



# Wydział Inżynierii Lądowej

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

## MATERIAŁY BUDOWLANE

ĆWICZENIA LABORATORYJNE

## Kompozycja kruszywa do betonu zwykłego

Autorzy:

dr inż. Joanna Sokołowska

dr inż. Kamil Załęgowski

## Spis treści

1. Cel ćwiczenia .....	3
2. Podstawowe informacje.....	3
2.1. Definicje.....	3
2.2. Wprowadzenie .....	3
3. Oznaczenia do wykonania: .....	4
3.1. Dobór uziarnienia metoda kolejnych przybliżeń (iteracji).....	4
3.1.1. Materiały i wyposażenie do użycia .....	4
3.1.2. Wykonanie oznaczenia .....	4
3.1.3. Opracowanie i ocena wyników badań.....	8
3.2. Dobór uziarnienia kruszywa na podstawie krzywych normowych....	Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.
4. Sprawozdanie z ćwiczenia.....	9
5. Zalecana literatura uzupełniająca do tematu .....	10

# 1. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z dwoma metodami doboru kruszywa do betonu zwykłego:

- empiryczna metoda kolejnych przybliżeń (iteracji),
- dobór kruszywa na podstawie normowych krzywych uziarnienia.

# 2. Podstawowe informacje

## 2.1. Definicje

- **Kruszywo** – ziarnisty materiał stosowany w budownictwie; kruszywo może być naturalne, sztuczne lub z recyklingu.
- **Punkt piaskowy** – udział frakcji piaskowej (frakcji  $0 \div 2$  mm) w sumarycznej masie kruszywa.
- **Jamistość kruszywa** – objętość jam międzyziarnowych w jednostce masy kruszywa.
- **Wodożądność kruszywa** – ilość wody dodawana do 1 kg kruszywa w celu uzyskania mieszanki betonowej o określonej konsystencji.

## 2.2. Wprowadzenie

Wyznaczenie kompozycji kruszywa do betonu zwykłego metodą kolejnych przybliżeń (zwana też metodą iteracji) należy wykonać w serii kilku doświadczeń – tyle, ile jest planowanych frakcji w mieszance kruszywa. W ramach każdej serii wyznacza się optymalną proporcję pomiędzy kolejnymi (coraz drobniejszymi) frakcjami kruszywa. Mieszanka optymalna charakteryzuje się maksymalną wartością gęstości nasypowej w stanie utrzesionym oraz minimalną sumaryczną wartością jamistości i wodożądności. Gęstość nasypową w stanie utrzesionym (zagęszczonym) kruszywa oblicza się według wzoru 1. Jamistość kruszywa oblicza się według wzoru 2. Wodożądność kruszywa oblicza się według wzoru 3 z zastosowaniem odpowiednich wskaźników wodożądności poszczególnych frakcji kruszywa dla wskazanej konsystencji mieszanki betonowej (prowadzący udostępni studentom dodatkowe dane odnośnie uziarnienia piasku konieczne do policzenia wodożądności kruszywa w iteracji 3).

$$\rho_{nu} = \frac{m}{V} \quad [\text{kg}/\text{dm}^3] \quad (1)$$

gdzie:  $\rho_{nu}$  – gęstość nasypowa w stanie utrzesionym kruszywa  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}\right]$ ,  $m$  – masa kruszywa [kg],  $V$  – objętość kruszywa po zagęszczeniu  $[\text{dm}^3]$ .

$$j_k = \left[ \frac{\rho - \rho_{nu}}{\rho} \right] * \frac{1}{\rho_{nu}} \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (2)$$

gdzie:  $j_k$  – jamistość kruszywa  $\left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$ ,  $\rho$  – gęstość kruszywa  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$ ,  $\rho_{nu}$  – gęstość nasypowa w stanie utrzęzionym kruszywa  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$ .

Uwaga: do obliczeń jamistości kruszywa żwirowego i piaskowego jako gęstość kruszywa należy przyjąć gęstość kwarcu, która wynosi 2,650 kg/dm<sup>3</sup>.

$$w_k = \frac{\sum n_i w_i}{100} \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (3)$$

gdzie:  $\rho_{nu}$  – gęstość nasypowa w stanie utrzęzionym (zagęszczonym)  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$ ,  $n_i$  – procentowa zawartość poszczególnych frakcji kruszywa [%],  $w_i$  – wskaźnik wodożądności poszczególnych frakcji kruszywa dla określonej konsystencji mieszanki betonowej  $\left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$ .

