

dr inż. Grzegorz Łój
Zuzanna Liczberska
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
mgr inż. Michał Oleksik
mgr inż. Arkadiusz Ignerowicz
mgr inż. Arkadiusz Fornal
Atlas sp. z o.o.
Wioletta Wojtkiewicz
DROG-BRUK A.P. Szczerek Sp.J.

Laboratoryjne wspomaganie procesu projektowania mieszanek betonowych do wibroprasowania

Laboratory-assisted optimization of concrete mix design for vibro-compaction applications

Streszczenie

Od połowy lat 90-tych ubiegłego wieku znacząca większość drobnowymiarowych elementów betonowych produkowana jest w technologii betonu wibroprasowanego. Dla skutecznego prowadzenia powyższej metody formowania w warunkach przemysłowych konieczne jest wytworzenie mieszanki betonowej o bardzo specyficznych właściwościach. Mieszanekę taką można sklasyfikować jako mieszanekę o konsystencji wilgotnej a według klasyfikacji z normy PN-EN 206-1:2003/A2:2006 jako mieszanekę o konsystencji V0 (z późniejszych wydań normy PN-EN 206 klasyfikacja Ve-Be została wycofana). Pod względem urabialności mieszanki betonowe przeznaczone do procesu wibroprasowania można sklasyfikować jako „bardzo sztywne”. Sztywność mieszanki ziemisto-wilgotnej powoduje to, że podczas jej zagęszczania na zwykłym aparacie Ve-Be czas tej operacji znacząco przekracza próg 31 sekund wibrowania. W praktyce wyklucza to bezpośrednie zastosowanie tej metody do oceny zagęszczalności mieszanki betonowej dla wyrobów wibroprasowanych.

Ponieważ mieszance betonowej do wibroprasowania często określanej mianem „mieszanki ziemisto-wilgotnej” bliżej jest „reologicznie” do mieszanek geotechnicznych stąd bardzo podejmuje się próby adaptowania metodyki oceny zaczerpniętej z badań stabilizacji gruntów do wspomaganie procesu projektowania tego typu mieszanek. W niniejszym artykule przeanalizowane zostaną wyniki badań porównawczych 4 zaadaptowanych metod zagęszczania i oceny mieszanek ziemisto-wilgotnych: metody Ekonoma, metody Proctora, metody wykorzystującej prasę żyratorową oraz prymitywnej metody zagęszczania próbek betonów ziemisto-wilgotnych z wykorzystaniem odpowiednio zmodyfikowanego młota udarowego. Wyniki badań laboratoryjnych zostaną odniesione do parametrów użytkowych próbek betonowej kostki brukowej wyprodukowanej na linii przemysłowej z mieszanki betonowej ziemisto-wilgotnej o takim samym składzie jak laboratoryjna.

Abstract

Since the mid-1990s, the vast majority of small-sized concrete elements have been produced using vibro-pressed concrete technology. In order to effectively implement the above-mentioned forming method in industrial conditions, it is necessary to produce a concrete mix with very specific properties. Such a mixture can be classified as a wet consistency mixture and according to the classification of the standard PN-EN 206-1:2003/A2:2006 as a V0 consistency mixture (in later editions of the standard PN-EN 206 the Ve-Be classification was withdrawn). In terms of workability, concrete mixes intended for the vibro-pressing process can be classified as "very stiff". The stiffness of the earthy-moist mixture means that when it is compacted using a standard Ve-Be device, the time of this operation significantly exceeds the threshold of 31 seconds of vibration. In practice, this excludes the direct use of this method to assess the compaction of the concrete mix for vibro-pressed products. Since the concrete mixture for vibro-pressing, often referred to as an "earthy-moist mixture", is "rheologically" closer to geotechnical mixtures, many attempts are being made to adapt the assessment methodology taken from soil stabilization studies to support the design process of this type of mixtures. This article will analyze the results of comparative studies of 4 adapted methods of compacting and assessing earthy-moist mixes: the Econom method, the Proctor method, the method using a gyrator press and the primitive method of compacting earthy-moist concrete samples using an appropriately modified impact hammer. The results of laboratory tests will be referred to the performance parameters of concrete paving stone samples produced on an industrial line from an earthy-moist concrete mix of the same composition as the laboratory one.

1. Właściwości mieszanek betonowych do procesu wibroprasowania

Wielkoskalowa produkcja drobnowymiarowych prefabrykatów betonowych w tym betonowych elementów brukowych, czyli znaczącej większości tego, co Anglosasi określają *manufactured concrete*, a co w wolnym tłumaczeniu określić można, jako beton manufakturowany odbywa się na wysoce zautomatyzowanych liniach produkcyjnych wykorzystujących technikę formowania zwaną wibroprasowaniem. W maszynach formujących zwanych potocznie wibroprasami proces ten przebiega zazwyczaj dwuetapowo. W pierwszym etapie mieszanka betonowa poddawana jest tylko wibrowaniu objętościowemu. Najczęściej etap ten połączony jest z zasypywaniem mieszanki do formy. Przyłożona do układu odpowiednia siła udaru wibracji pokonuje tarcie lepkościowe mieszanki betonowej, co z kolei „upłynnia” chwilowo mieszankę powodując jej zagęszczenie poprzez zredukowanie ilości zwartego w niej powietrza. W drugim etapie, który można nazwać zasadniczym wibroprasowaniem oprócz wibracji objętościowych do mieszanki przykładana jest jednoosiowa siła wymuszająca, czyli mieszanka oprócz wibrowania poddawana jest również prasowaniu. Skutkuje to dalszą kompresją czasowo upłynnioną mieszanki, co znacząco zwiększa jej upakowanie w formie. Zasadniczą cechą techniki formowania mieszanki betonowej przez wibroprasowanie jest to, że po ustaniu oddziaływania sił wymuszających tj. wibrowania i prasowania chwilowo upłynniona mieszanka ponownie

„sztywnieje”. Dzięki temu zaformowany element betonowy zachowuje swój kształt a co ważniejsze można wyjąć go z formy bezpośrednio po zaformowaniu bez oczekiwania na zakończenie procesu wiązania cementu. Przekłada się to w praktyce na bardzo wysoką wydajność produkcji betonu wibroprasowanego przy jednoczesnej wysokiej powtarzalności parametrów użytkowych wyprodukowanych drobnowymiarowych prefabrykatów betonowych.

