

## Wielokrotne zastosowanie kruszywa do betonu jako zrównoważone ekologicznie rozwiązanie – przegląd zagadnienia

### Multi-recycled aggregate concrete towards a sustainable solution – a review

**Madhavi Latha Kasulanati, Rathish Kumar Pancharathi\***

Department of Civil Engineering, NIT Warangal, India, 506004

\*Corresponding author: Rathish K. Pancharathi; e-mail: [rateeshp@nitw.ac.in](mailto:rateeshp@nitw.ac.in)

#### Streszczenie

Zmniejszyć, zastosować повторно, czyli często nazywany „recycling”, są ważnymi zagadnieniami zrównoważonego budownictwa i odnowienia środowiska. Wzrost budownictwa powoduje powstawanie dużych ilości odpadów budowlanych i z rozbiórką na świecie i stwarza możliwość ich zastosowania jako grubego kruszywa do betonu. W przyszłości, gdy większość miast stanie się betonowymi dżunglami, recykling i wielokrotny recykling betonu będzie miał coraz większe znaczenie. Także prefabrykacja wytwarza znaczącą ilość odpadów, w związku z różnorodną jakością materiałów. Zamiast usuwać je na składowiska, bada się możliwość ich powtórnego wykorzystania i krotność ich „recyklingu”. Niniejsza praca analizuje artykuły opublikowane przez różnych badaczy, w celu sprawdzenia zmiany właściwości powtórnie zastosowanego kruszywa do betonu, a także po pewnej ilości recyklingów. Badania właściwości świeżych i stwardniałych kruszyw betonowych po recyklingu, wykazały pogorszenie jakości, w porównaniu z mechanicznymi właściwościami nowo wytworzonych betonów. Natomiast powtórnie zastosowane odpadowe kruszywo z prefabrykacji wykazało takie same właściwości jak normalny beton, a nawet nieco większą wytrzymałość na ściskanie i można nim zastąpić do 20% normalnego kruszywa, wytwarzając beton dobrej jakości. Trzecia generacja zastosowanego kruszywa betonowego miała prawie dwukrotną zawartość zaprawy niż pierwszy recykling. Można było stwierdzić, że w przypadku betonu można zastosować recykling tylko kilka razy. Zależność wytrzymałości od trwałości kilkakrotnie zastosowanego betonu różnych generacji sprawdzono opierając się na analizie regresji.

**Słowa kluczowe:** wielokrotny recykling, odnowienie środowiska, adhezja zaprawy, gęstość upakowania, trwałość

#### Summary

Reduce, reuse and recycle are the important facets of sustainable construction and environmental recovery. Increase in the construction activity generates huge amount of construction and demolition waste worldwide, and has a potential to be used as concrete coarse aggregate. In the future, where, most of the cities are likely to become concrete jungles, recycling and multi-recycling of concrete becomes all the more important. Also, the precast industry generates large amount of wastes due to discrepancies in quality of materials. Instead of depositing them as landfills or rejecting recycled materials, the possibility of reusing them is investigated and the finite number of times the recycling can be done, is examined. The present paper ponders on literature works, done by various researchers to check the variation in properties of recycled concrete aggregate, after finite number of generations of recycling. The studies on fresh and hardened state properties of recycled aggregate concrete showed a decrease in quality, with respect to mechanical performance of newly made concrete. The recycled concrete aggregate from precast rejects performed equal to natural concrete and even showed slightly higher compressive strength than natural aggregate concrete and can be replaced up to 20% of natural aggregate, to produce the concrete of accepted quality. The third generation recycled concrete aggregate showed almost twice the amount of mortar as that of first generation recycled concrete aggregate. It can be seen that the concrete can be recycled only a finite number of times. A relationship between strength and durability properties of recycled aggregate concrete of different generations was derived based on multi-linear regression analysis.

**Keywords:** multi-recycling, sustainability, adhered mortar, packing density, durability

## 1. Wprowadzenie

Z badań wynika, że powtórne stosowanie kruszywa betonowego i jego segregacja, są ważnymi czynnikami wpływającymi na właściwości tego kruszywa. Wprowadzono obowiązek stosowania 20% odpadów budowlanych i z rozbiórki w budownictwie (1). Także kruszywo betonowe z recyklingu [KBR] może być stosowane do 25% w normalnym betonie, do 20% w betonie zbrojonym klasy M-25 lub niższej i może całkowicie zastępować kruszywo naturalne w mieszankach betonowych klasy niższej od M-15 (2). Zapotrzebowanie na wodę w przypadku kruszywa betonowego z recyklingu jest o 5% większe niż dla normalnego kruszywa betonowego [NKB], bez superplastyfikatora (3). KBR stosowane do prac budowlanych nie powinno zawierać żadnych składników, które mogą opóźnić wiązanie betonu więcej niż o 15%, w porównaniu z naturalnymi kruszywami (4). Około 38 powtórnie zastosowanych betonów stanowiło zapas kruszywa, 11 zostało zastosowane powtórnie w nowym betonie z cementu portlandzkiego (5). Także LEED, oceniany jako Zielony Budowlany Układ Sprawdzający, także zaczął traktować powtórnie stosowany beton jako swój system punktowy (6). W większości wskaźników środowisko ma 18 do 30% wpływu na produkcję naturalnego kruszywa (7). Materiał z recyklingu powinien być wolny od stali zbrojeniowej, odpadków drewnianych i skalnych, roślinnych, miękkich, kruchych, cienkich oraz wydłużonych, lub z kawałkami laminatów, materiałów pokruszonych i niebezpiecznych, a także wolny od rozpuszczalników, i zanieczyszczeń (8). KBR stosowane w budownictwie, może powtórnie być zniszczone i wykorzystane. Także naprawy i rozebranie budynków zbudowanych z kruszywa z recyklingu, tworzy kruszywo następnej generacji. To prowadzi do procesu kolejnych recyklingów, w których kruszywo jest stosowane szereg razy (9).

Poprzednie badania właściwości powtórnego stosowania kruszywa betonowego, różnych generacji wykazały, że ulegają one pogorszeniu wraz z ilością recyklingów. Obecna praca skupiła się na badaniach wpływu recyklingu betonu skończony szereg razy, tak aby beton otrzymany po recyklingu spełniał wymagania dla nowego, szczególnie w zakresie wytrzymałości i trwałości.

## 2. Różne źródła surowców i metody ich przesiewania

Źródłem materiałów z recyklingu mogą być odpady z rozbiórki budynków, odrzucone kawałki elementów z prefabrykacji i kruszywo z wapieni. Materiał powinien być wymyty i przesiany szereg razy, w celu usunięcia niepotrzebnych i szkodliwych kawałków. Kruszarka szczękowa przygotowuje kruszywo o odpowiednim uziarnieniu. W większości badań powtórnie zastosowany beton był rozdrabniany w laboratorium (10-17). Stosuje się cement CEM I w celu otrzymania betonu klasy 30/37 (17). Stosuje się cement CEMEX Moratade Jalon zgodny z normą UNE EN 197-1 według (10) w celu otrzymania KBR. Glenium 3030 NS i Micro air (12), Sika ViscoCrete-5 Neu (17), dodaje się w celu zmniejszenia wody zarobowej i wprowadzających powietrze domieszek. W głównym przeglądzie podano, że KBR odrzucone w prefabrykacji (10),