Kompozycję kruszywa wyznaczoną metodą kolejnych przybliżeń należy przedstawić w postaci krzywej uziarnienia (skumulowana częstość względna), którą należy porównać do odpowiednich (należy zwrócić uwagę na maksymalny wymiar kruszywa w mieszance) krzywych granicznych zalecanych w normie.

### 3. Oznaczenia do wykonania:

#### 3.1. Dobór uziarnienia metoda kolejnych przybliżeń (iteracji)

##### 3.1.1. Materiały i wyposażenie do użycia

- kruszywo żwirowe w 3 frakcjach (frakcje: 2/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm),
- kruszywo piaskowe (frakcja 0/2 mm),
- waga o dokładności do 0,01 kg,
- objętościomierz metalowy o pojemności 10 dm<sup>3</sup>,
- stolik wibracyjny.

##### 3.1.2. Wykonanie doboru uziarnienia metodą kolejnych przybliżeń

Oznaczenie polega na wykonu 4 iteracji doświadczeń – opisy procedury postępowania na etapie każdej iteracji zamieszczono w dalszej części instrukcji.

**ITERACJA 1 – ustalenie proporcji optymalnej pomiędzy frakcjami żwiru:  
frakcji 4/8 mm oraz 8/16 mm**

Do pomiaru przyjęć stała masę żwiru frakcji 8/16 mm w ilości 5,00 kg. Żwir frakcji 4/8 mm należy dosypywać do mieszanki w coraz większych ilościach (ilości podano w tab.1). Objętość mieszanki należy określić doświadczalnie w objętościomierzu metalowym o pojemności 10 dm<sup>3</sup> po zagęszczeniu mieszanki kruszywa na stoliku wibracyjnym w czasie 10 sekund. Gęstość nasypową w stanie zagęszczonym mieszanki należy obliczyć na podstawie wzoru 1.

*Tab.1. Wyniki uzyskane w 1 serii doświadczenia – ustalenie optymalnego składu mieszanki kruszywa żwirowego: frakcji 4/8 mm oraz 8/16 mm*

Nr mieszanki	1	2	3	4	5	6	7
Frakcja 8/16 mm – udział procentowy w mieszance [%]	70	65	60	55	50	45	40
Frakcja 4/8 mm – udział procentowy w mieszance [%]	30	35	40	45	50	55	60
Frakcja 8/16 mm – masa [kg]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Frakcja 4/8 mm – masa [kg]	2,14	2,69	3,35	4,09	5,00	6,10	7,50
Masa mieszanki [kg]							
Objętość mieszanki [dm <sup>3</sup> ]							
Gęstość nasypowa mieszanki w stanie utrzesionym, $\rho_{nu} \left[ \frac{kg}{dm^3} \right]$							
Jamistość mieszanki, $j_k \left[ \frac{dm^3}{kg} \right]$							
Wodożądność mieszanki, $w_k \left[ \frac{dm^3}{kg} \right]$							
Jamistość + wodożądność mieszanki, $j_k + w_k \left[ \frac{dm^3}{kg} \right]$							

Wniosek: Maksymalna gęstość nasypowa w stanie utrzesionym została uzyskana w przypadku mieszanki zawierającej (masowo):

.....% frakcji 4/8 mm,

.....% frakcji 8/16 mm.

Gęstość wyniosła .....

Tę mieszankę uznano za optymalną w tej iteracji.

**ITERACJA 2 – ustalenie proporcji optymalnej pomiędzy frakcjami żwiru:  
frakcji 2/4 mm oraz 4/16 mm (4/8 mm + 8/16 mm)**

Na tym etapie mieszankę frakcji 4/8 mm i 8/16 mm w proporcji ustalonej w iteracji 1 traktujemy wirtualnie jako jeden komponent – zoptymalizowaną frakcję 4/16 mm. Do pomiaru przyjęć stała masę żwiru zoptymalizowanej frakcji 4/16 mm w ilości 5,00 kg, składającej się ze:

- żwiru frakcji 4/8 mm w ilości .....kg,
- żwiru frakcji 8/16 mm w ilości .....kg.