Tego typu technika formowania wymaga mieszanki betonowej o bardzo specyficznych cechach. Przede wszystkim jest to mieszanka z grupy mieszanek betonowych określanych, jako „Zero-slump concrete” – czyli mieszanek bez opadu stożka, dla których ocenę zagęszczalności a ściślej rzecz biorąc urabialności ocenia się metodą Ve-Be. Do produkcji drobnowymiarowych prefabrykatów betonowych w technice formowania przez wibroprasowanie wykorzystuje się najbardziej sztywne mieszanki betonowe z tej grupy. Określa się je mianem Earth-moist concrete (EMC), co można przetłumaczyć jako mieszanki o konsystencji ziemisto-wilgotnej. Charakteryzują się one przede wszystkim bardzo niską wilgotnością oraz wysoką sztywnością. Przy niskich współczynnikach wodno – cementowych rzędu 0,32 – 0,38 konsystencję takich mieszanek można sklasyfikować, jako V0. Oznacza to, że w teście formowania mechanicznego metodą Ve-Be czas zagęszczania takiej mieszanki jest znacznie dłuższy niż 31s. Z reguły mieszanki betonowe przeznaczone do procesu wibroprasowania mają czas zagęszczania na aparacie Ve-Be znacząco dłuższy niż 1 minuta (>60s), co czyni ją praktycznie niezagęszczalnymi przy użyciu samych wibracji.

Jednocześnie od mieszanek ziemisto-wilgotnych wymaga się odpowiedniej urabialności, czyli jak najbardziej szczelnego wypełnienia formy przy jak najniższym nakładzie włożonej pracy. Aby uzyskać odpowiedni poziom urabialności, do mieszanek przeznaczonych do wibroprasowania stosuje się wiele różnorodnych zabiegów, począwszy od właściwego skomponowania stosu okruszowego mieszanki kruszywowej, wprowadzenie oprócz cementu drobnoziarnistych dodatków mineralnych i/lub drobnoziarnistych kruszyw wypełniających, na stosowaniu wyspecjalizowanych domieszek chemicznych korygujących właściwości reologiczne tych mieszanek skończywszy.

Jak już wcześniej wspomniano w warunkach wibroprasowania taka mieszanka betonowa o charakterze silnie tiksotropowym zachowuje się jak „gęsta ciecz”. Przyłożone do formy wibracje powodują jej „płynięcie”, a zastosowany nacisk wymusza kierunkowe zwiększenie upakowania mieszanki betonowej w formie. Po zatrzymaniu wibracji i zdjęciu siły nacisku zaformowany element zachowuje kształt nadany mu przez formę, a dodatkowo charakteryzuje się już pewną wytrzymałością na ściskanie zwaną „wytrzymałością formowania”. Jej wartość nie jest wysoka, z reguły nie przekracza 0,5 MPa, ale jest wystarczająca do tego, aby rozformowanie wyrobu następowało bezpośrednio po procesie zagęszczania oraz do tego, aby wyrób mógł być od razu i bez uszkodzeń transportowany na podkładzie produkcyjnym do komory wczesnego dojrzewania.

2. Określenie wymagań dla mieszanki betonowej ziemisto-wilgotnej

Przystępując do projektowania składu mieszanki betonowej ziemisto-wilgotnej przeznaczonej do formowania przez wibroprasowanie musimy wziąć pod uwagę nie tylko cechy użytkowe, jakimi mają charakteryzować się finalnie wyroby betonowe, ale

także wpływ mieszanki betonowej na prawidłowy przebieg procesu wibroprasowania. W tym przypadku pamiętać trzeba, że ostateczną wytrzymałość betonowi wibroprasowanemu nadaje nie tylko chemiczny proces wiązania i twardnienia cementu, ale również mechaniczne upakowanie i zagęszczenie mieszanki podczas wibroprasowania. Dlatego przystępując do projektowania składu mieszanki ziemisto-wilgotnej należy brać pod uwagę czynniki produkcyjne takie jak:

- zdolność mieszanki do właściwej homogenizacji podczas mieszania w mikserze produkcyjnym, szczególnie w przypadku drobnoziarnistych mieszanek warstwy licowej elementów brukowych, gdzie brak kruszyw grubych utrudnia homogenizację spoiw i innych materiałów drobnoziarnistych jak np. pigmenty
- ograniczenie rozsegregowywania się oraz przesychania mieszanki podczas transportu na z miksera do maszyny formującej
- właściwą lepkość mieszanki betonowej umożliwiającą równomierny zasyp formy w wibroprasie
- podatność mieszanki na wibroprasowanie i brak odkształcania się elementów bezpośrednio po zaformowaniu
- odpowiednią sztywność mieszanki, umożliwiającą przemieszczanie świeżo zaformowanych elementów na linii produkcyjnej
- właściwą dynamikę przyrostu wytrzymałości, szczególnie w początkowym etapie dojrzewania elementów betonowych (pierwsze 24 godziny), z uwzględnieniem rodzaju stosowanego w danym zakładzie procesu wstępnego dojrzewania.

Jeśli chodzi o parametry mechaniczne, jakimi powinniśmy kierować się przestępując do projektowania składu mieszanki betonowej do wibroprasowania to punktem wyjścia powinna być dla nas wytrzymałość na ściskanie betonu wibroprasowanego. I to, pomimo że dla betonowych elementów brukowych normy zakładają, jako parametry deklarowane wytrzymałości na siły poprzeczne tj. wytrzymałość na zginanie lub wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Przyjęcie, jako punktu odniesienia wytrzymałości na ściskanie znacząco upraszcza proces projektowania mieszanki betonowej.

Mając na uwadze wcześniejsze (wykorzystywane przed rokiem 2003) dokumenty odniesienia tj. wymagania dla aprobat technicznych IBDiM czy też wymagania niemieckiej normy DIN dla betonowej kostki brukowej wyjściową wartość wytrzymałości na ściskanie przyjmuje się 50MPa, co mniej więcej odpowiada obecnej klasie betonu C35/45 (wg PN-EN 206). Uwzględniając przeliczenia z wzoru Bolomey'a dla cementów o klasie wytrzymałości 42,5 i 52,5 oraz przy różnym rodzaju stosowanych kruszyw wyznaczony współczynnik wodno-cementowy będzie mieścił się w przedziale 0,34 – 0,38. Z reguły przyjmuje się dla bazy kruszyw żwirowo-otoczakowych w/c na poziomie 0,36.