## 1. Introduction

Evidence from the research suggests, origin of the recycled concrete aggregate and its segregation as the important factors contributing to the characteristics of recycled aggregate for various generations. It is made mandatory to use Construction&Demolition waste to as high as 20% in construction (1). Also, the recycled concrete aggregates [RCA] can be used up to 25% in plain concrete; 20% in reinforced concrete for M-25 or lower grade of concrete, and can completely be replaced in lean concrete mixes of grade less than M-15 (2). The free water demand for recycled aggregate concrete [RAC] mixtures is 5% higher than that for natural aggregate concrete [NAC] systems without superplasticizers (3). The recycled concrete aggregate to be used for structural purposes should not contain any material which may retard the setting of concrete by more than 15%, as compared to the natural aggregates (4). About 38 states recycle concrete as an aggregate base; 11 recycle it into new Portland cement concrete (5). The LEED Green Building Rating System, also recognized recycled concrete in its point system (6). For most of the environmental indicators, environmental impacts are in the order of 18 to 30% of the impacts of production of crushed natural aggregate (7). The recycled materials shall be largely free from reinforcing steel, trash wood, roots, vegetation, soft, friable, thin, elongated or laminated pieces, disintegrated material and hazardous materials and also shall be free from solvents or other contaminated substances (8). The recycled aggregate concrete used in construction, may again be demolished and recycled. Also, the repair and demolition of structures constructed using recycled aggregate generate next generation aggregate. This leads to the process of multi-recycling, where, the aggregate is recycled for a finite number of generations (9).

The previous studies on properties of recycled concrete aggregate from various generations showed that they worsen with the number of generations of recycling. Present study contributes to the investigation done on the determination of recycling the concrete for a finite number of times, such that the concrete manufactured after recycling satisfies the limitations for fresh, hardened and durability properties.

## 2. Various sources of raw materials and method of screening

The source of recycled material can be building demolition waste of buildings, rejected particles of precast units, limestone aggregate. The material shall be washed and screened several times to remove unwanted and hazardous particles. Jaw crusher will separate the aggregates according to their sizes. In most of the studies, recycled concrete is attained by crushing source concrete in the laboratory (10-17). Cement CEM I is used (17) to obtain the concrete of strength class 30/37. Cement –CEMEX Moratade Jalon is used according to UNE EN 197-1 specification (10) to attain the recycled aggregate concrete from precast concrete rejections. Glenium 3030 NS and Micro air (12), Sika ViscoCrete-5 Neu (17) are used as water reducing and air entraining admixtures.

z betonu o wyższej klasie (14), przy zastosowaniu szczękowej lub udarowej kruszarki (18), zastosowano pomyślnie w dwukrotnym recyklingu (16,17) uzyskując lepszej jakości beton niż w innych przypadkach.

### 3. Fizyczne i mechaniczne właściwości

Właściwości fizyczne badano za pomocą klasycznych metod (13), wykorzystując minimalną liczbę wyników zgodnie z wymaganiami RILEM (8, 14). W metodach przygotowania mieszanek we wcześniejszych doświadczeniach przeprowadzonych w Europie, stosowano rozpliw wynoszący  $125 \pm 15$  mm (11), kruszywo z wapienia dla klas betonu C 30/37 (13), całkowite zastąpienie naturalnego kruszywa kruszywem z recyklingu (10) w celu uzyskania docelowej wytrzymałości 45 MPa dla wszystkich mieszanek, a 20% zastępowanie naturalnego kruszywa (16) w celu uzyskania wytrzymałości 30 MPa. Prowadzono także doświadczenia przy stosowaniu zastępowania 22 i 100% (11), lub trzy poziomy zastępowania 30, 70 i 90% (14), w przypadkach rozpliwu 35 i 50 mm i wytrzymałości na ściskanie od 25 MPa do 60 MPa zgodnie z normą chińską JTG 55 (2000) i dwa poziomy zastępowania wynoszące 25 i 50% (17), dla klas wytrzymałości C 30/37. Betonowe kostki i walce stosowano w badaniach po 28 dniach (10, 11) i po 56 dniach (12). Badano wytrzymałość na ściskanie, na rozciąganie przy rozłupywaniu i moduł elastyczności (10-12).

### 4. Właściwości kruszywa z recyklingu, wyniki i dyskusja

#### 4.1. Gęstość nasypowa i absorpcja wody

Gęstość nasypowa maleje z liczbą powtórzonych recyklingów (10), w związku z adhezją zaprawy do naturalnych kruszyw (12). Spadek 13,9%, 22,9% oraz 26,3% stwierdzono w przypadku pierwszej generacji. Powtórnie zastosowane kruszywo betonowe [PZK], drugi raz zastosowane [2ZK] i trzeci raz zastosowane [3ZK] w porównaniu z kruszywem naturalnym wykazuje spadek gęstości, w związku z adhezją zaprawy. Otrzymano liniową zależność gęstości nasypowej i kolejnych recyklingów  $y = -134,2 + 1486$  [rys. 1]. Absorpcja wody wzrastała z kolejnymi recyklingami, w związku z adhezją zaprawy do powierzchni kruszywa (12,16). Otrzymano liniową korelację  $W_{24} = 0,1 \cdot V_{\text{przywartej zaprawy}}$  dotyczącą ilości wody, która ulegała adsorpcji i objętości przywartej zaprawy do kruszywa (15). Biorąc pod uwagę wyniki poprzednich doświadczeń (10-14) uzyskano liniową zależność  $y = 2,29x + 2,00$  adsorpcji wody i liczby recyklingów [rys.2].

#### 4.2. Porowatość

W przypadku kruszywa stwierdzono wzrost porowatości wynoszący 12 do 16 razy dla kruszywa betonowego po recyklingu, w porównaniu z naturalnym kruszywem, w związku z adhezją zaprawy, co potwierdziły obserwacje mikroskopowe (13). Porowatość kruszywa betonowego po recyklingu, będącego heterogeniczną mieszaniną, jest 12 do 13% większa w przypadku 50% zastępowania, a 14 do

A general review states that the recycled concrete aggregate from precast concrete rejects (10), higher grade of concrete (14), using jaw or impact crusher (18) subjected to about two generations of recycling (16, 17), can be justified as the better quality compared to other types.

### 3. Physical and Mechanical properties:

The physical properties are tested using classic methods (13) and the minimum required values according to RILEM (8), are verified (14). The mix procedures in the previous studies used European standards (EN) for a target slump value of  $125 \pm 15$  mm (11), limestone aggregate for a design strength class C 30/37 (13), complete replacement of natural aggregate for recycled aggregate (10) to attain a strength of 45 MPa for all the mixes, 20% replacement of natural aggregate (16) to attain a target strength of 30 MPa. The studies are also conducted by considering two replacement percentages of 25 and 100 (11), three replacement percentages of 30%, 70% and 90% (14) for slump values ranging from 35 to 50 mm and compressive strength from 25 MPa to 60 MPa according to Chinese standard JTG 55 (2000) and two replacement percentages of 25 and 50 (17) for a strength class of C 30/37. The concrete cubes and cylinders are tested for 28 days (10, 11) and 56 days (12) of curing. The compressive, split tensile strength and modulus of elasticity of concrete are studied (10-12).

### 4. Results and discussion of recycled aggregate properties

#### 4.1. Bulk density and water absorption

The bulk density decreases with number of repetitions of recycling (10) due to adhered mortar on the surface of natural aggregates (12). A decrease of 13.9%, 22.9% and 26.3% was observed for first generation Recycled Concrete Aggregate [RCA1], second generation Recycled Concrete Aggregate [RCA2] and Third generation Recycled Concrete Aggregate [RCA3] respectively, with respect to natural aggregate due to presence of adhered mortar. A linear relationship of  $y = -134.2x + 1486$  is obtained between bulk density and generations of recycling [Fig 1]. The water absorption showed an increase with generations of recycling due to adhered mortar on the surface of aggregate (12, 16). A linear correlation of  $W_{24} = 0.1 \cdot V_{\text{Adhered Mortar}}$  is attained between water absorption and volume of adhered mortar (15).