Żwir frakcji 2/4 mm należy dosypywać do mieszanki w ilościach podanych w tab.2. Objętość mieszanki należy określić doświadczalnie w objętościomierzu metalowym o pojemności 10 dm<sup>3</sup> po zagęszczeniu mieszanki kruszywa na stoliku wibracyjnym w czasie 10 sekund. Gęstość nasypową w stanie zagęszczonym mieszanki należy obliczyć na podstawie wzoru 2.1.

*Tab.2. Wyniki uzyskane w iteracji 2 doświadczenia – ustalenie optymalnego składu mieszanki kruszywa żwirowego: frakcji 2/4 mm oraz 4/16 mm*

Nr mieszanki	1	2	3	4	5	6
Frakcja 4/16 mm – udział procentowy w mieszance [%]	90	85	80	75	70	65
Frakcja 2/4 mm – udział procentowy w mieszance [%]	10	15	20	25	30	35
Frakcja 4/16 mm – masa [kg]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Frakcja 2/4 mm – masa [kg]	0,55	0,88	1,25	1,67	2,14	2,69
Masa mieszanki [kg]						
Objętość mieszanki [dm <sup>3</sup> ]						
Gęstość nasypowa mieszanki w stanie utrzesionym, $\rho_{nu} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$						
Jamistość mieszanki, $j_k \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$						
Wodożądność mieszanki, $w_k \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$						
Jamistość + wodożądność mieszanki, $j_k + w_k \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$						

Wniosek: Maksymalna gęstość nasypowa w stanie utrzesionym została uzyskana w przypadku mieszanki zawierającej (masowo):

.....% frakcji 2/4 mm, .....% frakcji 4/8 mm i .....% frakcji 8/16 mm.

Gęstość wyniosła ..... . Tę mieszankę uznano za optymalną w tej iteracji.

**ITERACJA 3 – ustalenie proporcji optymalnej pomiędzy frakcjami piasku i żwiru:  
frakcji 0/2 mm oraz 2/16 mm.**

Na tym etapie ustalamy optymalny punkt piaskowy mieszanki kruszywa do betonu. Do pomiaru przyjęć stała masę żwiru zoptymalizowanej frakcji 2 ÷ 16 mm w ilości 5,00 kg, składającej się ze:

- żwiru frakcji 2/4 mm w ilości .....kg,
- żwiru frakcji 4/8 mm w ilości .....kg,
- żwiru frakcji 8/16 mm w ilości .....kg.

Do mieszanki żwirów dosypywać frakcję piaskową (0 ÷ 2 mm) w ilościach podanych w tablicy 3. Objętość mieszanki należy określić doświadczalnie w objętościomierzu metalowym o pojemności 10 dm<sup>3</sup> po zagęszczeniu mieszanki kruszywa na stoliku wibracyjnym w czasie 10 sekund. Gęstość nasypową w stanie zagęszczonym mieszanki należy obliczyć na podstawie wzoru 2.1.

*Tab.3. Wyniki uzyskane w iteracji 2 doświadczenia – ustalenie optymalnego składu mieszanki kruszywa żwirowego: frakcji 2/4 mm oraz 4/16 mm*

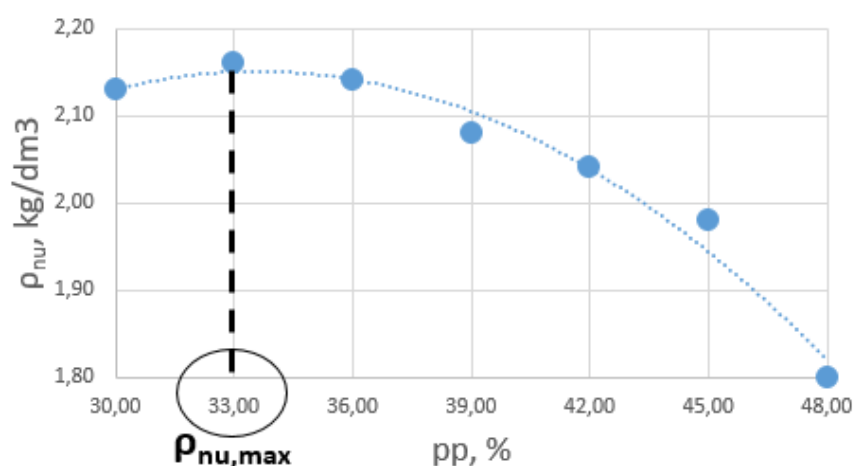
Nr mieszanki	1	2	3	4	5	6	7
Frakcja 2/16 mm – udział procentowy w mieszance [%]	70	67	64	61	58	55	52
Frakcja 0/2 mm – udział procentowy w mieszance [%]	30	33	36	39	42	45	48
Frakcja 2/16 mm – masa [kg]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Frakcja 0/2 mm – masa [kg]	2,14	2,46	2,81	3,20	3,62	4,09	4,62
Masa mieszanki [kg]							
Objętość mieszanki [dm <sup>3</sup> ]							
Gęstość nasypowa mieszanki w stanie utrzesionym, $\rho_{nu} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$							
Jamistość mieszanki, $j_k \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$							
Wodożądność mieszanki, $w_k \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$							
Jamistość + wodożądność mieszanki, $j_k + w_k \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$							

Wniosek: Maksymalna gęstość nasypowa w stanie utrzesionym została uzyskana w przypadku mieszanki zawierającej (masowo): .....% frakcji 0/2 mm (punkt piaskowy) oraz .....% frakcji 2/4 mm, ..... frakcji 4/8 mm i ..... frakcji 8/16 mm. Gęstość wyniosła ..... Tę mieszankę uznano za optymalną.

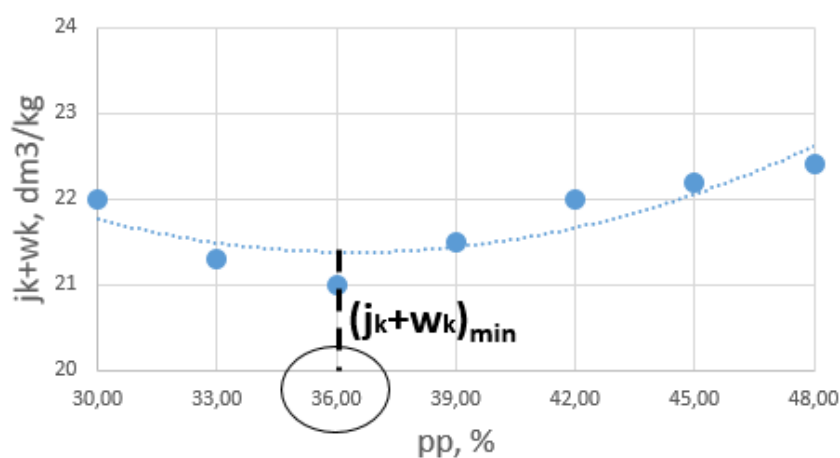
\*) Prowadzący udostępni studentom dodatkowe dane odnośnie uziarnienia piasku konieczne do policzenia wodożądności mieszanki kruszywa.

### 3.1.3. Opracowanie wyników doboru uziarnienia metodą kolejnych przybliżeń

Wyniki należy przedstawić w tablicach analogicznych do tab.1-3. Wartości gęstości nasypowej w stanie utręszonym ( $\rho_{nu} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$ ) oraz sumaryczne wartości jamistości i wodożądności mieszanek kruszywa ( $j_k + w_k, \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \right]$ ) obliczone w ramach 3 iteracji (tab.3) należy dodatkowo przedstawić w postaci dwóch wykresów w zależności od wartości punktu piaskowego, które mają potwierdzić spełnienie warunków maksymalnej gęstości i minimalnej sumarycznej jamistości i wodożądności mieszanki optymalnej. Przykład przedstawienia wyników w postaci wykresów przedstawiono na rysunkach rys.1. oraz rys.2.