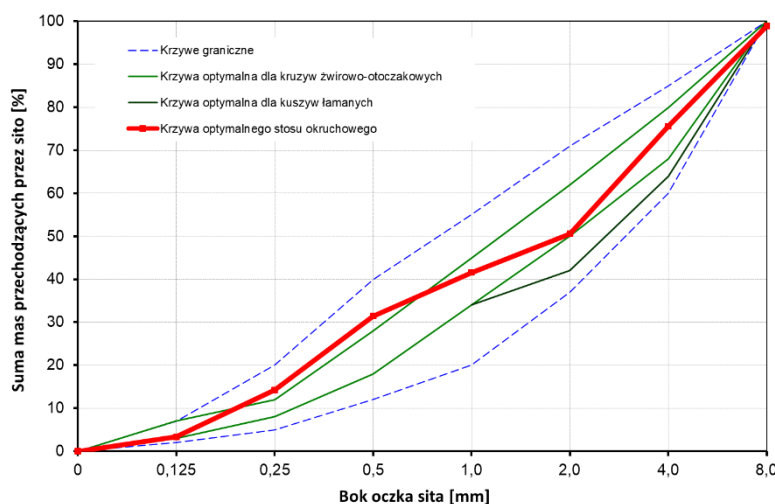
Zaznaczyć trzeba, że w rzeczywistości od tej wartości mogą być wyjątki spowodowane np. zastosowaniem wysokowodożądnych dodatków mineralnych (np. popiołów lotnych fluidalnych) i wtedy przy właściwym zaprojektowaniu całości mieszanki betonowej do wibroprasowania możemy prowadzić produkcję przy w/c równym nawet 0,45, bez straty dla wytrzymałości i innych parametrów użytkowych kostki brukowej.

3. Sposoby ustalania właściwego składu kruszywa dla mieszanek ziemisto-wilgotnych

Na właściwości mieszanki betonowej o konsystencji ziemisto-wilgotnej znaczący wpływ ma właściwe dobranie jakościowe i ilościowe kruszyw. Kryteria doboru jakościowego kruszyw były już opisywane przez badaczy tematu, między innymi przez W. Bryliciego, oraz autorów niniejszego artykułu i można zapoznać się z nimi we wcześniejszych publikacjach. W niniejszym tekście skupimy się na podstawach doboru ilościowego kruszyw w mieszankach do wibroprasowania.

Na dobór ten wpływ będzie miało wiele czynników technologicznych, jakościowych i ekonomicznych. O większości z nich pisaliśmy już wyżej. Natomiast pamiętać trzeba, że drobnowymiarowe elementy betonowe są wyrobami małogabarytowymi bądź cienkościennymi. Dlatego też w wielu przypadkach ogranicza się wielkość maksymalnego ziarna kruszywa do $D_{\max} = 8\text{mm}$.

Skład stosu okruszowego mieszanki kruszywowej można ustalić na wiele sposobów. Można posłużyć się metodami analityczno – obliczeniowymi opierającymi się na doświadczeniach Stern-Bolomey'a z optymalizacją pustych przestrzeni w oparciu o krzywizny ziarnowe lub voids ratio opartej na modelach Andreasena i/lub Funk&Dinger'a opierającej się na obliczeniach minimalizacji pustek międzyziarnowych podczas zagęszczania (metody wykorzystywane w obliczeniach zagęszczania w ceramice). Wszystkie te metody znalazły swoje uproszczenie w opracowanych granicznych krzywych zakresów optymalnego uziarnienia. Przykładem niech będzie tutaj stosowany przez W. Bryliciego zakres uziarnienia opierających się na niemieckich wymaganiach dla betonów nawierzchni drogowych rys.1.



Rys. 1. Zalecane graniczne krzywe uziarnienia dla stosu okruszowego 0/8mm dla mieszanek betonowych do wibroprasowania z przykładową krzywą uziarnienia wyznaczoną podczas doświadczenia autorów

Sporządzenie kumulacyjnej krzywej uziarnienia wymaga wyznaczenia zawartości poszczególnych frakcji poprzez wykonania analizy sitowej kruszyw wykorzystywanych do produkcji wibroprasowanej. Nie zawsze jednak dostępne lokalnie kruszywa oraz warunki produkcyjne zakładu pozwalają w pełni wykorzystać

możliwości tych metod. Ponadto nie zawsze wpisana w zakres krzywych granicznych kumulacyjna krzywa uziarnienie stosu okruszowego odpowiada najniższej lub najbardziej optymalnej jamistości zestawu kruszywowego. Może się to przekładać w dwojaki sposób na ekonomię produkcji i jakość finalnego wyrobu. Wyższa jamistość stosu okruszowego to zwiększone zapotrzebowanie na zaczyn cementowy, a co za tym idzie obniżenie rentowności produkcji. Ponadto zwiększona ilość pustych przestrzeni utrudnia właściwe zagęszczanie mieszanek ziemisto-wilgotnych szczególnie w fazie zasadniczej wibroprasowania, gdyż uwięzione między ziarnami powietrze nie może być właściwie odprowadzone z mieszanki podczas zagęszczania i po ustąpieniu siły „prasującej” spowodować może wtórne rozluźnienie struktury zaformowanego betonu.

Aby zoptymalizować jamistość stosu okruszowego kruszywa potrzebnego do sporządzenia mieszanki ziemisto-wilgotnej można posłużyć się doświadczalną metodą wyznaczenia najniższej/optymalnej ilości pustek powietrznych w zagęszczonym stosie okruszowym. Istnieje kilka metod oznaczania jamistości stosu okruszowego. Do najpopularniejszych należy zaliczyć metodę normową PN-EN 1097-3:2000 Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości, polegającą na oznaczeniu gęstości nasypowej w stanie zagęszczonym oraz gęstości ziarnowej (piknometrycznej) kruszywa i porównaniu tych wartości. Jamistość v wyrażona w procentach objętości wolnych przestrzeni pomiędzy ziarnami kruszywa znajdującego się w określonej przestrzeni (np. pojemniku) wyrażona jest następującą zależnością:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100$$

Gdzie:

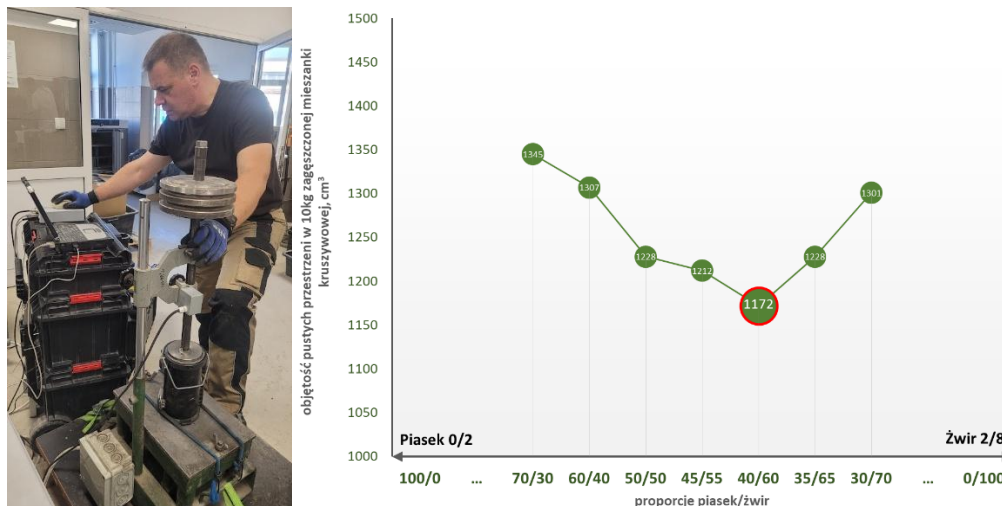
- v - oznacza jamistość wyrażoną w procentach
- ρ_p – oznacza gęstość nasypową w stanie zagęszczonym w megagramach na metr sześcienny
- ρ_b – oznacza gęstość ziarnową tej samej próbki kruszywa oznaczoną piknometrycznie wg procedury EN 1097-6 podaną w megagramach na metr

Z racji konieczności wykonania, dla otrzymania ostatecznego wyniku wielu oznaczeń składowych metoda ta może być obarczona znaczną nawet niepewnością pomiaru, szczególnie, jeśli wykorzystywana będzie w warunkach przemysłowych. Dlatego na potrzeby niniejszego tekstu przeprowadzono doświadczenie z wykorzystaniem bezpośredniego pomiaru pustych przestrzeni w stosie okruszowym. Metodyka zaczerpnięta została ze znormalizowanych amerykańskich metod normowych wykorzystywanych w sporządzaniu i ocenie mieszanek betonowych do prac geotechnicznych lub mieszanek betonowych dla betonów wałowanych. Mieszanki te w swojej naturze zbliżone są cechami „reologicznymi” do mieszanek ziemisto wilgotnych wykorzystywanych w procesie wibroprasowania betonu.

Metoda ta polega na bezpośrednim hydrostatycznym pomiarze pustych przestrzeni w zagęszczonym przez wibroprasowanie suchym stosie okruszowym. Urządzeniami jakie można wykorzystać w do zagęszczenia próbek kruszywa są: aparat Ve-be z obciążeniem zalecanym przez normy ASTM do badania mieszanek betonowych dla betonów wałowanych lub „spokrewniony” z nim aparat Economa (rysunek 4) umożliwiający symulowanie zagęszczania przez wibroprasowanie.

Badanie polega na tym, że przygotowujemy kilka próbek o stałej masie całkowitej np. 10kg a o zmiennej proporcji kruszyw składowych (patrz przykład rys. 2). Kolejno zagęszczamy poszczególne próbki kruszywa poprzez wibroprasowanie aż do

momentu ustabilizowania się ich wysokości. Następnie delikatnie (najlepiej pośrednio) zalewamy zagęszczone próbki wodą aż to pojawienia się na powierzchni badanego kruszywa „filmu wodnego”. Wprowadzona w ten sposób do kruszywa objętość wody odpowiada objętości pustych przestrzeni w stosie okruszowym.



Rys. 2 i 3. Zmodyfikowany aparat Economa i pomiar objętości pustych przestrzeni w stosach okruszowych o różnych proporcjach piasku do żwiru.

4. Optimalizacja składu mieszanki betonowej ziemisto-wilgotnej do wibroprasowania

Dla uzyskanej najniższej/optymalnej jamistości stosu okruszowego wyliczamy potrzebną ilość zaczynu cementowego. Pamiętać należy jednak w tym przypadku, że ilość zaczynu cementowego nie może być tylko i wyłącznie taka jak objętość pustych przestrzeni. Metoda projektowania betonu opierająca się na zasadzie podwójnego otulenia zakłada, że nie wystarczy wypełnić zaczynem tylko pustek w stosie okruszowym, ale konieczne jest również wytworzenie na ziarnach otoczek z „kleju cementowego”. Dlatego też konieczne jest zwiększenie ilości wprowadzonego do mieszanki betonowej zaczynu cementowego. Doświadczalnie w badaniach autorów wykazano, że optymalna dla mieszanek ziemisto-wilgotnych do wibroprasowania ilość nadmiaru zaczynu cementowego zawiera się w granicach ok. 7 – 12% objętościowych. Konkretna ilość jest optymalizowana w zależności od lokalnych uwarunkowań technologicznych konkretnej linii produkcyjnej.

Mając ustaloną jamistość stosu okruszowego, nadmiarową objętość zaczynu cementowego oraz parametry takie jak w/c mieszanki oraz gęstość zaczynu cementowego zawierającego dodatki i domieszki uplastyczniające, możemy wyliczyć skład zarobu próbnego mieszanki ziemisto-wilgotnej. Przykład wyliczeń z doświadczenia autorów przedstawia tabela 1.

Optymalna jamistość stosu okruszowego wyznaczona dla 10 kg kruszywa o proporcji P/K = 40/60 (patrz rys. 2) $v = 1,172 \text{ dm}^3$.

Objętość zaczynu cementowego z przyjętym 10% nadmiarem:

$$V_z = 1,172 \text{ dm}^3 + 10\% = 1,3025 \text{ dm}^3$$

Masa zaczynu cementowego o w/c = 0,36 i wyznaczonej gęstości objętościowej 1,785 kg/m³

$$m_z = 1,3025 \text{ dm}^3 \times 1,785 \text{ kg/dm}^3 = 2,325 \text{ kg}$$

Tabela 1. Ustalony skład mieszanki betonowej

Składnik	Masa w zarobie w kg	Udział procentowy	Zawartość składnika w kg/m ³
CEM II/B-M 42,5N	1,56	12,86%	300
Woda	0,56	4,62%	108
Piasek 0/2	4,0	32,99%	750
Żwir 2/8	6,0	49,48%	1125
Plastyfikator	0,0063	0,3%	1,2
Suma zarobu ►	12,1263	Gęstość po formowaniu ►	2285

5. Metody laboratoryjnej symulacji zagęszczania mieszanek ziemisto-wilgotnych

Ze względu na specyfikę produkcji betonowych elementów wibroprasowanych właściwości użytkowe mieszanki betonowej do ich produkcji zwykle waliduje się na etapie prób przemysłowych w zakładzie produkcyjnym. Wynika to z niskiej wilgotności mieszanki betonowej, co powoduje, że osiągnięcie odpowiedniego stopnia zagęszczenia próbki tradycyjnymi metodami w skali laboratoryjnej jest problematyczne. Ponieważ jednak właściwości mieszanek betonowych ziemisto-wilgotnych są zbliżone do właściwości mieszanek geotechnicznych można zaadaptować niektóre metody laboratoryjne na potrzeby oceny wstępnej betonów wibroprasowanych.