Considering the experimental data from previous researches (10-14), a linear relationship of  $y = 2.29x + 2.00$  is obtained between water absorption and generations of recycling [Fig 2].

#### 4.2. Porosity

The porosity was found to be 12 to 16 times higher for recycled concrete aggregate [RCA] compared to natural aggregate due to the presence of adhered mortar as found by microtomography studies (13). Porosity of RAC, which is a heterogenous mix is 12 to

15% większa dla 100% zastępowania naturalnego kruszywa. Porównanie adsorpcji wody, gęstości nasypowej i zawartości pustek w KBR z kruszywem naturalnym (15) podano w tablicy 1.

Gęstość upakowania kruszywa, stosując zmodyfikowany Model Toufara dla naturalnego i z trójkrotnego zastosowania tego kruszywa, podano w tablicy 2.

## 5. Właściwości wielokrotnie stosowanego kruszywa betonowego

### 5.1. Właściwości naturalnego kruszywa

W przypadku betonu opad stożka betonu maleje ze wzrostem liczby wielokrotnego zastosowania, w związku z wilgotnością różnych rodzajów grubego kruszywa, wzrostu szorstkości powierzchni i krawędziowości kruszywa (12, 16). W przypadku wyższych klas macierzystych kruszyw domieszki stosowane w ich przypadku poprawiają właściwości niezwiązanych i po stwardnieniu kruszyw z recyklingu (14).

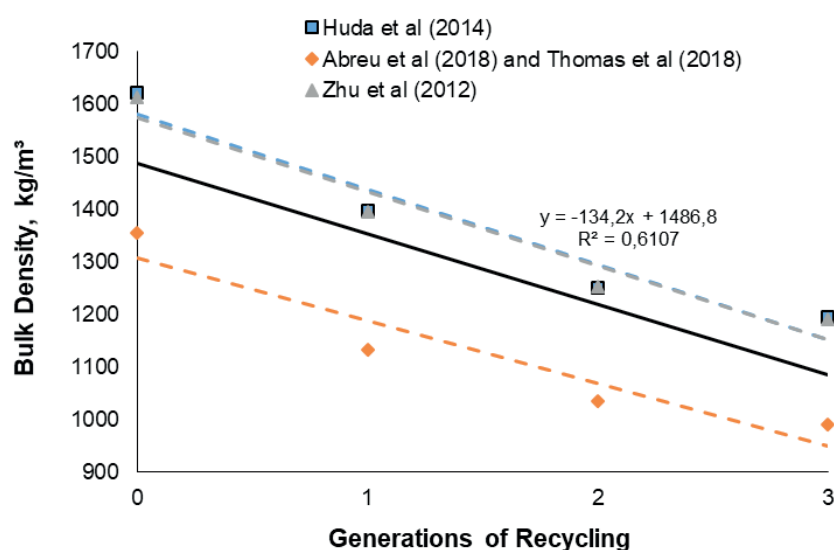
### 5.2. Wytrzymałość

#### 5.2.1. Rozdrabnianie kruszywa, udar, ubytek ścierania

W przypadku kilkakrotnie stosowanego kruszywa betonowego rozdrabnianie, udar i ubytki spowodowane ścieraniem są średnie, wynoszą odpowiednio około 16 do 25%, 15 do 35% i 30 do 40% (21, 22), co jest znacznie większe od naturalnego kruszywa, jednak spełniają wymagania normy IS 383: 2016 (2). Niektóre metody poprawiające ich właściwości, a mianowicie stosowanie czyszczenia ultradźwiękami, ścieranie, pokrywanie powierzchni kruszyw za pomocą dodatków mineralnych, nanomateriały (23), wstępne zwilżanie, obróbka za pomocą CO<sub>2</sub> (24), są proponowane do zastosowania w betonie.

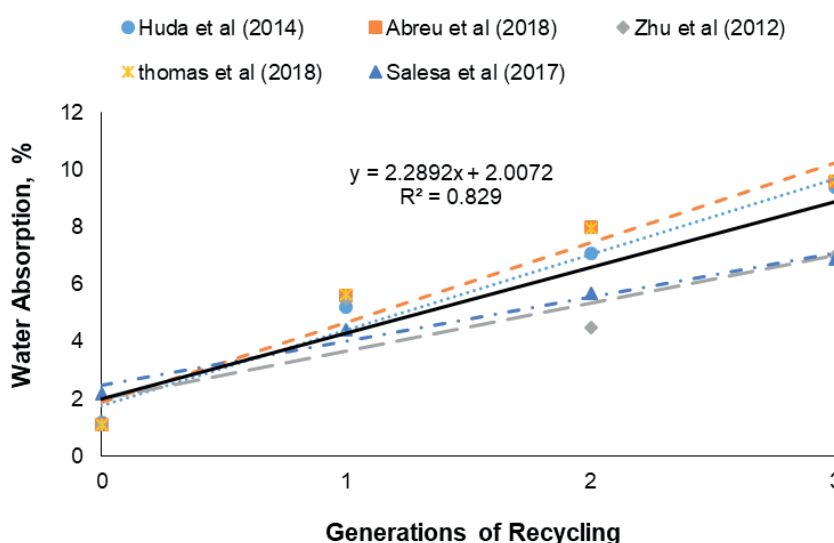
#### 5.2.2. Wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i na zginanie

Jako podsumowanie badań można podać, że wytrzymałość na ścislenie kruszywa po trójkrotnym recyklingu była o 32 do 33% mniejsza od kruszywa naturalnego, o 19 do 20% niższa po pierwszym recyklingu i 21 do 22% po drugim (rys. 3). Jednak, niektóre badania wykazały (16), że wytrzymałość na ścislenie po dwukrotnym recyklingu jest większa niż po pierwszym, w wyniku trwałości macierzystego betonu. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po pierwszym i drugim recyklingu dała 3 do 4% lepsze wyniki niż naturalne kruszywa, w związku z większą absorpcją wody, powodującej mniejszy stosunek w/c w strefie



Rys. 1. Gęstość nasypowa w funkcji materiału z recyklingu

Fig. 1. Bulk density vs generations of recycling



Rys. 2. Absorpcja wody w funkcji materiału z recyklingu

Fig. 2. Percentage water absorption vs generations of recycling

13% higher for 50% replacement, and 14 to 15% higher for 100% replacement than NAC. The water absorption, bulk density and percentage of voids of recycled concrete aggregate compared to natural aggregate (15) is presented in Table 1.

The packing density of aggregates using Modified Toufar Model [MTM] for natural and three generations of recycled concrete aggregates is shown in Table 2.

## 5. Properties of multi-recycled aggregate concrete

### 5.1. Properties of fresh concrete

The slump flow of concrete decreases with increase in the number of generations of recycling due to the moisture state of different types of coarse aggregate, increased surface roughness and angularity of aggregate (12, 16). For higher grades of parent concrete,

Tablica 1 / Table 1

## WŁAŚCIWOŚCI KRUSZYWA BETONOWEGO Z RECYKLINGU

## PROPERTIES OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE

Aggregate Kruszywo	Open porosity Otwarta porowatość, %	Water absorption Absorpcja wody, %	Bulk Density Gęstość nasypowa, kg/m <sup>3</sup>	Percentage of voids Procent pustek, %
NA	16.8	1.09	1355	47.6
RCA1	20.6	5.64	1132	55.2
RCA2	21.0	7.95	1034	59.3
RCA3	13.5	9.64	990	62.7

przejściowej, co zwiększyło wiązanie zaprawy z powierzchnią kruszywa. Krzywa regresji, uzyskana dla wytrzymałości na zginanie w przypadku nieskończonej liczby recyklingów (11), wykazała spadek o 19,4%. Badania wytrzymałości na zginanie wykazały, że jeden recykling i dwa recyklingi miały spadek wynoszący 12% i 8%, w porównaniu do naturalnego kruszywa (16). Wszystkie mieszanki betonowe osiągnęły założoną wytrzymałość, z wyjątkiem próbki po trzykrotnym recyklingu, która nie osiągała docelowych wytrzymałości, nawet po 56 dniach dojrzewania, w związku z licznymi warstwami w strefie przejściowej.

### 5.2.3. Statyczny i dynamiczny moduł elastyczności

Stacyjny moduł elastyczności naturalnego kruszywa betonowego jest o 11 i 12% większy od kruszywa betonowego po pierwszym i drugim recyklingu, a o 17 i 18% większy od tego po trzecim recyklingu. Dynamiczny moduł elastyczności naturalnego kruszywa betonowego jest o 4 do 5% większy niż kruszywa po recyklingu, o 8 do 9% większy od kruszywa po drugim recyklingu i 16 do 17% większy od kruszywa po trzecim recyklingu (10), z powodu mniejszej sztywności kruszywa z recyklingu, spowodowanej przyczepioną zaprawą, powodującej większą odkształcalność i zmniejszenie sztywności betonu.

### 5.3. Trwałość

Trwałość kruszywa betonowego po recyklingu zależy od szeregu właściwości, które zostaną opisane w następnych punktach.

the admixtures used in concrete improve the fresh and hardened state properties of generations of recycled aggregate concrete (14).

## 5.2. Strength

### 5.2.1. Aggregate crushing, impact value and abrasion loss

In the case of recycled concrete aggregate, the crushing value, impact value and abrasion loss, on an average are about 16 to 25% ,15 to 35% and 30 to 40% (21, 22) respectively, which is very much lower compared to natural aggregate, but satisfied the limitation of IS 383: 2016 (2). Some of the improvement methods like ultra-sonic cleaning method, abrasion, surface coating of the aggregates using mineral admixtures, nano-materials (23), pre-wetting, CO<sub>2</sub> treatment (24) are suggested before using the same in concrete for beneficial effects.

### 5.2.2. Compressive, splitting tensile and flexural strength

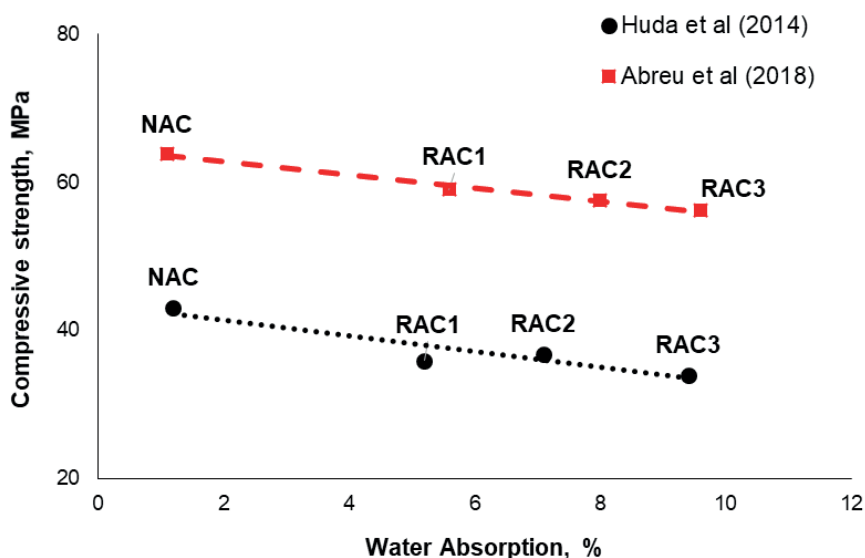
From the summary of the studies, the compressive strength of RAC3 showed a 32 to 33% decrease than NAC, 19 to 20% lower than RAC1 and 21 to 22% lesser than RAC2 [Fig 3]. However, some of the studies (16) showed that the compressive strength of RAC2 is greater than that of RAC1, due to stability of parent concrete. Splitting tensile strength of RAC1 and RAC2 achieved 3 to 4 % higher values than NAC due to higher water absorption causing a low w/c ratio at ITZ, thereby, improving the effective bond between the attached mortar and the aggregate surface. A regression curve was attained for tensile strength for an infinite number of recycling cycles (11), which showed a performance loss of 19.4% for indefinite number of recycling operations. The

Tablica 2 / Table 2

## PODZIAŁ NATURALNEGO KRUSZYWA I TRZY GENERACJE KRUSZYWA Z RECYKLINGU

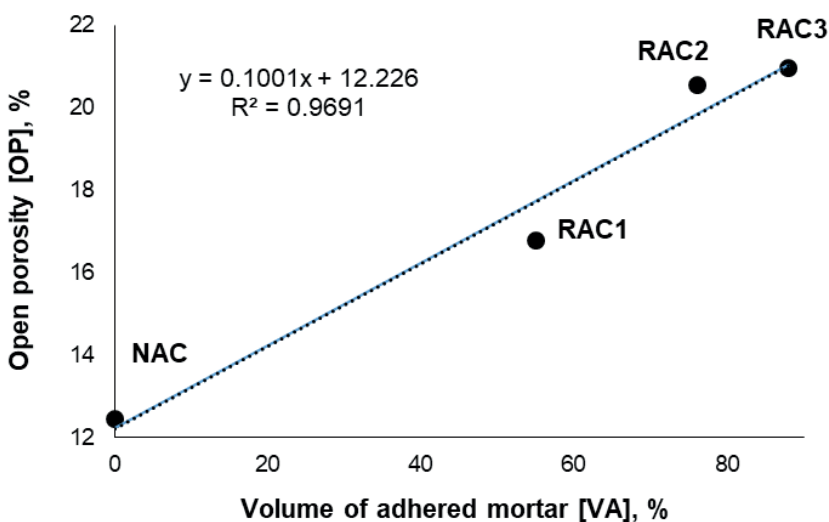
## GRADATION OF NATURAL AGGREGATE AND THREE GENERATIONS OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE

NA / Naturalne kruszywo	20-16	16-12.5	12.5-10	10-4.75	4.75-2.36	2.36-1.18	1.18-0.6	0.6-0.15
Proportions	0.114	0.049	0.070	0.099	0.179	0.170	0.170	0.150
PD / Gęstość upakowania	0.809							
RCA1/ Po pierwszym recyklingu	0.092	0.039	0.070	0.108	0.167	0.204	0.170	0.150
PD / Gęstość upakowania	0.740							
RCA2	0.086	0.037	0.070	0.108	0.167	0.204	0.170	0.150
PD / Gęstość upakowania	0.724							
RCA3	0.092	0.039	0.070	0.108	0.167	0.204	0.170	0.150
PD / Gęstość upakowania	0.735							



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji absorpcji wody (11, 12)

Fig. 3. Compressive strength vs water absorption (11, 12)



Rys. 4. Porowatość otwarta i objętość przyczepionej

Fig. 4. Open porosity vs volume of adhered mortar

### 5.3.1. Otwarta porowatość i sorpcyjność

Porowatość betonu uległa zwiększeniu o 16,8%, 20,6% i 21,0% dla betonów z kruszywem odpowiednio po jednym, dwóch i trzech recyklingach, w porównaniu z kruszywem naturalnym (15), w związku ze zwiększeniem objętości przyczepionej zaprawy, spowodowanej recyklingiem betonu. Otrzymano liniową zależność otwartej porowatości [OP] z objętością przyczepionej zaprawy [V<sub>A</sub>]  $OP = 12,23 + 0,1 \cdot V_A$  – rysunek 4. Dla betonu z recyklingu, ze 100% zastąpieniem naturalnego kruszywa była ona 8 do 40% większa niż w przypadku naturalnego kruszywa (26). Sorpcyjność betonu z kruszywem z recyklingu z budowli kamiennej jest 62 do 70% większa niż naturalnego kruszywa. Zależność sorpcyjności od wytrzymałości betonu z kruszywem z recyklingu oznaczono dla różnych jego krotkości [rysunek 5].

flexural strength showed that RAC1 and RAC2 showed a decrease of 12% and 8% in strength compared to NAC (16). All the concrete mixes were able to attain the target strength except RAC3 which did not attain the target strength even after 56 days curing, due to the presence of multiple layers in the ITZ.

### 5.2.3. Static and dynamic modulus of elasticity

The static modulus of elasticity of NAC is 11 to 12% higher than RAC1 and RAC2 and 17 to 18% higher than that of RAC3. The dynamic modulus of elasticity of NAC is 4 to 5% higher than that of RAC1, 8 to 9% higher than that of RAC2 and 16 to 17% higher than that of RAC3 (10), due to lower rigidity of RAC because of adhered mortar, causing a greater deformability and decrease in the stiffness of concrete.

## 5.3. Durability

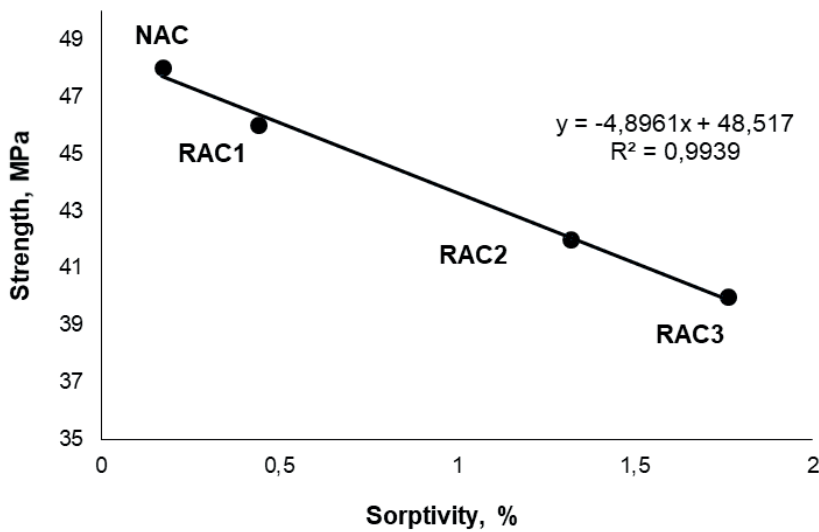
Durability of recycled aggregate concrete depends on several properties as described in following sectors.

### 5.3.1. Open porosity and sorptivity

Porosity of concrete showed 16.8%, 20.6% and 21.0% higher values for RAC1, RAC2 and RAC3 for 100% replacement compared to NAC (15), due to increase in volume of adhered mortar with generations of recycling the concrete. A linear relation of  $OP = 12.23 + 0.1 V_A$  between open porosity [OP] and volume of adhered mortar [V<sub>A</sub>] was obtained [Fig 4]. For Recycled Concrete with 100% replacement of natural aggregate, it was 8 to 40% higher than NAC (26). The sorptivity of recycled masonry aggregate concrete [RMAC] is 62 to 70% higher than that of NAC. Relationship between sorptivity and strength of recycled aggregate concrete was obtained for different generations of recycling [Fig 5].

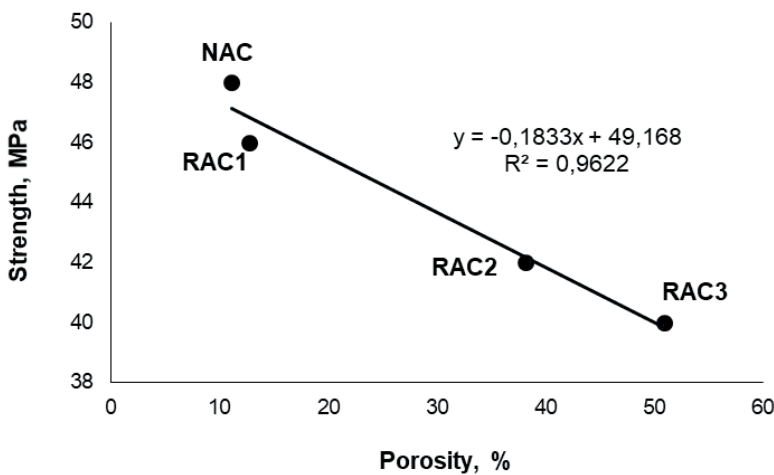
### 5.3.2. Chloride permeability

Chloride permeability was 35% and 23% higher than NAC for dry and wet curing respectively. The RAC with 100% replacement has 0.5 times higher permeability than that of NAC (26) due to porosity and inter connectivity of voids, present in concrete. The recycled concrete aggregate may contain high chloride content due to adhered mortar or due to proximity to chloride enriched environment. A relationship between porosity and chloride permeability, with strength of recycled aggregate concrete was obtained for different generations of recycling [Figs. 6 and 7 respectively].



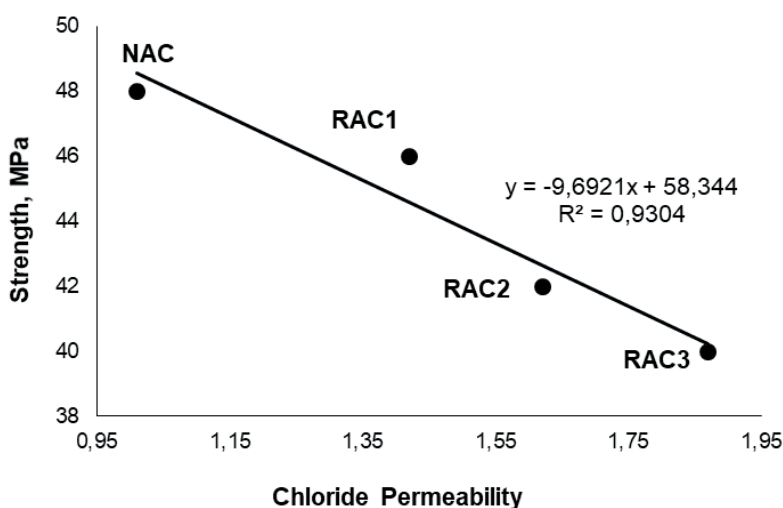
Rys. 5. Wytrzymałość zaprawy w funkcji sorpcyjności

Fig. 5. Strength vs sorptivity



Rys. 6. Wytrzymałość w funkcji porowatości

Fig. 6. Strength vs. porosity



Rys. 7. Wytrzymałość i przepuszczalność Cl

Fig. 7. Strength vs chloride permeability

### 5.3.3. Corrosion resistance

The recycled aggregate may be previously contaminated with chlorides, which accelerates the process of corrosion. For RAC considered over 50 years of life span, the corrosion induced cracks are about 32%, whereas for NAC, the corrosion induced cracks are only about 13% (27).

### 5.3.4. Sulphate attack and acid attack

The loss of strength in RAC due to sulphate attack is 2.4% for 28 days of exposure, 3.93% for 56 days of exposure, 5.13% for 90 days of exposure, 6.40% for 120 days of exposure, 8.45% for 150 days of exposure and 9.2% for 180 days of exposure with respect to normal water curing conditions (28). The loss of strength due to acid attack for RAC is 3.13% for a 28 days of exposure, 6.81% for 56 days of exposure, 9.13% for 90 days of exposure, 11.87% for 120 days of exposure, 15.34% for 150 days of exposure, 16.54% for 180 days of exposure with respect to normal water curing conditions (28). The variation of percentage strength loss due to sulphate attack and acid attack with strength loss for recycled aggregate concrete was obtained [Figs. 8 and 9 respectively].

### 5.3.5. Volume of adhered mortar

The volume of adhered mortar was 55%, 76% and 88% of aggregate volume for RCA1, RCA2 and RCA3 respectively (13) and it is reduced for higher grades of concrete and for concrete from precast rejects (10). RCA2 has 22.6% higher mortar content than RCA1 but it can still be used for structural concrete (29), and the adhered mortar is permitted up to 44%. The relationship between the volume of adhered mortar and strength for different generations of recycled concrete aggregate was obtained (Fig 10).

Similarly, the relationship between influence of shrinkage of various generations of recycled aggregate concrete and carbonation depth with strength of concrete, was obtained [Figs. 11, 12].

## 5.4. Cracks propagation

The size of fissures in the Interfacial Transition Zone [ITZ] during shrinkage of concrete, measured using micro tomography (13) for RAC1 was 3  $\mu\text{m}$ , for RAC2 4.5  $\mu\text{m}$  and for RAC3 it was 3.5  $\mu\text{m}$ , for 100% replacement of recycled aggregate. Fissures in first phase of recycling do not appear in the second phase of recycling because the crushing operation takes place through the weaker portion of aggregate, through these fissures.

### 5.3.2. Przepuszczalność chloru

Przepuszczalność chloru była o 35% i 23% większa niż dla naturalnego kruszywa, odpowiednio w przypadku suchego i mokrego dojrzewania betonu. Kruszywo z recyklingu, w przypadku 100% zastąpienia naturalnego, ma o połowę większą przepuszczalność niż kruszywo naturalne (26), z powodu porowatości i połączeń pustek, występujących w betonie. Kruszywo betonowe z recyklingu może zawierać dużo chloru albo w przyczepioną zaprawę lub z bliskością wzbogaconego w chlor otoczenia. Zależność przepuszczalności chloru i porowatości z wytrzymałością kruszywa betonowego z recyklingu, zbadano dla różnych jego krotności [odpowiednio rysunki 6 i 7].

### 5.3.3. Odporność na korozję

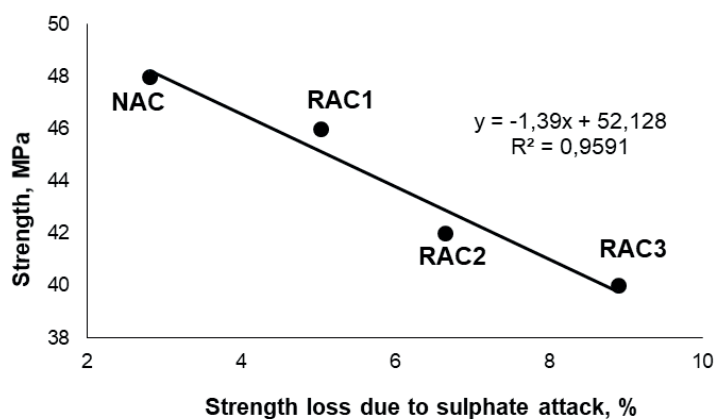
Kruszywo powtórnie stosowane może być wcześniej zanieczyszczone chlorkami, co przyspiesza proces korozji. W przypadku powtórnie zastosowanego kruszywa do betonu, któremu można z dużym prawdopodobieństwem przypisać ponad 50 lat eksploatacji, pęknięcia wywołane korozją występują u około 32%, natomiast dla naturalnego kruszywa betonowego korozją wywołane spękania stanowią tylko około 13% (27).

### 5.3.4. Korozja siarczanowa i kwasowa

Spadek wytrzymałości betonu dla powtórnie zastosowanego kruszywa, spowodowany korozją siarczanową wynosi 2,4% w przypadku tego działania przez 28 dni, a 3,93% po 56 dniach, 5,13% po 90 dniach, 6,40% po 120 dniach, 8,45 po 150 dniach i 9,2% po 180 dniach, w stosunku do normalnego dojrzewania w wodzie (28). Spadek wytrzymałości spowodowany korozją kwasową kruszywa w betonowego z recyklingu wynosi 3,13% po 28 dniach działania, 6,81% po 56 dniach, 9,13% po 90 dniach, 11,87% po 120 dniach, 15,34% po 150 dniach, 16,54% po 180 dniach, w stosunku do normalnego dojrzewania tego betonu w wodzie (28). Zmiany w procentowym spadku wytrzymałości spowodowanej korozją siarczanową i kwasową, dotyczą kruszywa betonowego z recyklingu [rys. 8 i 9].

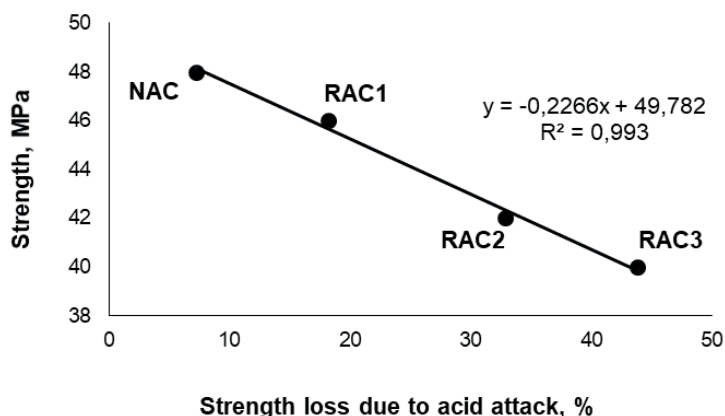
### 5.3.5. Objętość przyczepionej zaprawy

Objętości przyczepionej zaprawy wynosiły odpowiednio 55%, 76% i 88% objętości kruszywa dla betonu po pierwszym, drugim i trzecim recyklingu (13) i ulega zmniejszeniu dla wyższych klas betonu oraz w przypadku betonu odrzuconego w prefabrykacji (10). Kruszywo z drugiego recyklingu miało większą zawartość zaprawy o 22,6% od kruszywa z pierwszego recyklingu, jednak mogło być dalej stosowane w betonie do budownictwa (29), a przyczepiona zaprawa była dopuszczalna do 44%. Zbadano zależność objętości przyczepionej zaprawy i wytrzymałości dla różnych krotności recyklingu kruszywa [rys. 10].



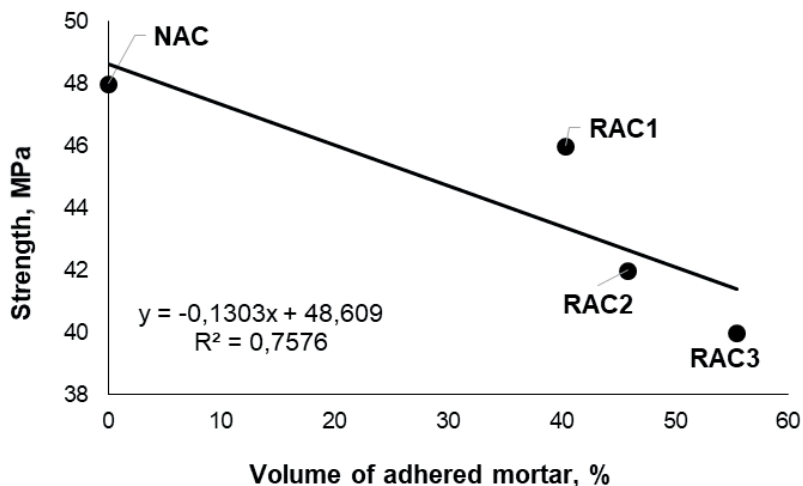
Rys. 8. Wytrzymałość i spadek wytrzymałości spowodowany korozją siarczanową

Fig. 8. Strength vs. percentage strength loss due to sulphate attack



Rys. 9. Wytrzymałość i spadek wytrzymałości spowodowane korozją kwasową

Fig. 9. Strength vs. percentage of strength loss due to the acid attack



Rys. 10. Wpływ objętości przyczepionej zaprawy na wytrzymałość

Fig. 10. Volume of adhered mortar vs. strength

Based on the relationships between various agencies of durability with the strength, a multi-linear regression model is obtained for these parameters for different generations of recycling. Accordingly, the variation in strength with respect to these parameters is given by Equation 1.



Podobnie, zbadano zależność wpływu skurczu betonu z kruszywem po różnej krotności recyklingu i głębokości karbonatyzacji na wytrzymałość betonu – rys. 11 i 12.

#### 5.4. Propagacja pęknięć

Propagacja szczelin w strefie przejściowej w trakcie skurczu betonu, mierzona za pomocą mikrotomografii (13), w przypadku pierwszego recyklingu kruszywa wyniosła 3  $\mu\text{m}$ , dla drugiego 4,5  $\mu\text{m}$ , a dla trzeciego 3,5  $\mu\text{m}$ , w przypadku stuprocentowo zastąpionego kruszywa z recyklingu. Szczeliny w pierwszej fazie recyklingu nie wystąpiły w drugiej, ponieważ operacja kruszenia objęła słabszą część kruszywa, biegnąc tymi szczelinami.

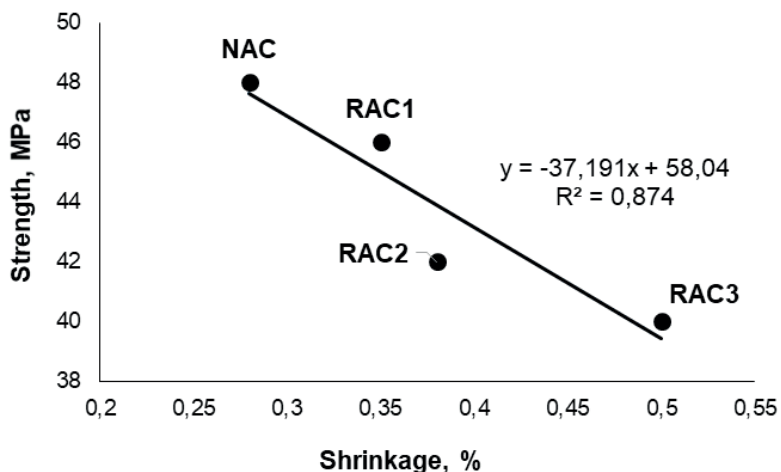
Opierając się na zależnościach różnych związków trwałości z wytrzymałością otrzymano model liniowej zależności regresyjnej z wieloma zmiennymi, dla różnych krotności recyklingu. Zgodnie z tym, zmiany wytrzymałości w zależności od tych parametrów przedstawia równanie 1.

$$S = 51.594 - 0.856 (S_p) - 0.036 (AA) - 0.463 (SA) - 1.436 (CP) - 0.037 (P) \quad [1]$$

gdzie  $S_p$  oznacza sorpcyjność  $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$ , AA oznacza spadek wytrzymałości w %, spowodowanej korozją kwasową, SA oznacza spadek wytrzymałości w % spowodowanej korozją siarczanową, CP oznacza przepuszczalność chloru w  $\text{m}^2/\text{s}$ , a P procent porowatości.

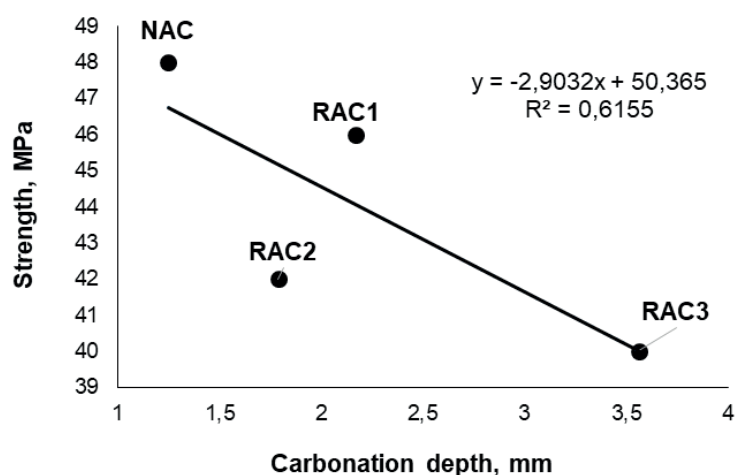
#### 6. Wnioski

1. Badania kruszywa do betonu po wielokrotnym recyklingu zyskuje na znaczeniu gdyż są ważne ekologicznie i stwierdzono, że jego właściwości maleją z krotnością recyklingu.
2. Gęstość nasypowa kruszywa po jednokrotnym, dwukrotnym i trzykrotnym recyklingu jest o 13,9%, 22,9% i 26,3% niższa w porównaniu do naturalnego kruszywa. Absorpcja wody jest wprost proporcjonalna do objętości zaprawy, która uległa adhezji. Porowatość kruszywa po recyklingu jest 14 do 15% większa niż naturalnego kruszywa.
3. Właściwości betonu z recyklingu przed i po stwardnieniu zależą od jakości stosowanego betonu. Gdy zastąpienie kruszywa z recyklingu wynosiło 20%, opad stożka zmniejsza się odpowiednio o 30 i 20% dla kruszywa po pierwszym i po drugim recyklingu, w związku z różną absorpcją i nieregularnością kruszywa.
4. Wytrzymałość na ściskanie kruszywa po trzecim recyklingu jest mniejsza o 33% od naturalnego kruszywa, po drugim o 22%, a po pierwszym o 20%. Niektóre badania dają przeciwstawne wyniki, na przykład kruszywo po drugim recyklingu miało większą wytrzymałość niż po pierwszym.



Rys. 11. Wytrzymałość w funkcji skurczu

Fig. 11. Strength vs. shrinkage



Rys. 12. Wytrzymałość i głębokość karbonatyzacji

Fig. 12. Strength vs. carbonation depth

$$S = 51.594 - 0.856 (S_p) - 0.036 (AA) - 0.463 (SA) - 1.436 (CP) - 0.037 (P) \quad [1]$$

where,  $S_p$  indicates sorptivity in  $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ , AA indicates percentage loss of strength due to acid attack, SA indicates percentage loss of strength due to sulphate attack, CP indicates chloride permeability in  $\text{m}^2/\text{s}$  and P indicates percentage of porosity.

#### 6. Conclusions

1. Research on Multi-Recycled Aggregate Concrete gains importance in view of sustainability, and it was observed that the properties reduce with generations of recycling.
2. The bulk density of RAC1, RAC2 and RAC3 are 13.9%, 22.9% and 26.3% lower respectively compared to Natural Aggregate. The water absorption is directly proportional to the volume of adhered mortar, porosity of RAC is 14 to 15% higher than Natural Aggregate.

5. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu z kruszywem po pierwszym i po drugim recyklingu jest o 3 i 4% większa od naturalnego kruszywa, w związku ze wzmocnieniem efektywnego wiązania kruszywa z przyczepioną warstwą zaprawy. Wytrzymałość na zginanie po pierwszym i drugim recyklingu jest odpowiednio mniejsza o 12 i 8% od naturalnego kruszywa.
6. W oparciu o liniową analizę zależności regresyjnej z wieloma zmiennymi, znaleziono związek wytrzymałości na ściskanie z parametrami wpływającymi na trwałość. Wyraża się ona takim równaniem:
 
$$S = - 0,856 (S_p) - 0,036 (AA) - 0,463 (SA) - 1,436 (CP) - 0,037 (P) + 51,6$$

## Literatura / References

1. Guidelines on Environmental Management of C&D Waste Management in India (2015).
  2. IS 383:2016, Indian Standard Specification for Coarse and Fine Aggregates for concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
  3. ACI CRC 18.517, Guideline Development for Use of Recycled Concrete Aggregates in New Concrete. November 4 (2019).
  4. RILEM, Specifications for concrete with recycled aggregates. Mater. Struct. **27**, 557 – 559 (1994).
  5. FHWA, Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate. FHWA State of the Practice National Review September 2004.
  6. LEED v4 for Building Design and Construction, U.S Green building council. (2019)
  7. Closing the loop: What type of concrete re-use is the most sustainable option? A Technical Report A-2015/1860, European Cement Research Academy (2015).
  8. Standard Practice for Reclamation of Recycled Aggregate Base (RAB) Material (2016).
  9. A. Salesa, J.A. Perez-Benedicto, D. Colorado-Aranguren, P. LLopez-Julian, L.M. Esteban, L.J. Sanz-Balduz, J.L. Saez-Hostaled, J. Ramis, D. Olivares, Physio-mechanical properties of multi-recycled concrete from precast concrete industry. J. Clean. Prod. **141**, 248-255, (2017).
  10. A. Salesa, J.A. Perez-Benedicto, L.M. Esteban, R. Vicente-Vas, M. Orna-Carmona, Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. Constr. Build. Mater. **153**, 364-373, (2017).
  11. V. Abreu, L. Evangelista, J. De Brito, The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. Constr. Build. Mater. **188**, 480-489 (2018).
  12. S.B. Huda, and M.S. Alam, Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. Constr. Build. Mater. **65**, 574-582 (2014).
  13. C. Thomas, J. De Brito, V. Gil, J.A. Sainz-Aja, A. Cimentada, Multiple recycled aggregate properties analysed by X-ray microtomography. Constr. Build. Mater. **166**, 171-180 (2018).
  14. P.H. Zhu, X.J. Wang, and J.C. Feng, On properties of recycled coarse aggregate from repeatedly recycling waste concrete. Adv. Mater. Res. **368**, 2185-2188 (2012).
  15. C. Thomas, J. de Brito, A.I.A.I. Cimentada, J.A. Sainz-Aja, Macro-and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete. J. Clean. Prod. **245**, 118843 (2020).
3. The fresh and hardened properties of recycled concrete depend on the quality of parent concrete. When the replacement percentage of Recycled Aggregate was 20%, the slump flow decreased by 30% and 12% for RCA1 and RCA2 respectively, due to difference in absorption and irregularity of aggregate.
  4. The compressive strength of RCA3 is 33% lower than NAC, 20% lower than RAC1 and 22% lower than RAC2. This is contradicted by some studies, where RAC2 showed higher strength than RAC1.
  5. The splitting tensile strength of RAC1 and RAC2 is 3 to 4% higher than NAC, due to improvement in the effective bond between the aggregate and attached mortar layer. The flexural strength of RAC1 and RAC2 is 12% and 8% lower respectively compared to NAC.
  6. Based on the multi linear regression analysis a relationship between the compressive strength and parameters influencing durability is determined. The relationship is as follows:
 
$$S = - 0.856 (S_p) - 0.036 (AA) - 0.463 (SA) - 1.436 (CP) - 0.037 (P) + 51.6$$

16. I. Marie, H. Quiasrawi, Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *J. Clean. Prod.* **37**, 243-248, (2012).
17. M. Abed, R. Nemes, Reused Recycled Aggregate Concrete (RRAC). *Int. Federation for Structural Concrete 5<sup>th</sup> International fib Congress*, Melbourne, Australia, (2018).
18. C. Ulsen, E. Tseng, S.C. Angulo, M. Landmann, R. Contessotto, J.T. Balbo, H. Kahn, Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. *J. Mater. Res. Techn.* **8**(1), 494-502, (2019).
19. P. Zhu, Y. Hao, H. Liu, D. Wei, S. Liu, L. Gu, Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **210**, 442-450, (2019).
20. Q. Huang, L. Lin, E.L. Tan, B. Singh, Mix Design of Recycled Aggregate Concrete Using Packing Density Method. *Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Struct. Eng. Res.* 20-22 November 2017, Sydney, Australia, 49-55, (2017).
21. R. Siempu, R.K. Pancharthi, Bond characteristics of concrete made of recycled aggregates from building demolition waste. *Mag. Concr. Res.* **69**(13), 665-682 (2017).
22. A. Bashir, C. Gupta, M.A. Abubakar, S.I. Abba. Comparison of Properties of Coarse Aggregate Obtained from Recycled Concrete with that of Conventional Coarse Aggregates. *Eur. J. Adv. Eng. Techn.* **5**(8), 628-637 (2018).
23. H. Zhang, Y. Zhao, T. Meng, S.P. Shah. Surface treatment on recycled coarse aggregates with nanomaterials. *J. Mater. Civ. Eng.* **28**(2), 04015094 (2016).
24. D. Xuan, B. Zhan, C.S. Poon, Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Comp.* **65**, 67-74 (2016).
25. J. García-González, D. Rodríguez-Robles, A. Juan-Valdés, J.M. Morán-del Pozo, M.I. Guerra-Romero, Porosity and pore size distribution in recycled concrete. *Mag. Concr. Res.* **67**(22), 1214-1221, (2015).
26. F.U.A. Shaikh, H.L. Nguyen, Properties of concrete containing recycled construction and demolition wastes as coarse aggregates. *J. Sust. Cem. Bas. Mater.* **2**(3-4), 204-217, (2013).
27. W.V. Srubar III, Stochastic service-life modelling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete. *Cem. Concr. Comp.* **55**, 103-111 (2015).
28. G.S. Krishna Kanth, S. Ashok Kumar, Durability Studies on Recycled Coarse Aggregate Concrete of Grade M40. *Int. Res. J. Eng. Techn.* **4**(5), 2173-2177 (2017).
29. M.S. De Juan, P.A. Gutierrez, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* **23**(2), 872-877 (2009).