Rys.1. Zależność pomiędzy gęstością nasypową w stanie zagęszczonym mieszanki czterech frakcji kruszywa: 0/2 mm, 2/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm a wartością punktu piaskowego mieszanki

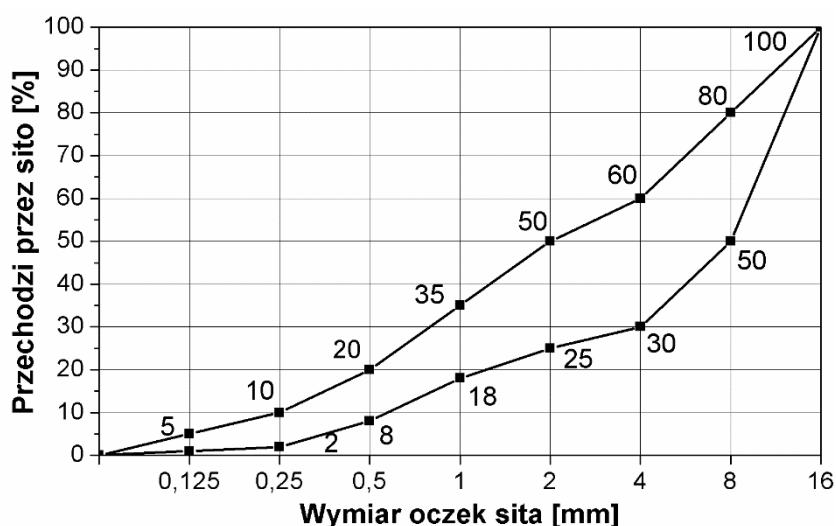


Rys.2. Zależność pomiędzy sumaryczną wartością jamistości i wodożądności mieszanki czterech frakcji kruszywa: 0/2 mm, 2/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm a wartością punktu piaskowego mieszanki



### 3.1.4. Ocena wyników doboru uziarnienia metodą kolejnych przybliżeń

Wyniki uzyskane za pomocą metody kolejnych przybliżeń (iteracji), tj. skład ziarnowy zoptymalizowanej mieszanki kruszywa, należy przedstawić w postaci graficznej – wykresu prezentującego krzywą uziarnienia mieszanki, którą następnie należy porównać z krzywymi normowymi (Rys. 3).



Rys.3. Krzywe graniczne uziarnienia kruszywa do betonu o górnym wymiarze ziaren 16 mm zalecane w normie PN-88/B-06250

## 4. Sprawozdanie z ćwiczenia

Sprawozdanie powinno zawierać następujące punkty:

- I. Przedmiot badań  
(podstawowe informacje o badanych materiałach/wyrobach)
- II. Wyniki badań  
(wyniki pozyskane na zajęciach laboratoryjnych wyniki oznaczeń przedstawione w tabelach i opracowane we wskazany sposób)
- III. Wnioski  
(wypunktowane stwierdzenia sformułowane na podstawie uzyskanych wyników)
- IV. Literatura  
(zawierający odniesienia do literatury wykorzystanej do przygotowania sprawozdania)

## 5. Zalecana literatura uzupełniająca do tematu

- Gantner E., Chojczak W., Materiały budowlane. Spoiwa, kruszywa, zaprawy. Ćwiczenia laboratoryjne, OWPW, 2013
- Chojczak W., Materiały budowlane. Ćwiczenia laboratoryjne. Część 1. Właściwości techniczne, kamień naturalny, ceramika, OWPW, 2016
- Chojczak W., Materiały budowlane. Ćwiczenia laboratoryjne. Część 2. Drewno, szkło, lepiszcza bitumiczne, tworzywa sztuczne, OWPW, 2018
- Stefańczyk B. i in., Budownictwo ogólne t.1. Materiały i wyroby budowlane, Wyd. Arkady Warszawa 2007
- Szymański E., Materiałoznawstwo budowlane z technologią betonu. T.1, OWPW, Warszawa 2003.

Instrukcję przygotowano w ramach projektu

**NERW PW Nauka – Edukacja – Rozwój – Współpraca**

Projekt typu P2 finansowany w ramach

**Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój 2014-2020,**

**Oś priorytetowa III Szkolnictwo Wyższe dla gospodarki i rozwoju, Działanie 3.5 Kompleksowe  
programy szkół wyższych**

Jednostka wiodąca

**Centrum Zarządzania Innowacjami i Transferem Technologii PW**

Zadanie:

**Dostosowanie i realizacja programów kształcenia na Wydziale Inżynierii Lądowej  
w zakresie umiejętności praktycznych stosowania BIM w budownictwie**