W badaniach do niniejszego tekstu porównano 4 metody zagęszczania mieszanek ziemisto-wilgotnych:

1. Młot udarowy (rys. 4) ze stemplem o średnicy 100mm pozwalający na zagęszczanie mieszanki w formach walcowych typu A, tj. o średnicy 100mm, metoda jest adaptacją metodyki amerykańskiej (ASTM C1435/C1435M-08) wykorzystywanej w badaniach mieszanek geotechnicznych i betonów RCC, parametry: energia udaru ok. 17 J przy masie ok. 15kg i czasie zagęszczania pojedynczej próbki ok. 10s
2. Ubijak Proctora (rys. 5), pracujący w trybie automatycznym, (zgodny z PN-EN 13286), forma o średnicy 100mm, masa ubijaka 2,5kg, skok ubijaka 305mm, czas zagęszczania pojedynczej próbki ok. 7 min
3. Prasa żyratorowa (rys. 6), czyli urządzenie zaadaptowane z technik oceny mieszanek mineralno-asfaltowych do badań mieszanek betonowych ziemisto-wilgotnych, pozwala na symulowanie zagęszczania z możliwością ustalenia siły i intensywności procesu W prasie żyratorowej odpowiedni stopień zagęszczenia mieszanki uzyskuje się poprzez równoczesne zastosowanie siły ściskającej i ścinającej w osi

pionowej próbki. Próbką umiejscowiona jest pod niewielkim kątem względem osi pionowej. Taki układ sił powoduje ruch linii środkowej badanego elementu, który wytwarza stożkową powierzchnię żyracji, podczas gdy końce badanego elementu pozostają w przybliżeniu prostopadłe do osi pionowej powierzchni. Prasa żyratorowa pozwala nie tylko na ustalenie jednorodnych warunków zagęszczania próbek ale również rejestruje proces zagęszczania i przez to pozwala na porównywanie ze sobą warunków zagęszczania i zachowania się próbek o różnym składzie. Ustalono w doświadczeniu parametry: siła nacisku F ok. 3,6 kN, prędkość obrotowa żyracji 60 rpm, kąt nachylenia żyratora $2,28^\circ$, czas formowania pojedynczej próbki ok. 3 minuty.

4. Aparat Economa (rys. 7) składa się ze stołu wibracyjnego i stempla z obciążeniem, przez co umożliwia symulowania wibroprasowania. Siła prasująca jest wymuszana grawitacyjnie i może być regulowana masą obciążającą stempla, przez co pozwala na zasymulowanie intensywności formowania na różnych typach przemysłowych wibropras formujących. Oprócz wykorzystania przy wyznaczeniu optymalnej jamistości stosu okruszowego, aparat Economa wykorzystać można do formowania próbek z mieszanki ziemiści-wilgotnej a po wyposażeniu w odpowiedni rejestrator można również śledzić w czasie rzeczywistym przebieg procesu zagęszczania w zarejestrowane wyniki wykorzystać do porównania podatności na zagęszczanie mieszanek betonowych o różnym składzie. Ustalono w doświadczeniu parametry: siła wymuszająca wibracji ok. 4500-5000N, częstotliwość wibracji ok 60Hz, amplituda wibracji 0,5mm, obciążenie prasujące 22,25kg (co przy próbce o średnicy 100mm daje nacisk prasowania ok. 0,03MPa) czas formowania pojedynczej próbki od 30 do 45s.

Wykorzystując wszystkie urządzenia zagęszczające równolegle zaformowano próbki o średnicy 100mm i wysokości ok. 100mm. Podczas formowania obserwowano zarówno zachowanie się jak i wygląd próbek. Oceniano pośrednio optymalną wilgotność mieszanki betonowej do wibroprasowania obserwując czy podczas symulacji zagęszczania nie następuje nadmierne wyciskanie wody zarobowej oraz czy mieszanka betonowa nie przykleja się do stempla. Zjawisko przyklejania się do stempla występujące podczas przemysłowego formowania wyrobów wibroprasowanych jest jedną z podstawowych przyczyn powstawania produktów wybrakowanych. Ponadto klejenie do stempla mieszanki betonowej warstwy konstrukcyjnej zanieczyszcza warstwę licową kostki brukowej powodując powstawanie wad estetycznych.

Po zaformowaniu elementy poddano oględzinom nie tylko od strony licowej, czyli tej stykającej się ze stemplem, ale również i oględzinom powierzchni bocznych. Obserwowano jak dana metoda zagęszczania daje rozkład zagęszczenia na wysokości próbki oraz czy mieszanka betonowa skomponowana została w sposób umożliwiających zamknięcie powierzchni bocznych czyli tzw. zaciąg powierzchni bocznych. W wszystkich przypadkach zarówno rozkład mieszanki w wysokości próbki jak i zaciąg powierzchni bocznych uznano za zadowalający.



