty transportu kruszyw, czasami z dużych odległości. Stosowanie kruszyw naturalnych wiąże się również z dewastacją środowiska oraz z nakładami energii na wydobycie czy też wspomniany transport [Głodkowska i Laskowska-Bury 2015; Kozioł i in. 2015a].

W tabeli 1 pokazano zasoby bilansowe surowców skalnych będących bazą do produkcji kruszyw naturalnych według stanu na 31.12.2015 r.

Przedstawiony w tabeli 1 stopień zagospodarowania złóż w zakresie ich liczby, jak również wielkości zasobów wskazuje tylko pozornie na bezpieczną sytuację, gdyż zasoby kruszyw w pewnym momencie ulegną wyczerpaniu. Szacuje się [Kozioł i Kawalec 2008a, 2008b], że w Unii Europejskiej produkuje się obecnie ponad 3 mld ton kruszyw naturalnych rocznie, a średnioroczny wzrost produkcji wynosi ok. 7%. Średnia wielkość produkcji i zużycia kruszyw naturalnych na jednego mieszkańca w Europie wynosi ok. 6ton, natomiast w Polsce wskaźnik ten waha się w granicy 4÷4,5 t na osobę. Prognozy mówią również, że po roku 2025 wystąpią ograniczenia w dostępie do złóż i brak wystarczającej bazy dla piasków i żwi-

rów, a po roku 2050 naturalnych kruszyw łamanych. Ponadto ochrona środowiska naturalnego wznacznym stopniu ogranicza możliwości pozyskiwania surowców naturalnych niezbędnych w budownictwie (w Polsce ok. 21% powierzchni kraju objęta jest różnymi formami ochrony). Wnioskuje się, że ceny kruszywa w przyszłości wzrosną, a tym samym zwiększy się zapotrzebowanie na surowce alternatywne. Rozpatrując wielkość zasobów kruszyw warto zwrócić uwagę na prognozy spadku poziomu produkcji kruszyw naturalnych łamanych w okresie do 2014 r. Po 2015 r. przewidziano zmniejszenie wydobycia, wynikające z ograniczonego dostępu do złóż już eksploatowanych oraz nowych, koniecznych do udostępnienia [Kabziński 2012]. Trzeba podkreślić, iż z deficytem naturalnego kruszywa spotykamy się nie tylko w Polsce, ale i na całym świecie.

W krajach z rozwiniętą gospodarką i dużą świadomością ekologiczną produkcja kruszyw alternatywnych stanowi znaczący odsetek produkcji kruszyw ogółem. Wyróżniającymi się krajami są Wielka Brytania (68 mln ton) i Holandia (18 mln ton), gdzie udział kruszyw alternatywnych stanowi ok. 25% łącznej produkcji. Udziałem powyżej 15% łącznej produkcji charakteryzują się również Belgia (16 mln ton), Niemcy (największa ilość produkcji – blisko 100 mln ton) i Dania (8 mln ton). W Belgii, będącej europejskim liderem w tym obszarze, przetwarzane jest około 90% gruzu budowlanego, z czego 75% wykorzystywane jest do niwelacji terenu, podbudowy oraz stabilizacji, natomiast 25% jako kruszywo do betonu.

**Tabela 1.** Zasoby bilansowe surowców skalnych (stan na 31.12.2015 r.) [Głodkowska i Laskowska-Bury 2015]

Wyszczególnienie	Ilość złóż		Zasoby			
	ogółem	zagospodarowane	geologiczne			przemysłowe
			ogółem	w złożach zagospodarowanych	stopień zagospodarowania zasobów geologicznych	
			[mln t]	[mln t]	[%]	
[szt]	[szt]	[mln t]	[mln t]	[%]	[mln t]	
Piaski i żwiry	9 704	3 870	18 639,57	5 470,05	29,3	3 680,47
Kamienie łamane i bloczne	746	331	10 800,98	5 526,97	51,2	3 382,09
Dolomity	12	5	531,69	237,59	44,7	125,49
Wapień i margle dla przemysłu cementowego	70	19	12 832,87	4 331,10	33,8	1 720,37
Wapień i margle dla przemysłu wapienniczego	118	23	5 564,83	1 873,31	33,7	960,83
Kwarcyty ogniotrwałe	18	6	6,59	5,93	90,0	-
Razem	10 668	4 254	48 376,53	17 444,95	36,1	9 869,25