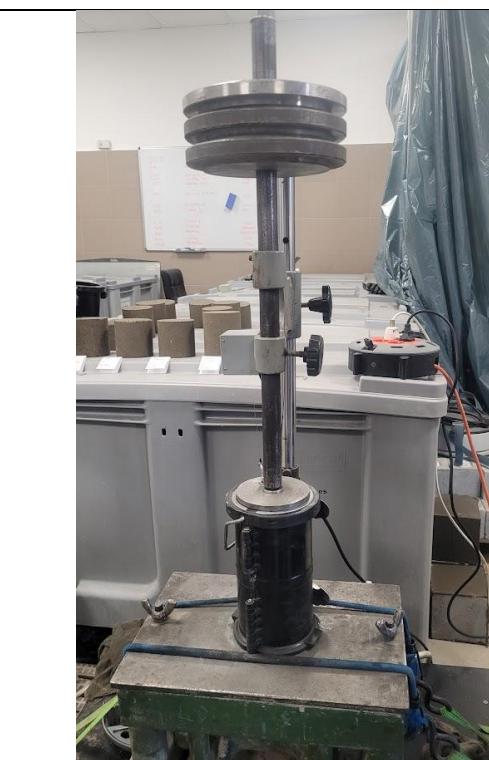
Rys.4. Zagęszczanie próbki przy pomocy młota uderowego



Rys. 5. Aparat Proctora



Rys. 6. Prasa żyratorowa



Rys. 7. Aparat Economa

Bezpośrednio po zagęszczaniu przedstawionymi wyżej metodami próbki rozformowano i po opisanych powyżej oględzinach umieszczono w komorze klimatycznej. Wczesne dojrzewanie przez czas 24 godzin przeprowadzono symulując

warunki dojrzewania w komorach dojrzewalniczych typu otwartego. Zaformowane próbki dojrzewały przez pierwsze 2 dni dojrzewały w temperaturze $30\pm 1^{\circ}\text{C}$ i wilgotności nie mniejszej niż 85%.

Po okresie wstępnego dojrzewania próbki wyjęto z komory i pozostawiono w warunkach laboratoryjnych aż do czasu wymaganego planowanymi badaniami.



Rys. 8. Zaformowane próbki przechowywane w komorze klimatycznej przez 24 godzinny okres wstępnego dojrzewania

Równolegle sprawdzono również możliwość symulacji przy pomocy 4 porównywanych metod formowania elementów dwuwarstwowych. Test wypadł pozytywnie, a jakość powierzchni licowej oraz spójność między warstwami betonu wibroprasowanego była we wszystkich przypadkach zadowalająca.

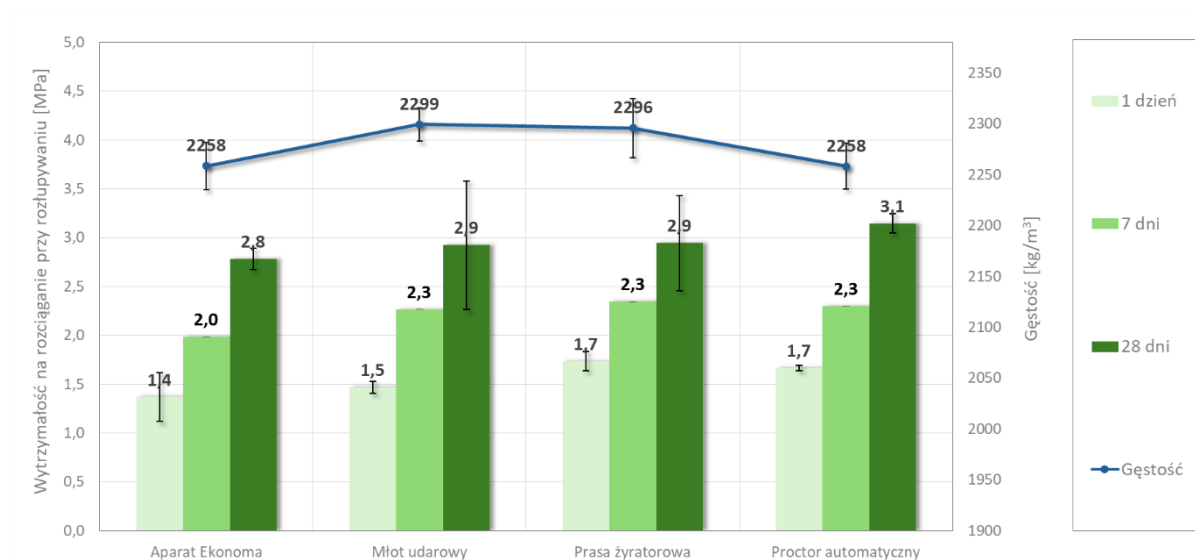
6. Porównanie skuteczności metod formowania próbek z mieszanek ziemisto-wilgotnych

Po właściwych czasach dojrzewania próbki poddano testom mechanicznym tj. ocenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i trwałościowym – w tym wypadku badano nasiąkliwość i podciąganie kapilarne.

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono zgodnie z procedurą normową normy PN- EN 12390-6 zamiast PN-EN1338. Taki sposób badania przyjęto ze względu na walcowy kształt uzyskanych próbek. Wyniki porównania wytrzymałości po 1, 7 i 28 dniach dojrzewania w odniesieniu do gęstości objętościowej betonu przedstawiono na rysunku 9.

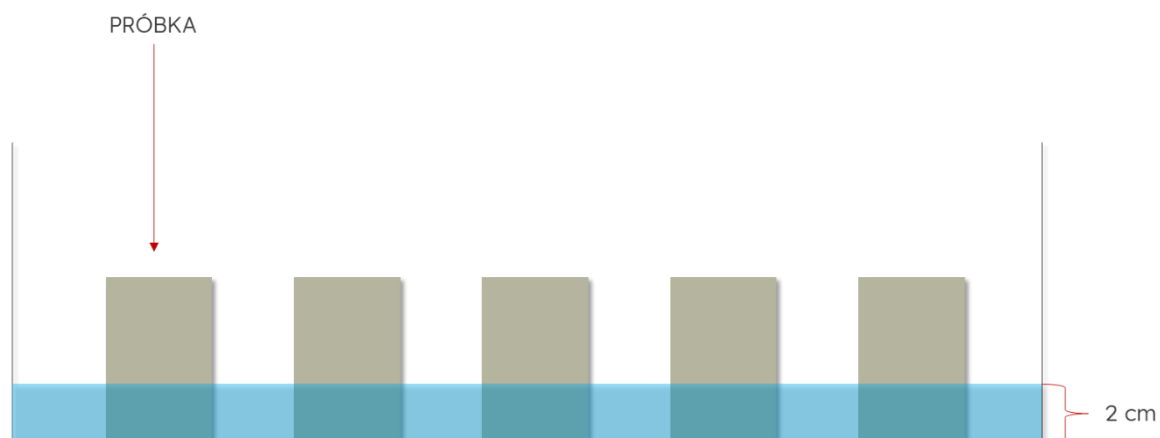
Oceniając otrzymane wyniki można ogólnie stwierdzić, że wszystkie te metody wypadły pporównywalnie, zarówno gęstości jak i wytrzymałości w poszczególnych terminach nie różniły się znacząco. Oczywiście ogromną rolę w końcowym wyniku wytrzymałości odgrywała sumaryczna energia zagęszczania. Najniższe wytrzymałości uzyskano wykorzystując aparat Ekonoma natomiast najwyższe aparat Proctora. Ponadto abate urządzenia charateryzowały się najmniejszym rozrzutem wyników co

uwidocznione zostało w odchyleniach standardowych badanych serii próbek. Niskie odchylenie standardowe oraz wysokie wartości wytrzymałości uzyskane dla próbek zagęszczanych aparatem Proctora wynikają z długiego czasu zagęszczania umożliwiającego właściwe odpowietrzenie się próbek podczas formowania oraz tym, że do badań wykorzystano automatyczny aparat Proctora – wcześniejsze doświadczenia z ręcznym aparatem proctora nie dawały tak dobrej powtarzalności.



Rys. 10 Analiza wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek mieszanki ziemisto-wilgotnej zaformowanej 4 wybranymi metodami

Ponieważ w przypadku symulacji zagęszczania siła nacisku nie daje takiego poziomu zawibroprasowania jak maszyny przemysłowe do oceny parametrów trwałościowych wytypowano nasiąkliwość wodną wagową oznaczoną wg procedury normowej PN-EN 1338:2005 a także podciąganie kapilarne wg procedury własnej. Schemat procedury badania podciągania kapilarnego próbek „wibroprasowanych” przedstawiono na rysunku 10.



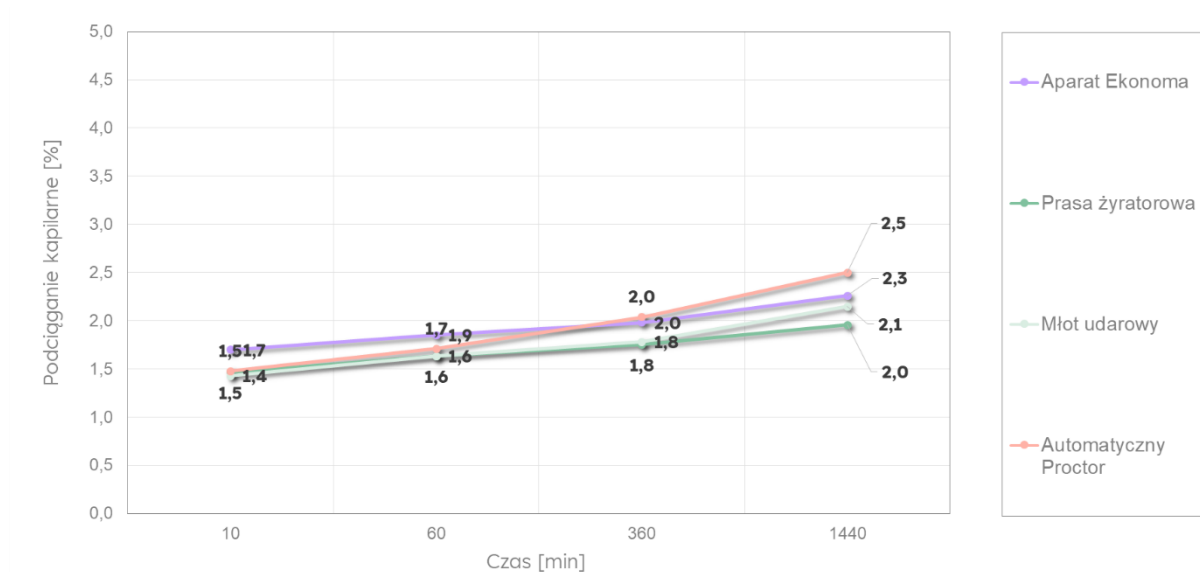
Rys. 10 Schemat testu podciągania kalpiarnego próbek betonów „wibroprasowanych”.

Rzeczywisty przebieg eksperymentu pokazany jest na 2 fotografiach: rys. 11 wygląd próbek na początku testu, rys. 12 wygląd próbek po 10 minutach testu.



Rys. 11 i 12 Wygląd próbek podczas testu podciągania kapilarnego

Wyniki testu wszystkich próbek zestawiono na wykresie rys. 13.



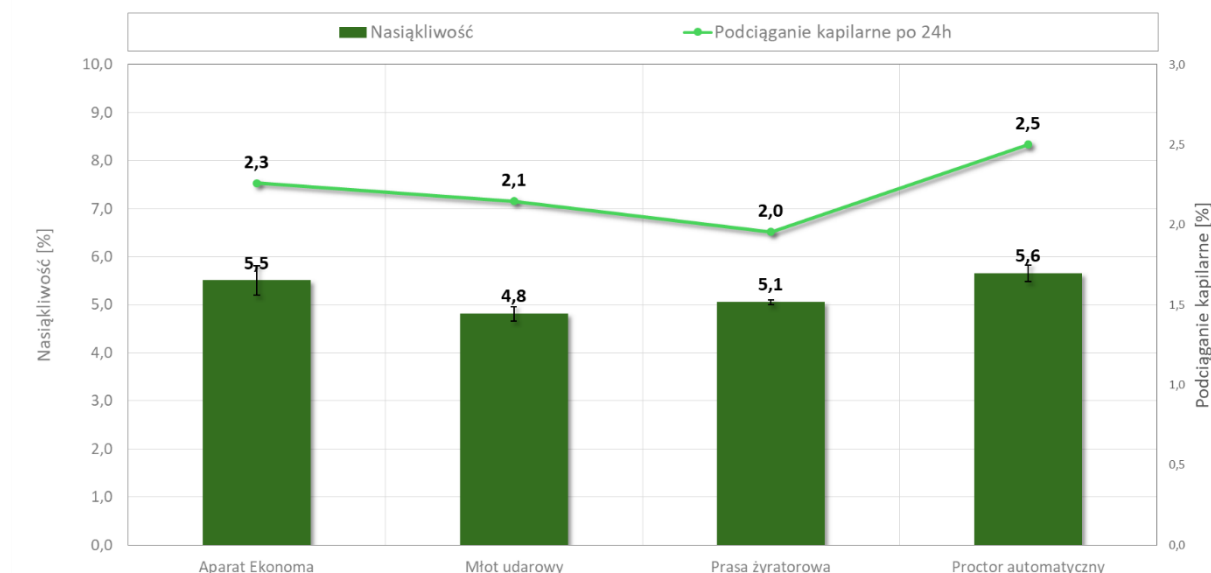
Rys 13. Wyniki testu podciągania kapilarnego

Jak można zobaczyć na powyższym wykresie po 24 godzinach testu na podciąganie kapilarne żadna z zaformowanych próbek nie podciągnęła wody wyżej niż $\frac{1}{4}$ swojej wysokości, świadczy to o dobrym i równomiernym zagęszczeniu mieszanki betonowej wszystkim czterema omawianymi metodami. Zatem można również oceniać wstępnie ten parametr na próbkach wytworzonych z mieszanki betonowej ziemisto-wilgotnej wytworzonej metodami laboratoryjnymi – w warunkach laboratoryjnych.