Większość produkowanych w Polsce kruszyw stanowią kruszywa żwirowo-piaskowe (ok. 74%). O ile w początkowym okresie transformacji ustrojowej nasz kraj był znaczącym eksporterem kruszyw naturalnych, o tyle obecnie Polska importuje 5–6 mln t kruszyw rocznie (głównie łamanych). Przeważająca większość kruszyw żwirowo-piaskowych jest zużywana w budownictwie do produkcji różnego rodzaju betonów i wyrobów betonowych, głównie betonu towarowego, prefabrykatów i innych wyrobów betonowych, suchych mieszanek i tzw. chemii budowlanej [Galos i in. 2013].

Do produkcji betonów i wyrobów betonowych tradycyjnie wykorzystywane są mieszanki i pospółki, jednak potrzeba produkcji coraz wyższej jakości wyrobów powoduje systematycznie rosnące zastosowanie do tych celów żwirów i uzupełniająco piasków kwalifikowanych (uszlachtanych), przy malejącym udziale mieszanek klasyfikowanych (przesiewanych) oraz bardzo małym udziale pospółek (nieklasyfikowane mieszanki piasku i żwiru wydobyte bezpośrednio ze złoża). W strukturze produkcji wyrobów betonowych w Polsce dominuje masa betonowa (beton towarowy), stosowana w budownictwie kubaturowym (mieszaniowo-usługowym, przemysłowym itp.) oraz w drogownictwie – ok. 65% zużycia. Drugą pozycję zajmują płyty i kostki betonowe dla budownictwa komunikacyjnego – ok. 17%, kolejne: prefabrykowane elementy konstrukcyjne – ok. 8%, zaprawy i suche mieszanki – ok. 7%, elementy ściennie z betonu zwykłego – ok. 2% oraz rury betonowe ok. 1%. Szacuje się, że do produkcji wymienionych wyrobów betonowych zużywa się 60–70 mln t/rok żwirów, mieszanek i częściowo piasków klasyfikowanych [Kozioł i in. 2015b].

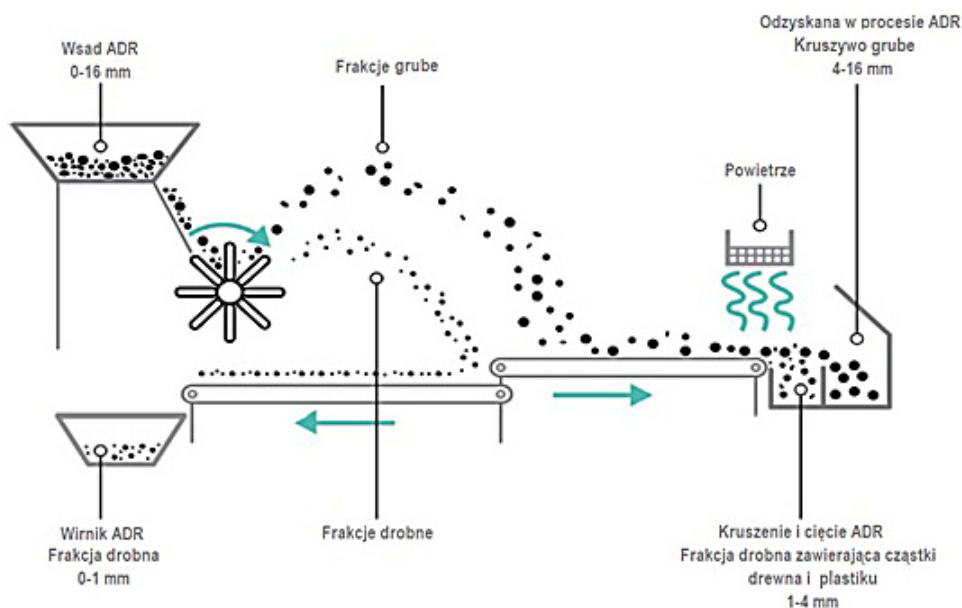
## PRZEGLĄD I OCENA STOSOWANYCH METOD RECYKLINGU BETONU

Zagadnieniem kompleksowego recyklingu konstrukcji żelbetowych zajmują się naukowcy na całym świecie, tworząc często międzynarodowe zespoły badawcze. Doskonałym przykładem jest projekt realizowany przez grupę naukowców z Holandii, Szwajcarii, Niemiec oraz Polski (Somayeh Lotfi, Manuel Eggimann, Eckhard Wagner, Radosław Mroz i Jan Deja) o nazwie *Advanced Technologies for the Production of Cement and Clean Aggregates from Construction and Demo-*

*lition Waste*, w skrócie C2CA. Projekt opiera się na stworzonej specjalnie do tego celu technologii recyklingu betonu. Według założeń metody zastosowanie wytworzonego w miejscu rozbiórki i możliwie jak „najczystszej” (czyli pozbawionej starej zaprawy cementowej i pyłów) kruszywa recyklingowego donowego betonu oszczędza zasoby naturalne kruszyw i zmniejsza koszty jego transportu. Przewidziano ponowne wykorzystanie frakcji drobnej, która w związku z wysoką zawartością wapnia może być wykorzystywana w procesie produkcji nowego cementu, co jak podają autorzy może nawet dwukrotnie obniżyć emisję dwutlenku węgla [Lotfi i in. 2015]. Proponowana technologia recyklingu zakłada w pierwszej kolejności selektywną rozbiórkę obiektu, a następnie złożony i wieloetapowy mechaniczny proces przeróbki i oczyszczania kruszywa. Schemat procesu przedstawiono na rysunku 1.

Proces odzysku kruszywa recyklingowego (rys. 1) jest całkowicie zmechanizowany i opiera się na wieloetapowym ścieraniu i przesiewaniu materiału wsadowego, jakim jest gruz betonowy, uprzednio przekruszony do frakcji 0/16mm. Jak podają Lotfi i in. [2015] proces polega na oddzielaniu materiału grubego od drobnego na zasadzie energii kinetycznej wytworzonej poprzez autogeniczne ścieranie się tych cząstek. Drobne frakcje recyklingowe uzyskiwane są podczas dalszego procesu cięcia do frakcji 1–4 mm zwanego ADR (Advanced Dry Recover). Metoda pozwala w prawdzie na uzyskanie wysokim stopniu oczyszczonych ze starej zaprawy kruszyw, ale nie przełożyło się na spodziewaną poprawę wyników wytrzymałościowych betonów na tym kruszywie.

Brazylijscy naukowcy [Pepe i in. 2014] przedstawiają metodę recyklingu betonu, która pozwala uzyskiwać kruszywo wtórne powstające w wyniku połączenia obróbki mechanicznej w kruszarce szczękowej i prezentują fizyczne i mechaniczne właściwości otrzymanych kruszyw recyklingowych i mieszanek betonowych. Przedmiotem prowadzonych prac było przede wszystkim porównanie odpowiednich informacji dotyczących aspektów jakościowych betonu z recyklingu z betonami na kruszywie naturalnym. Badania wskazują, że fizyczne i mechaniczne właściwości betonów na kruszywach recyklingowych w dużym stopniu zależą od jakości (natury, wielkości i klasyfikacji) kruszyw poddanych recyklingowi. Na wstępnym etapie gruz oczyszczono z drewna, stali, tworzyw sztucznych i przekruszono wku-



Rys. 1. Metoda C2CA recyklingu betonu (Lotfi i in. 2015)

szarce szczękowej. Następnie oddzielono drobne frakcje od grubych. Za frakcje drobne przyjęto te, których rozmiary były mniejsze od 4,75 mm. Kolejnym etapem było szlifowanie i przesiewanie, mające na celu przekształcenie kruszyw grubych tzw. „autogeniczne czyszczenie”, które miało na celu usunięcie większości warstwy zaprawy pokrywającej powierzchnię kruszywa. Na rysunku 2 przedstawiono urządzenie służące do przeróbki gruzu betonowego.

Po autogenicznym procesie czyszczenia w bębnie obrotowym, kruszywa przemywa się wodą, w celu usunięcia pyłów z ich powierzchni, a na końcu suszy się. Analizowano skuteczność autogenicznego procesu czyszczenia w bębnie obrotowym poprzez zbadanie, w jaki sposób faktycznie zmodyfikowano kluczowe właściwości fizyczne kruszyw po zastosowaniu różnych okresów czyszczenia (w zakresie od 2 do 15 minut). Wyniki samooczyszczania wykazały stopniowe zmniejszenie wchłaniania wody przez kruszywo, przy wzrastającym czasie obróbki od 2 do 15 mi-

nut. Na podstawie wstępnych ustaleń jakonajkorzystniejsze okazały się czasy obróbki wynoszące 10 i 15 min. Wyniki eksperymentalne pokazują efekt zaproponowanej procedury przetwarzania gruzu w odniesieniu do zmniejszonej absorpcji wody kruszyw oraz zmniejszonej zawartości przylegającej zaprawy, a także poprawę wytrzymałości na ściskanie betonów w odniesieniu do metod mechanicznych polegających jedynie na wieloetapowym kruszeniu w kruszarkach.

Kolejną metodą pozyskiwania kruszyw recyklingowych jest tzw. *Heating Rubble Method*, która do procesu obróbki mechanicznej włącza także proces termiczny. W metodzie tej stosowany jest pojemnik termiczny i dwa młyny typu rurowego. W pojemniku termicznym gruz betonowy podgrzewa się do temperatury około 300°C. Na skutek tego, w wyniku częściowej dehydracji cementu, następuje lokalna utrata przyczepności między zaprawą cementową, a kruszywem, co pozwala na późniejszym etapie ścierania w młynach powoduje oddzielenie kruszywa od zapra-



Rys. 2. Bęben obrotowy służący do autogenicznego ścierania kruszywa recyklingowego [Pepe i in. 2014]

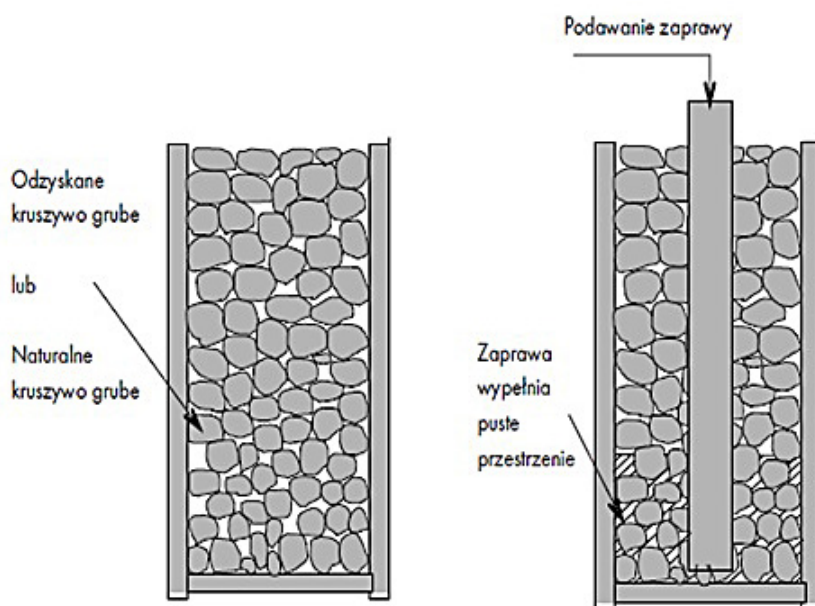
wy. W efekcie otrzymuje się około 35% kruszywa grubego, 21% kruszywa drobnego i aż 44% pyłów. Z uwagi na częściową tylko dehydratację cementu w temperaturze 300°C koniecznym było zastosowanie dwóch młynów typu rurowego celem efektywniejszego oddzielenia zaprawy od kruszywa. W związku z powstawaniem znacznej ilości pyłów, nieodzownym jest stosowanie filtrów workowych. Na równomierne nagrzanie całości gruzu betonowego w stacjonarnym zbiorniku zużyto dużą ilość energii, w związku z czym metoda okazała się zbyt droga [Shima i in. 2005].

Innym zabiegiem poprawy jakości kruszywa recyklingowego jest impregnacja jego powierzchni - przykładem metody impregnacji powierzchniowej kruszywa wtórnego mogą być wyniki badań [Tsujino i in. 2007], w których użyto dwa rodzaje kruszywa wtórnego: kruszywo średniej i niskiej jakości, które zawierało w jednostce masy odpowiednio 27,2% i 53,9% zaprawy przylegającej do ziaren kruszywa grubego. Środkiem powierzchniowym był olej zawierający tłuszcze lanolinowe oraz środek typu silane - analog krzemionki. Środki powierzchniowe zredukowały absorpcję wody w obydwu rodzajach kruszywa, lecz tylko w przypadku betonu z kruszywem średniej jakości (impregnowanym olejem), wzrosła nieznacznie wytrzymałość na ściskanie, odporność na karbonatyzację, zmniejszył się skurcz, ale wzrosło pęcznienie w stosunku do betonu z kruszywem nie impregnowanym. Metoda ta okazała się jednak mało efektywna i nie rozwijano jej w dalszych badaniach.

Choi i in. [2014a, 2014b] jako skuteczną metodę odzyskiwania wysokiej jakości kruszywa recyklingowego, nie naruszającej jego struktury (za co obwiniają wieloetapowe metody mechaniczne), wskazują ogrzewanie mikrofalowe. Energię mikrofalową wykorzystano w celu osłabienia spoiw zawierających dielektryk w postaci  $Fe_2O_3$ . Podczas ogrzewania mikrofalowego w betonie, pojawiają się mikropęknięcia spowodowane reakcją odwodnienia hydratów. To z kolei doprowadza do rozkładu  $Ca(OH)_2$  i  $CaCO_3$ , powodując zarówno osłabienie wytrzymałości matrycy cementowej, jak i rozerwanie połączeń kruszywo - matryca cementowa. Metoda jest stosunkowo nowa i nie prowadzono badań na większą skalę.

Z kolei Linsz i Mueller [2004] oraz Jungmanni Quintdt [1998] zaproponowali wykorzystanie impulsów dźwiękowych. Impulsy te są generowane pod wodą poprzez wyładowania elektryczne. Wywołane falowanie wody, na styku elementów o różnej gęstości, powoduje cykliczne siły ściskające i rozciągające niszczące wiązanie między kruszywem i zaprawą cementową.

Inne podejście prezentuje Morohashi i in. [2013], którzy w swoich badaniach skupili się nie na poprawie jakości kruszyw z recyklingu, a na samej technice betonowania z użyciem tych kruszyw. Przeanalizowali wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie betonu zawierającego kruszywo w postaci resztek betonu odzyskanych z gruzu budowlanego. Beton produkowano metodą dwuetapową, zwaną z angielskiego *Preplaced Aggregate Method*. W przypadku tej metody składniki beto-



Rys. 3. Metoda betonowania dwuetapowego [Morohashi i in. 2013]

nu łączone są ze sobą w dwóch etapach [Warner 2005; Abdelgader i Elgallud 2008] (rys. 3). Najpierw umieszczane jest w formie kruszywo grube, a następnie przez rurę puste przestrzenie między ziarnami wypełniane są zaprawą. Z powodu zawartości stwardniałych resztek spoiwa, kruszywo pochodzące z odzysku zazwyczaj charakteryzuje się większą nasiąkliwością niż kruszywo naturalne, więc podczas twardnienia betonu należy liczyć się z większym skurczem autogenicznym [Morohashi i in. 2007].

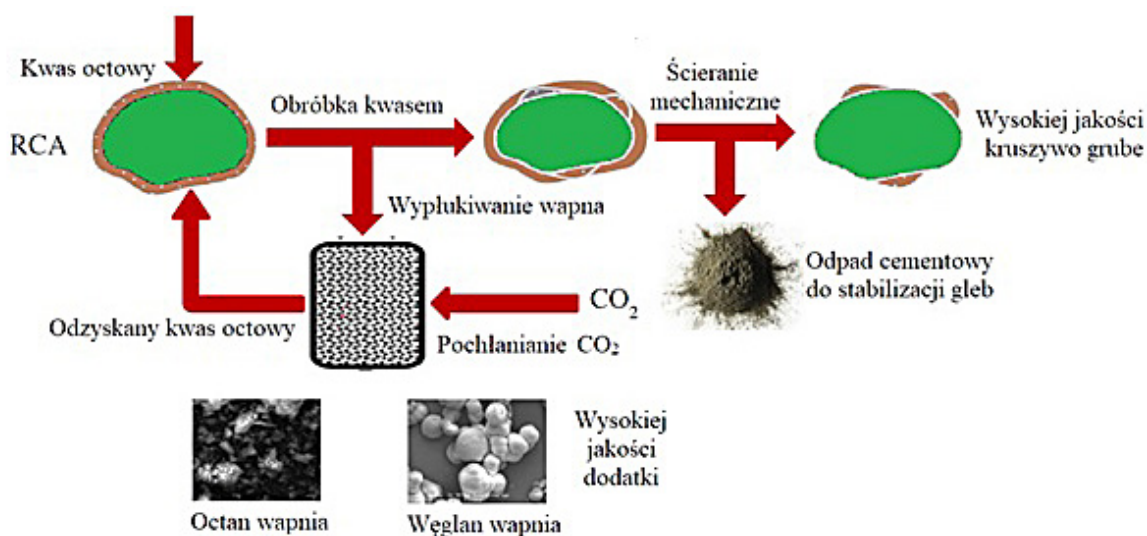
Umieszczone wcześniej w formie kruszywo grube tworzy szkielet o pewnej nośności. Dlatego przypuszczano, że technologia produkcji dwuetapowej skutecznie przyczyni się do skompensowania skurczu w przypadku betonu produkowanego z kruszywem pochodzącym z odzysku, co pośrednio wpłynie na wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie betonu.

Zgodnie z licznymi przypadkami udokumentowanymi w literaturze, zastąpienie naturalnego grubego lub drobnego kruszywa materiałem pochodzącym z odzysku powoduje spadek wytrzymałości. Przy współczynniku w/c zaprojektowanych betonów wynoszącym 0,45 wytrzymałość na ściskanie spadła o 12,7–36,1%, podczas gdy przy współczynniku w/c wynoszącym 0,55 i 0,65 zmiany wytrzymałości były mniejsze i niejednoznaczne, wahające się od –22,1% do +14,3%. Pomimo założeń sama technologia betonowania dwuetapowego przyczyniła się do otrzymania betonu o znacznie mniejszej wytrzymałości na rozciąganie niż technologia tradycyjna, niezależnie od współczynnika wodno-cementowego i

stopnia zastosowania kruszywa pochodzącego z odzysku.

Inny sposób uzdatnienia kruszyw recyklingowych proponuje [Vivian i in. 2007]. Metoda polega na wstępnym namaczaniu kruszywa recyklingowego w kwasach: HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> co ma na celu redukcję ilości starej zaprawy cementowej, natomiast Robayo-Salazar i in. [2017] jako sposób polepszania jakości kruszyw wtórnych (zarówno drobnych i grubych) wskazują zastosowanie roztworu NaOH. W efekcie metod chemicznych [Tam i in. 2007] uzyskuje się niewielki wzrost wytrzymałości betonu na kruszywie recyklingowym – o 7% przy 5% zawartości kruszywa z recyklingu) i o 5% (przy 30% jego zawartości) oraz około 12% obniżenie nasiąkliwości.

Z kolei Wang i in. [2017] udowadniają, że skuteczniejsze w przeciwieństwie do opisanej powyżej metody przyjazne środowisku jest namaczanie kruszyw recyklingowych w kwasie octowym. W porównaniu do istniejących metod przetwarzania chemicznego przy użyciu mocnych kwasów, nowa metoda nie wprowadza żadnych szkodliwych chemikaliów do kruszywa wtórnego. W wyniku przeprowadzonych analiz wykazano, iż moczenie w roztworze kwasu octowego skutecznie usuwa starą zaprawę cementową z powierzchni kruszywa recyklingowego, a absorpcja wody przez kruszywo spada od 9–19%. Stwierdzono, że 24 godzinne moczenie w 3%, roztworze octowym jest wystarczające, a wyniki wytrzymałości betonu wykonanego z kruszywem recyklingowym oczyszczonym tą metodą ulegają poprawie. Schemat metody przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Proponowana technologia oczyszczania kruszywa recyklingowego i wykorzystania zaprawy recyklingowej [Wang i in. 2017]

Dla uzyskania większej efektywności procesu autorzy proponują włączenie obróbki mechanicznej, tak aby kruszywo było intensywnie przemywane kwasem. Materiał odpadowy, czyli mieszanina kwasu octowego i zaprawy autorzy proponują dodawać do betonu jakodomieszkę chemiczną.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Popularnie stosowane metody recyklingu gruzu betonowego, w których przeważają metody mechaniczne, nastawione są głównie na pozyskanie kruszywa recyklingowego, charakteryzującego się możliwie jak najczystsza powierzchnią, pozbawioną starej zaprawy cementowej, której obecność, jak dowiedziono, wpływa niekorzystnie zarówno na cechy samego kruszywa jak i betonu.

Pozyskiwanie odpowiedniej jakości wtórnego kruszywa z gruzu betonowego do produkcji nowych betonów konstrukcyjnych wymaga odpowiednich urządzeń i technologii przetwarzania zanieczyszczonego odpadami gruzu.

Mechaniczny proces recyklingu gruzu betonowego polega na przetworzeniu gruzu rozbiórkowego, za pomocą rozdrabniania wcześniej dostarczonych bloków betonowych za pomocą kruszarki szczękowej, oddzielenia stali zbrojeniowej przy użyciu separatora magnetycznego; przesiania materiału przez odpowiednie sita wibracyjne; powtórne kruszenie niedostatecznie rozdrobnionych frakcji za pomocą kruszarki udarowej; powtórne oddzielenie stali zbrojeniowej za pomocą separatora magnetycznego. Podczas wieloetapowej obróbki mechanicznej mogą być wykorzystywane, oprócz wstępnego kruszenia w kruszarce, również dodatkowe czynniki, jak wielostopniowe kruszenie, ciśnienie i tarcie wywołane rotacją (np. bębny rotacyjne). Metody *mechaniczne* uzupełniane przemywaniem bądź oddziaływaniem impulsami wodnymi zapewniają wysoką czystość kruszywom, ale eliminują dalsze wykorzystanie frakcji drobnej pyłastej [PachecoTorgaliin 2013]. Wadą metod mechanicznych z wykorzystaniem ścierania na mokro jest to, że odzyskuje się tylko kruszywo grube z powierzchnią oczyszczoną z zaprawy cementowej w 60–70% [Zajac i Gołębiowska 2014]. Stosowane metody chemiczne (namaczanie w kwasach) do zwiększenia swojej skuteczności (odseparowania zaprawy) muszą być wspierane przez metody mechaniczne, przez co proces staje się bardziej skomplikowany, dłuższy i droższy.

Istotnym aspektem w przypadku odzysku kruszyw metodą mechaniczną są zanieczyszczenia gruzu w postaci gipsu, materiałów bitumicznych, szkła oraz drewna, które stanowią popularny materiał konstrukcyjny i wykończeniowy budynków. Zanieczyszczenia takie negatywnie wpływają na właściwości betonu. Materiały takie jak szkło bądź gips można eliminować praktycznie wyłącznie za pomocą selektywnej rozbiórki obiektów budowlanych. Próby usunięcia ich podczas dalszej przeróbki są bardzo kosztowne i złożone oraz mogą okazać się mało skuteczne.

Jakość kruszywa recyklingowego i jego przydatność do użycia w nowym betonie zależy od wielu czynników, między innymi od właściwości betonu oryginalnego, od metody obróbki technologicznej gruzu betonowego, czy frakcji kruszywa recyklingowego stosowanej jako substytut kruszywa naturalnego.

Przedstawione metody recyklingu nie zapewniają kompleksowego podejścia do szerokiego zagadnienia przeróbki gruzu betonowego, jednak niewątpliwie są dobrą drogą w dążeniu do ponownego wykorzystania cennych naturalnych surowców (kruszyw naturalnych). Potrzebne jest stworzenie technologii, która w całościowy sposób rozwiąże problem zalegającego gruzu betonowego i niewykorzystanego kruszywa wtórnego, wprowadzając je ponownie do obiegu.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ferrari G., Miyamoto M., Ferrari A. (2014). New sustainable technology for recycling returned concrete. *Construction and Building Materials*, 67, 353-359.
2. Głodkowska W., Laskowska-Bury J. (2015). Fibrokompozyt na bazie piasków odpadowych jako materiał do wytwarzania posadzek przemysłowych. *Materiały budowlane*, 2, 36-39.
3. Jin R., Chen Q. (2015). Investigation of concrete recycling in the U.S. construction industry. *Procedia Engineering*, 118, 894-901.
4. Kozioł K., Kawalec P. (2008a). Kruszywa budowlane i drogowe w Polsce i Unii Europejskiej. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 3(18), 62-65.
5. Kozioł K., Kawalec P. (2008b). Kruszywa alternatywne w budownictwie. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 4(19), 34-37.
6. Pacheco-Torgal F., Tam V., Labrincha J., Ding Y., de Brito J. (2013). *Handbook of Recycled Con-*

- crete and Demolition Waste, Elsevier.
7. Pepe M., Toledo Filho R., Koenders E. A. B., Martinelli E. (2014). Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Concrete and Building Materials*, 69, 124-132.
  8. European Commission (2012). Directorate-General Environment, Preparing Waste Prevention Programme, Guidance document, October 2012 r. (<http://ec.europa.eu/environment/waste/prevention/guidelines.htm>).
  9. Shima H., Tateyashiki H., Matsuhashi R., Yoshida Y. (2005). An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3, 53-67.
  10. Choi H., Kitagaki R., Noguchi T. (2014a). Effective Recycling of Surface Modification Aggregate using Microwave Heating. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12, 34-45.
  11. Choi H., Lim M., Choi H., Kitagaki R., Noguchi T. (2014b). Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete. *Journal of Environmental Protection*, 5, 583-596.
  12. Lotfi S., Eggimann M., Wagner E., Mróz R., Deja J. (2015). Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, 95, 243-256.
  13. Głodkowska W., Laskowska-Bury J. (2015). Fibrokompozyt na bazie piasków odpadowych jako materiał do wytwarzania posadzek przemysłowych. *Materiały Budowlane*, 2, 36-39.
  14. Linsz E., Müller A. (2004) High-performance sonic impulses - an alternative method for processing of concrete. *International Journal of Mineral Processing*, 74, 199-208.
  15. Wang L., Wang J., Qian X., Guo J. (2017). An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 432-441.
  16. Kabziński A. (2012). Udział przemysłu kruszyw naturalnych w realizacji programu rozwoju infrastruktury drogowej w Polsce w latach 2007–2013, Szanse i zagrożenia. [http://misto.republika.pl/pdf/artykuly/Udzial\\_przemyslu\\_kruszyw\\_A\\_Kabziński\\_dal\\_MISTO.pdf](http://misto.republika.pl/pdf/artykuly/Udzial_przemyslu_kruszyw_A_Kabziński_dal_MISTO.pdf) (dostęp: 25.07.2017 r.).
  17. Galos K., Burkowicz A., Guzik K., Smakowski T., Szlugaj J. (2013). Produkcja kruszyw naturalnych w Polsce. W: *Scenariusze zapotrzebowania na kruszywo naturalne w Polsce i w poszczególnych jej regionach*, 41-115.
  18. Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 r. (Dz. U. 2013 poz. 21, z późn. zm.).
  19. Tam V.W.Y, et al. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources Conservation & Recycling*, 50(1), 82-101.
  20. Robayo-Salazar R., Rivera J., Mejia R. (2017). Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 149, 130-138.
  21. Jungmann A, Quindt J. (1998). ALLJIG® - Technology for separation of building rubble. *Proceedings of the International Symposium: Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, London, UK, 45-53.
  22. Vivian T., Tam C. M., Khoa L. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources Conservation and Recycling*, 50.
  23. Rao A., Jha K.N., Misra S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, *Resour. Conserv. Recycl.*, 50, 71-78.
  24. Morohashi N., Meyer Ch., Abdelgader H. S. (2013) Beton z kruszywem pochodzącym z odzysku. *Zakłady Betonowe International*, 4, 24-31.
  25. Abdelgader H. S., Elgalhud A. (2008). Effect of grout proportions on strength of two-stage concrete. *Structural Concrete*, 9, 163-170.
  26. Tsujino M., Naguchi T., Tamura M., Kanematsu M., Marujama I. (2007). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1).