Zaznaczyć tutaj należy, że podciąganie kapilarne ma istotny wpływ nie tylko na trwałość ale również na estetykę betonowych elementów brukowych z betonu wibroprasowanego. Jeśli chodzi o trwałość w warunkach eksploatacyjnych obniżenie podciągania kapilarnego ogranicza penetrację wody i soli odładowanych w głąb betonu co poważnie poprawia trwałość bruku betonowego. Natomiast jeśli chodzi o wpływ na estetykę to niższe podciąganie kapilarne zmniejsza ryzyko powstawania wykwitów

węglanowo-wapniowych oraz innych potencjalnych przebarwień na powierzchni licowej elementów brukowych.

Jaka korelacja jest między podciąganiem kapilarnym a ogólną nasiąkliwością wodną próbek symulowanego zagęszczania mieszanki ziemisto-wilgotnej możemy zobaczyć na wykresie na rys. 14.



Rys. 14. Korelacja pomiędzy ogólną nasiąkliwością wodną a podciąganiem kapilarnym dla porównywanych metod symulacji zagęszczania.

Analizując otrzymane wyniki wyraźnie widzimy, że niższe podciąganie kapilarne przekłada się na mniejszą nasiąkliwość. Porównując jednak między sobą metody laboratoryjnego zagęszczania możemy zauważyć, że najniższe wyniki otrzymujemy tam gdzie intensywność i energia formowania jest najwyższa.

7. Podsumowanie

W przeprowadzonych badaniach porównaliśmy ze sobą kilka metod zagęszczania. Wszystkie pozwalają na laboratoryjne zaformowanie próbek z bardzo sztywnej mieszanki betonowej jaką jest mieszanka o konsystencji ziemisto wilgotnej. Po analizie wyników można stwierdzić, że każda z testowanych metod nadaje się do weryfikacji laboratoryjnej betonów wibroprasowanych bez konieczności przeprowadzania dużej ilości kosztownych prób na liniach przemysłowych. Oczywiście każda z nich ma swoje zarówno wady jak i zalety. Najprostszą z metod jest młot uderowy, można przy jego pomocy przygotować próbki do badań i zagęścić je w bardzo wysokim stopniu (wysoka energia zagęszczania). Jest to również metoda mobilna, wszystkie elementy można spakować i zabrać z laboratorium do zakładu oraz metoda prosta i nie wymagająca wysokich nakładów. Jej skuteczność jest wystarczająca na poziomie technologicznym firmy produkcyjnej. Drugą co do skuteczności metodą jest metoda Proctora. Wykorzystanie unijaka ręcznego to również nie jest kosztowne ale obarczone znaczną pracochłonnością i małą powtarzalnością pomiarów. Natomiast ubijak automatyczny to już urządzenie wybitnie stacjonarne i niestety kosztowne. Daje jednak bardzo dobre wyniki jeśli chodzi o pracę z mieszankami ziemisto-wilgotnymi.

Najbardziej wszechstronnymi metodami symulacji wibroprasowania mieszanek ziarno-wilgotnych są metody wykorzystujące prasę żyratorową lub aparat Ekonoma. Oprócz formowania próbek do badań stwardniałych betonów możemy przy ich pomocy zarejestrować w czasie rzeczywistym przebiegi procesu zagęszczania. Takie zarejestrowane wyniki możemy później poddać obróbce przy pomocy narzędzi matematycznych a następnie analizować i porównywać wyniki otrzymane dla różnych składow mieszanek betonowych do wibroprasowania.

8. Literatura

- [1] PN-EN 1338:2005 „Betonowe kostki brukowe – Wymagania i metody badań”
- [2] Witold Brylicki „Kostka brukowa z betonu wibroprasowanego”, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 1998, Witold Brylicki „Właściwości betonowej kostki brukowej z betonu wibroprasowanego na mieszankach betonowych o niskiej zawartości cementu” Konferencja Naukowo – Techniczna „Dni Betonu 2004”, Wisła 2004,
- [3] G. Hüskens and H. J. H. Brouwers, “A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study,” Cem. Concr. Res., vol. 38, no. 10, pp. 1246–1259, 2008.
- [4] M. Al-Amin, L. Lavagna, and D. Bosia, “Non-structural vibro-compressed concrete incorporating industrial waste: A sustainable approach,” Sustainability, vol. 15, no. 2, p. 26, 2023.
- [5] Marchioni M., Lyra J., Oliveira C., Pileggi R. Metoda badania zagęszczenia mieszanek betonowych o konsystencji wilgotnej, ZBI 2013, nr 4, s. 50-60,
- [6] Mechtcherine V., Palzer U. Mieszanki betonowe o konsystencji wilgotnej – aktualny stan techniki i nauki, ZBI 2009, nr 6, s. 54-61,
- [7] „Plafstersteine aus Beton nach neuer Europäischer Norm DIN EN 1338“, Informationen für Planer, Ausführende, Baustoffhandel und Bauherren, Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG), Bonn, Juni 2005
- [8] Grzegorz Łój, Wiesława Nocuń-Wczelik, Use of Prefabrication, Construction and Demolition Wastes as an Aggregate in Vibropressed Precast Concrete Blocks Production, Journal of Civil Engineering and Construction 2022;11(1):20-28
- [9] Zalecenia IBDiM Udzielania Aprobata Technicznych Nr Z/96-03-002 „Betonowa kostka brukowa” wydanie II, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 1998
- [10] ASTM C29/C29M – „Standard Test Method for Bulk Density (‘Unit Weight’) and Voids in Aggregate
- [11] PN-EN 1338:2005 PN-EN 1338:2005/AC:2007 Betonowe kostki brukowe – wymagania i metody badań
- [12] ASTM C1435/C1435M-08 Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer
- [13] PN-EN 1097-2000. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości.