

XIII
KONFERENCJA

2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



dnibetonu.com

Redakcja: **Jan Deja**
Bartosz Głowacz
Paulina Gos-Błaszczyk
Patryk Jóźwiak
Dariusz Konieczny
Grzegorz Krechowicki
Zbigniew Pilch
Bożena Środa
Zespół SPC

Skład i łamanie tekstu,
opracowanie graficzne: **AD-LINE.PL**

Projekt: **Artur Darłak**

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:  **Stowarzyszenie Producentów Cementu**
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel. +48 12 423-33-55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl

XIII
KONFERENCJA

2025.

DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE
TECHNOLOGII
BETONU**

- REFERATY



dnibetonu.com

DROBNOWYMIAROWE ELEMENTY BETONOWE

SMALL-SIZED PRECAST CONCRETE PRODUCTS

dr inż. Grzegorz Łój
Zuzanna Liczberska
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
mgr inż. Michał Oleksik
mgr inż. Arkadiusz Ignierowicz
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.

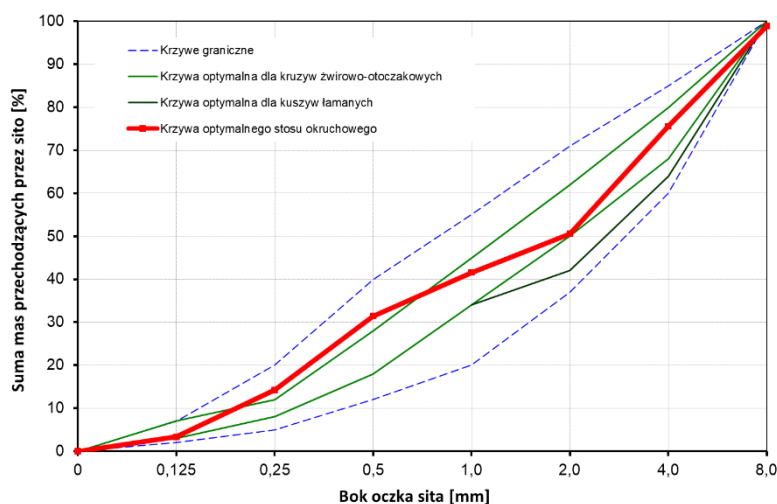
Zaznaczyć trzeba, że w rzeczywistości od tej wartości mogą być wyjątki spowodowane np. zastosowaniem wysokowodożądnych dodatków mineralnych (np. popiołów lotnych fluidalnych) i wtedy przy właściwym zaprojektowaniu całości mieszanki betonowej do wibroprasowania możemy prowadzić produkcję przy w/c równym 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:

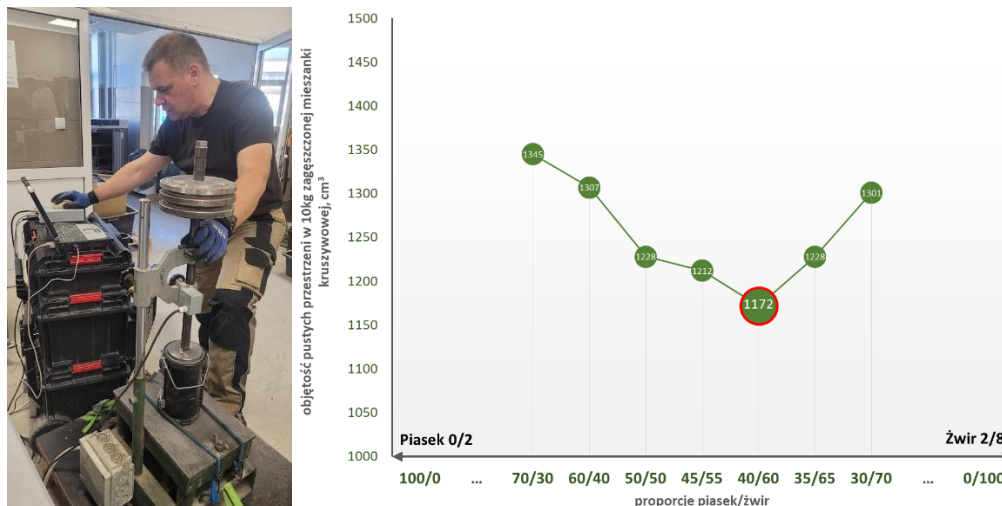
- v - oznacza jamistość wyrażoną w procentach
- ρ_p – oznacza gęstość nasypową w stanie zagęszczonym w megagramach na metr sześcienny
- ρ_b – oznacza gęstość ziarnową tej samej próbki kruszywa oznaczoną piknometrycznie wg procedury EN 1097-6 podaną w megagramach na metr

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 jaką daną metodą zagęszczania daje rozkład zagęszczenia na wysokości próbki oraz czy mieszanka betonowa skomponowana została w sposób umożliwiający 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.



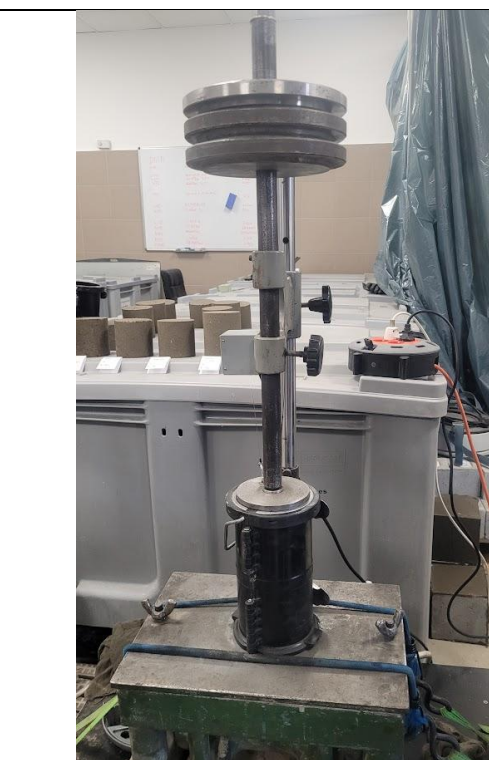
Rys.4. Zagęszczanie próbki przy pomocy młota uderowego



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.

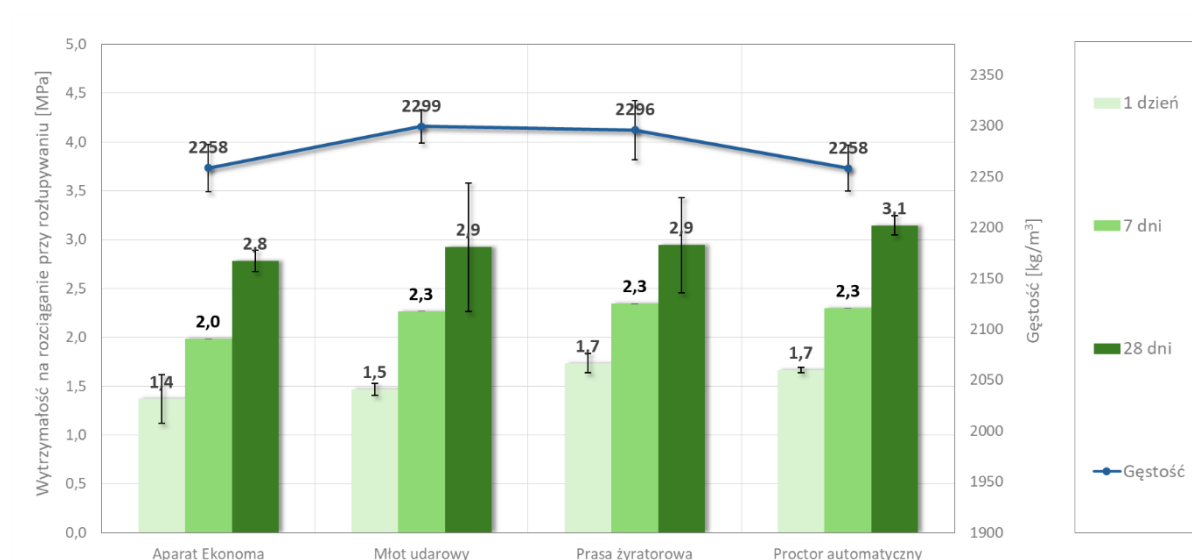
6. Porównanie skuteczności metod formowania próbek z mieszanek ziemisto-wilgotnych

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.

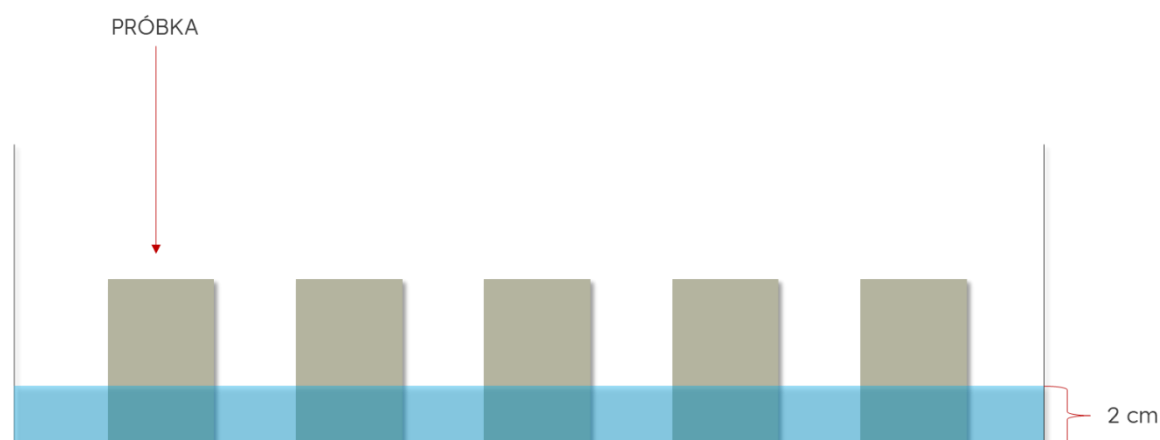
Oceniając otrzymane wyniki można ogólnie stwierdzić, że wszystkie te metody wypadły pporównywalnie, zarówno gęstości jak i wytrzymałości w poszczególnych terminach nie różniły się znacząco. Oczywiście ogromną rolę w końcowym wyniku wytrzymałości odgrywała sumaryczna energia zagęszczania. Najniższe wytrzymałości uzyskano wykorzystując aparat Ekonomia 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.



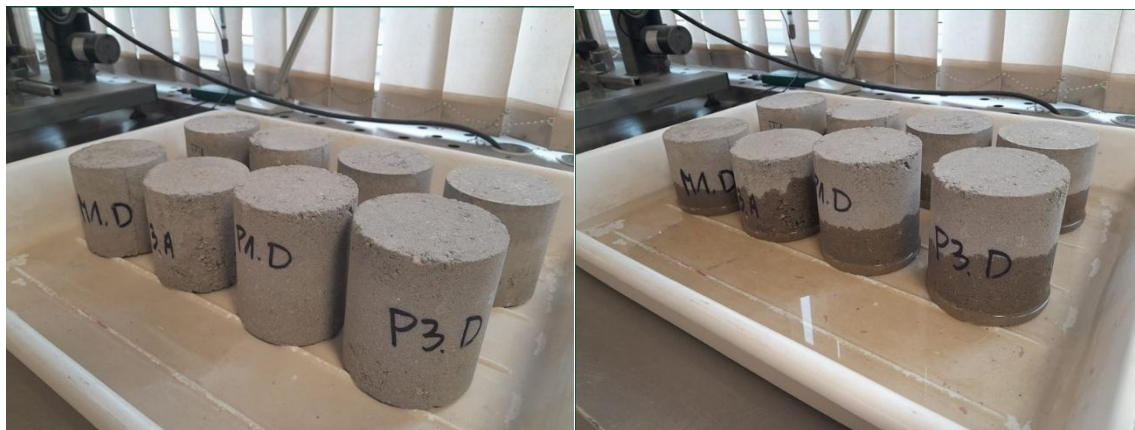
Rys. 10 Analiza wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek mieszanki ziemisto-wilgotnej zaformowanej 4 wybranymi metodami

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.



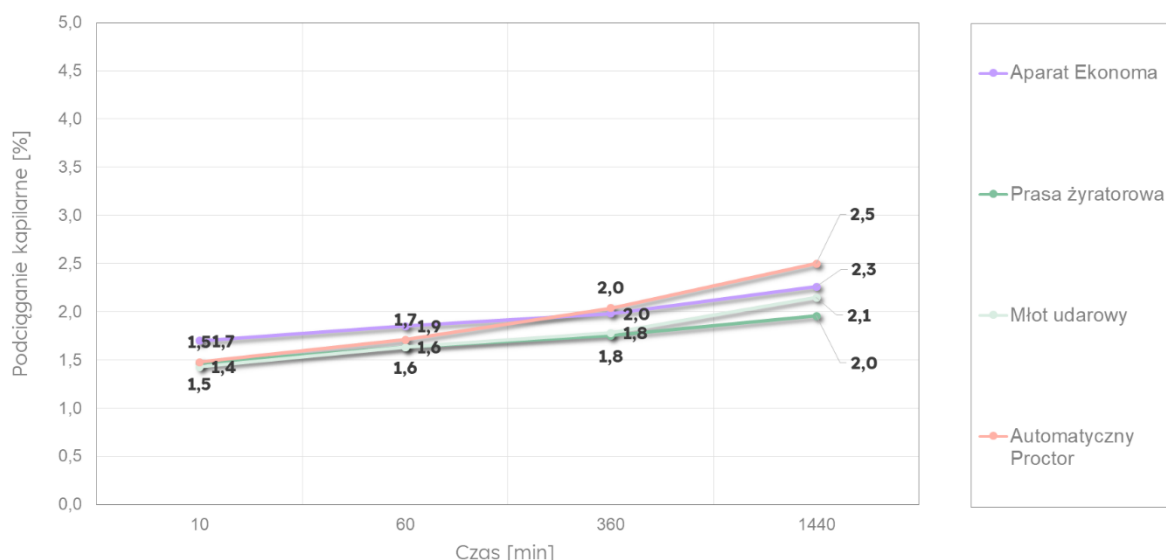
Rys. 10 Schemat testu podciągania kalpiarnego próbek betonów „wibroprasowanych”.

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.



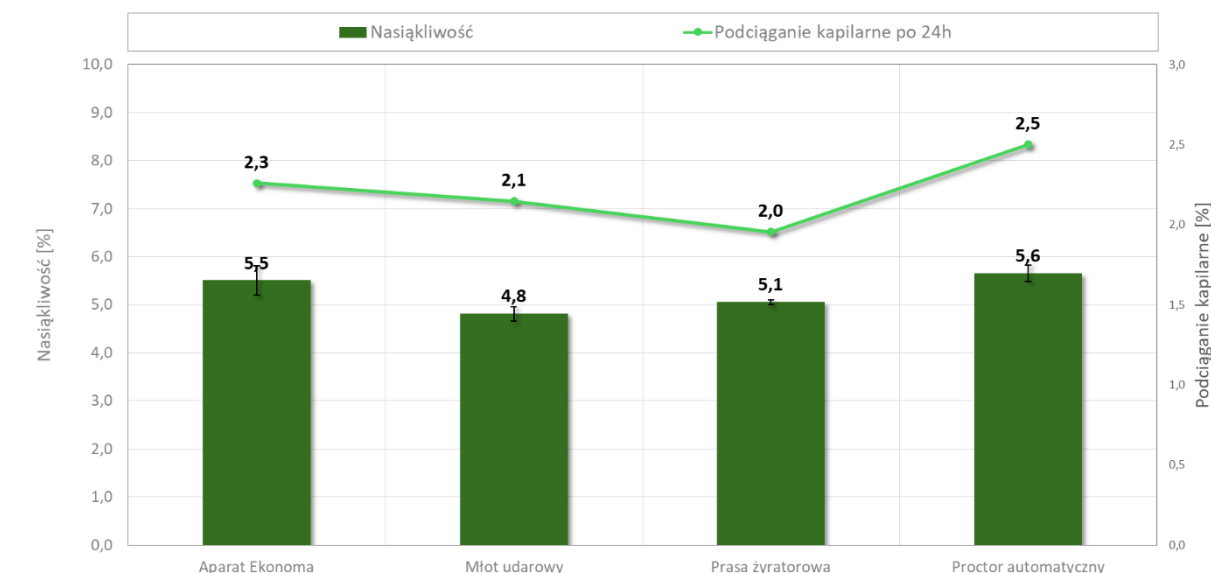
Rys 13. Wyniki testu podciągania kapilarnego

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 odładowających 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 składowi 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.

mgr inż. Piotr Molenda
Cement Ożarów S.A.

Praktyczne zastosowanie prasy żyratorowej w laboratoryjnym projektowaniu kostki brukowej

Practical application of a gyratory compactor in laboratory design of paving blocks

Streszczenie

Rynek elementów wibroprasowanych w Polsce odgrywa istotny udział w zapotrzebowaniu na surowce potrzebne do produkcji mieszanki betonowej. Ze względu na specyfikę wyrobów producenci wykorzystują mieszanki betonowe o niskim współczynniku w/c, co ze względów technicznych powoduje problemy przy laboratoryjnym sprawdzeniu receptury. Na ten moment technolodzy zmuszeni są przeprowadzać testy i sprawdzać parametry elementów wibroprasowanych „na żywym organizmie” w procesie produkcyjnym, co może wiązać się z powstaniem odpadu. Dodatkowo każde próby produkcyjne zakłócają pracę zmniejszając wydajność maszyny co wpływa na straty finansowe.

Jednym z rozwiązań może być użycie prasy żyratorowej, która umożliwia wykonanie próbek z mieszanki betonowej dedykowanej do produkcji elementów wibroprasowanych, w warunkach laboratoryjnych. Dzięki tej metodzie można symulować różne procesy produkcyjne, co pozwala na ocenę urabialności mieszanki oraz przygotowanie próbek do badań wytrzymałościowych i trwałościowych. Urządzenie dobrze spełnia oczekiwania do oceny dedykowanych surowców do produkcji elementów wibroprasowanych.

Przedmiotem referatu jest przedstawienie możliwości wykorzystania prasy żyratorowej do laboratoryjnego projektowania i kontroli parametrów mieszanek betonowych i elementów wibroprasowanych – głównie kostki brukowej. Plan badawczy obejmował wpływ ustawień urządzenia oraz użytych surowców na parametry wytrzymałościowe gotowego elementu.

Abstract

The vibropressed concrete element market in Poland plays a significant role in the demand for raw materials used in concrete mix production. Due to the specific nature of these products, manufacturers use concrete mixes with a low water-to-cement (w/c)

ratio, which, for technical reasons, creates challenges when verifying mix designs in laboratory conditions. Currently, technologists are forced to conduct tests and evaluate the parameters of vibropressed elements directly in the production process, which may result in waste generation. Moreover, each production trial disrupts the workflow, reducing machine efficiency and leading to financial losses.

One potential solution is the use of a gyratory compactor, which enables the preparation of samples from concrete mixes dedicated to vibropressed element production under laboratory conditions. This method allows for the simulation of various production processes, enabling the assessment of mix workability and the preparation of samples for strength and durability testing. The device effectively meets the requirements for evaluating raw materials intended for vibropressed concrete element production.

The subject of this paper is to present the potential of using a gyratory compactor for laboratory design and control of concrete mix parameters and vibropressed elements—primarily paving blocks. The research plan included the impact of device settings and raw materials used on the strength parameters of the final product.

CZĘŚĆ TEORETYCZNA

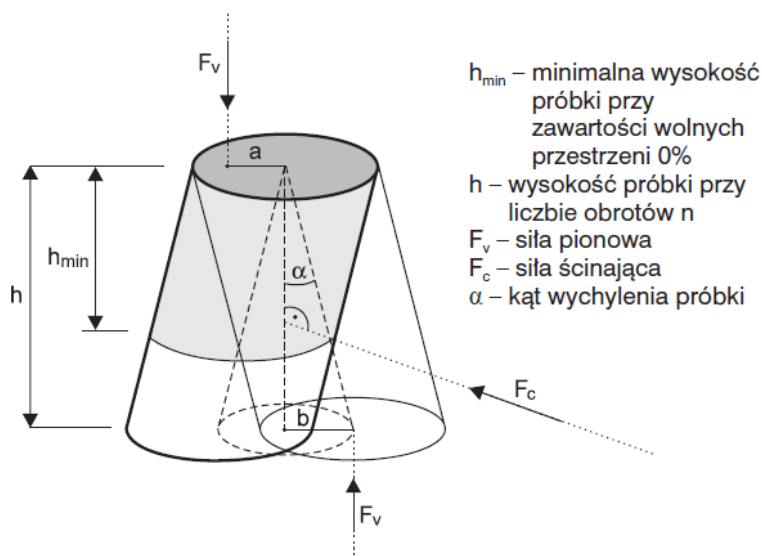
Prasa żyratorowa – zastosowanie, działanie i możliwości badawcze

Prasa żyratorowa to nowoczesne urządzenie badawcze, które umożliwia ocenę i optymalizację mieszanek betonowych stosowanych m.in. w produkcji elementów wibroprasowanych. W wyniku symulacji rzeczywistych warunków zagęszczania, urządzenie pozwala na precyzyjne i powtarzalne odwzorowanie procesów technologicznych. Kluczowym elementem działania prasy jest ruch żyroskopowy próbki, który umożliwia analizę wpływu różnych parametrów na właściwości mieszanki i gotowego wyrobu [1, 2].

Urządzenie (Rysunek 1) pozwala na ocenę mieszanek betonowych o niskim stosunku woda/cement (w/c), umożliwiając wykrycie nawet niewielkich różnic w składzie. Możliwe jest badanie wpływu poszczególnych składników na właściwości. Proces zagęszczania odbywa się poprzez równomierne, obrotowe ruchy formy oraz działanie sił ściskających i ścinających, co powoduje przesunięcie osi próbki i uformowanie stożkowej powierzchni w miejscu obrotu (Rysunek 2) [1, 2].



Rysunek 1. Prasa żyratorowa [2]



Rysunek 2. Schemat widoku zagęszczania żyratorowego [1]

W praktyce mieszanka betonowa umieszczana jest w cylindrycznej formie, która następnie poddawana jest ustalonej sile nacisku. Forma może obracać się z regulowaną prędkością, a kąt nachylenia osi próbki może wynosić od 0 do 3°. Ruch ten sprawia, że oś próbki zatacza stożkowy tor, a cały proces jest monitorowany i rejestrowany przez system pomiarowy [2].

Zakres techniczny i możliwości konfiguracyjne prasy żyratorowej:

- Pionowa siła docisku: 25–2200 kPa (dla formy $\varnothing 100$ mm),
- Prędkość obrotowa: 5–120 obrotów/minutę,
- Kąt nachylenia próbki: 0-3°,
- Typy zagęszczania: cykle/wysokość/gęstość,
- Wysokość próbki: 50–200 mm.

Użytkownik może dostosować parametry pracy urządzenia do konkretnych potrzeb – zarówno na podstawie gotowych wzorców (np. NT BUILD 427), jak i własnych ustawień. Prasa żyratorowa umożliwia ocenę właściwości reologicznych mieszanki, takich jak urabialność, porowatość oraz czas zachowania parametrów roboczych. Na przygotowanych próbkach można przeprowadzać również badania wytrzymałościowe (na ściskanie, rozłupywanie) oraz trwałościowe (nasiąkliwość, mrozoodporność, ścieralność).

Dzięki tym możliwościom prasa żyratorowa stanowi cenne narzędzie w laboratoriach badawczych i kontrolnych, pozwalając na weryfikację nowych surowców oraz

optymalizację składu mieszanek betonowych jeszcze przed wdrożeniem ich do produkcji.

Metoda badania zagęszczalności betonu według NT BUILD 427

Na rynku dostępny jest dokument NT BUILD 427, który służy do oceny zagęszczalności wilgotnych mieszanek betonowych przy użyciu wskaźnika ICT (Intensive Compaction Tester). Metoda ta polega na zagęszczaniu próbki poprzez jednoczesne działanie siły docisku i cyklicznego ścinania. Wynikiem testu jest wskaźnik ICT, określający ilość pracy (iloczyn siły i liczby cykli) potrzebną do osiągnięcia wymaganej gęstości próbki [3].

Metoda znajduje zastosowanie w przypadku mieszanek betonowych o opadzie stożka mniejszym niż 2 cm lub czasie VeBe powyżej 5 sekund. Jest szczególnie przydatna w produkcji betonu z tzw. „wilgotnych mieszanek” [3].

Podczas testu próbka poddawana jest naciskowi i ścinaniu – jeden cykl ICT odpowiada pełnemu obrotowi mimośrodowej osi. W trakcie badania mierzona jest wysokość próbki, na podstawie której obliczana jest jej gęstość [3].

Kluczowym momentem testu jest osiągnięcie tzw. granicy zawiesiny – momentu, w którym z próbki zaczyna wydzielać się zawiesina (mieszanina wody, drobnych frakcji i domieszek). Jej pojawienie się oznacza zakończenie efektywnego zagęszczania [3].

Procedura testowa zgodnie z NT BUILD 427:

- Siła nacisku: 4 bary (160 kPa w cylindrze roboczym),
- Prędkość obrotowa: 60 obr./min (opcjonalnie 120 obr./min),
- Test rozpoczyna się 5 minut po dodaniu wody,
- Wysokość próbki po zagęszczeniu: 100–110 mm,
- Zakończenie testu: automatyczne lub ręczne – po osiągnięciu określonej liczby cykli, wymaganej gęstości lub pojawieniu się zawiesiny

Po zakończeniu procesu, próbki są ważone i przechowywane przez 24 godziny w plastikowych torbach, w warunkach wilgotności względnej powyżej 95% i temperaturze 20 ± 2 °C. Następnie można przeprowadzić badania wytrzymałości na ściskanie lub rozłupywanie [3].

Praktyczne zastosowanie pracy żyratorowej do projektowania oraz symulacji produkcji elementów wibroprasowanych

Analizując dokument NT BUILD 427 oraz posiadając wiedzę o procesie produkcji kostki wibroprasowanej, należy doświadczalnie określić optymalne ustawienia prasy żyratorowej - wykorzystując pełen zakres dostępnych parametrów maszyny. Dla producentów kostki brukowej kluczowym czynnikiem jest czas, czyli wykonanie jak

największej liczby cykli w możliwie najkrótszym czasie, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości wyrobu.

Uwzględniając ten aspekt - sposób formowania (liczba cykli, wysokość, gęstość) powinien być tak dobrany, aby w krótkim czasie osiągnąć wymaganą gęstość próbki. Ze względu na różnice między procesem zagęszczania w prasie żyratorowej (działanie siły pionowej i ścinającej), a procesem produkcji w wibroprasie (siła pionowa i wibracje), należy przyjąć taki czas zagęszczania, który zapewni efektywne odwzorowanie warunków produkcyjnych.

Dodatkowo, podczas badań laboratoryjnych należy przyjąć docelową gęstość próbki, możliwie jak najbardziej zbliżoną do gęstości elementów uzyskiwanych w rzeczywistej produkcji wibroprasowanej.

Zastosowanie prasy żyratorowej z indywidualnie dobranymi ustawieniami umożliwia powtarzalne wykonywanie próbek, które pozwalają na ocenę zastosowanych składników – cementów, dodatków, kruszyw czy domieszek chemicznych. Ponadto możliwa jest ocena wyglądu próbki (np. zaciąg), właściwości reologicznych, a także – w zależności od potrzeb – przeprowadzenie badań wytrzymałościowych i trwałościowych.

Podczas wykonywania prób na prasie żyratorowej najczęściej formuje się poszczególne warstwy elementów wibroprasowanych, takie jak warstwa konstrukcyjna (kern) oraz warstwa licowa (vorsatz). Zastosowanie prasy żyratorowej sprawdza się szczególnie dobrze przy optymalizacji i ocenie surowców wykorzystywanych w obu warstwach.

Możliwe jest również wykonanie elementu dwuwarstwowego - jednak wymaga to precyzyjnego skoordynowania przygotowania dwóch mieszanek o odpowiedniej wilgotności oraz właściwego sposobu ich umieszczania w cylindrycznej formie.

Ocena kostki betonowej wibroprasowanej zgodnie z PN-EN 1338:2005

Producenci kostki brukowej wibroprasowanej obecnie wytwarzają elementy zgodne z normą PN-EN 1338:2005, która określa wymagania dotyczące materiałów, właściwości oraz metod badań gotowych wyrobów [4].

Zgodnie z możliwościami prasy żyratorowej, wykonane próbki mogą być poddawane następującym badaniom:

- Aspekty wizualne
Ocena kolorystyczna warstwy licowej (barwiona lub nie) oraz ocena braku rozwarstwienia między warstwami.
- Wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupaniu
Wartość charakterystyczna nie powinna być mniejsza niż 3,6 MPa [4].
- Nasiąkliwości [4]

Tabela 1. Klasy nasiąkliwości zgodnie z normą PN-EN 1338.

Klasa	Znakowanie	Nasiąkliwość, % masy
1	A	Nie określa się
2	B	Wartość średnia ≤ 6

- Odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzającej [4]

Tabela 2. Klasa odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli zgodnie z PN-EN 1338.

Klasa	Znakowanie	Ubytek masy po badaniu zamrażania/rozmarzania kg/m ²
3	D	Wartość średnia $\leq 1,0$ przy czym żaden pojedynczy wynik $> 1,5$

- Odporności na ścieranie [4]

Tabela 3. Klasy odporności na ścieranie zgodnie z PN-EN 1338.

Klasa	Znakowanie	Wymaganie	
		Szeroka tarcza ścierna	Tarcza Böhme
1	F	Nie określa się	Nie określa się
3	H	≤ 23 mm	$\leq 20\,000$ mm ³ /5 000 m ²
4	I	≤ 20 mm	$\leq 18\,000$ mm ³ /5 000 m ²

Niewątpliwie zastosowanie prasy żyratorowej umożliwia przeprowadzenie pełnego zakresu badań wytrzymałościowych i trwałościowych na próbkach laboratoryjnych odwzorowujących kostkę brukową. Jedynym ograniczeniem jest uzyskanie odpowiedniej liczby próbek z jednej partii mieszanki betonowej, aby spełnić wymagania ilościowe dla poszczególnych badań.

CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

1. Ocena właściwości użytkowych warstwy konstrukcyjnej kostki brukowej

Prasa żyratorowa oferuje szerokie możliwości w zakresie laboratoryjnej oceny przydatności poszczególnych składników wykorzystywanych do produkcji warstwy konstrukcyjnej elementów wibroprasowanych. Próbki wytwarzane w warunkach laboratoryjnych służą głównie do badań wytrzymałościowych oraz oceny nasiąkliwości.

W części literaturowej przywołano normę NT BUILD 427, która nakreśla procedurę badawczą. Natomiast w części praktycznej przedstawiono możliwość doboru i

zastosowania własnych ustawień oraz wyniki uzyskane przy wykorzystaniu różnych konfiguracji prasy żyratorowej. Zmieniane parametry obejmowały:

- Siłę nacisku,
- Liczbę cykli obrotów,
- Gęstość/wysokość próbki – wartości te są tożsame, ponieważ masa mieszanki umieszczanej w cylindrze formującym jest stała,
- Prędkość obrotowa: 60 obrotów/minutę,
- Kąt nachylenia próbki – zgodny z wymaganiami normy NT BUILD 427.

W tej części pracy zaprezentowano potencjalne możliwości wykorzystania różnych ustawień prasy do badań materiałowych.

W zakresie badań wytrzymałościowych wykonywane są m.in. testy na ściskanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu. Dzięki możliwości formowania próbek o wysokości od 50 do 200 mm, można je dostosować zarówno do wymagań badawczych, jak i do wymiarów typowych kostek brukowych.

- Próbki przeznaczone do badań wytrzymałości na ściskanie formowano do wysokości 100 mm.
- Próbki do badań rozciągania przy rozłupywaniu miały wysokość 80 mm, a siła podczas badania była przykładana w kierunku formowania – analogicznie jak w przypadku badań kostki brukowej wibroprasowanej.

Istotnym czynnikiem podczas badań jest gęstość otrzymywanej próbki. Aby możliwie najlepiej odwzorować warunki produkcyjne, należy dostosować gęstość próbki do wartości charakterystycznych dla elementów wytwarzanych w warunkach przemysłowych.

Wytrzymałość mechaniczna próbek jest określana m.in. po 1, 7, 28 oraz 56 dniach dojrzewania. Wynik uzyskany po 1 dniu pozwala ocenić możliwość zwolnienia elementów z produkcji do dalszych etapów, takich jak pakowanie.

a) Wyniki wpływu siły docisku na wytrzymałość na ściskanie przy formowaniu próbek o stałej wysokości

Aby skutecznie i efektywnie zagęścić próbkę, należy odpowiednio dobrać siłę docisku stosowaną podczas procesu zagęszczania. Poniżej przedstawiono wpływ siły docisku na wytrzymałość na ściskanie przy założonej, stałej wysokości próbki.

Założenia zagęszczania:

- Wysokość próbki: 100 mm, (co odpowiada gęstości elementu na poziomie 2400 kg/m³).
- Siła docisku: 160, 240, 320, 400, 480, 560 kPa.

Analizowane parametry:

- Liczba cykli potrzebnych do osiągnięcia zadanej wysokości (wartości minimalne, maksymalne oraz średnie).

- Wytrzymałość na ściskanie po 1, 7 i 28 dniach dojrzewania.

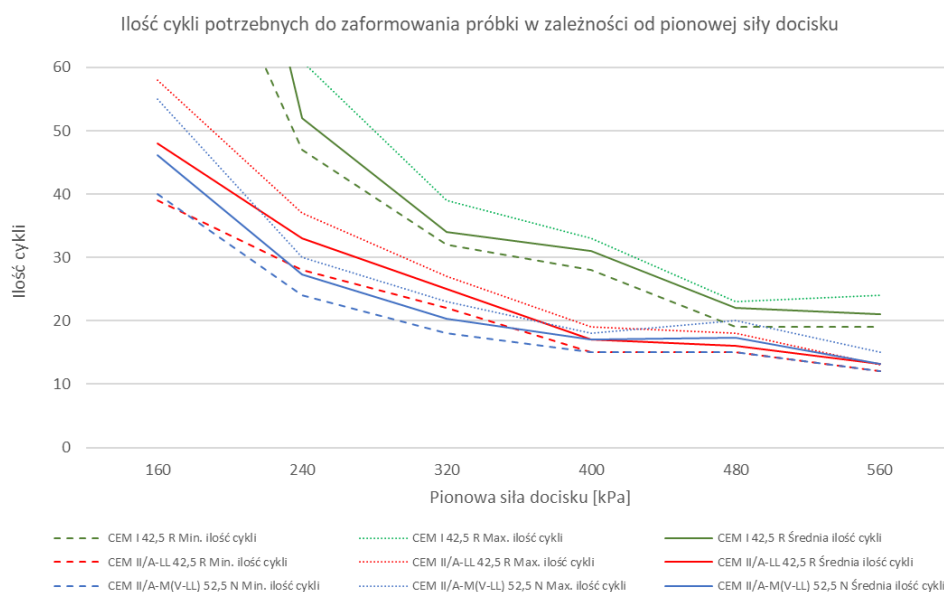
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- Wilgotność względna: $\geq 95\%$.
- Temperatura: $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Receptura warstwy konstrukcyjnej była identyczna dla wszystkich próbek, z wyjątkiem rodzaju zastosowanego cementu. Zastosowane rodzaje cementu (Cement Ożarów S.A.):

- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/A-LL 42,5 R

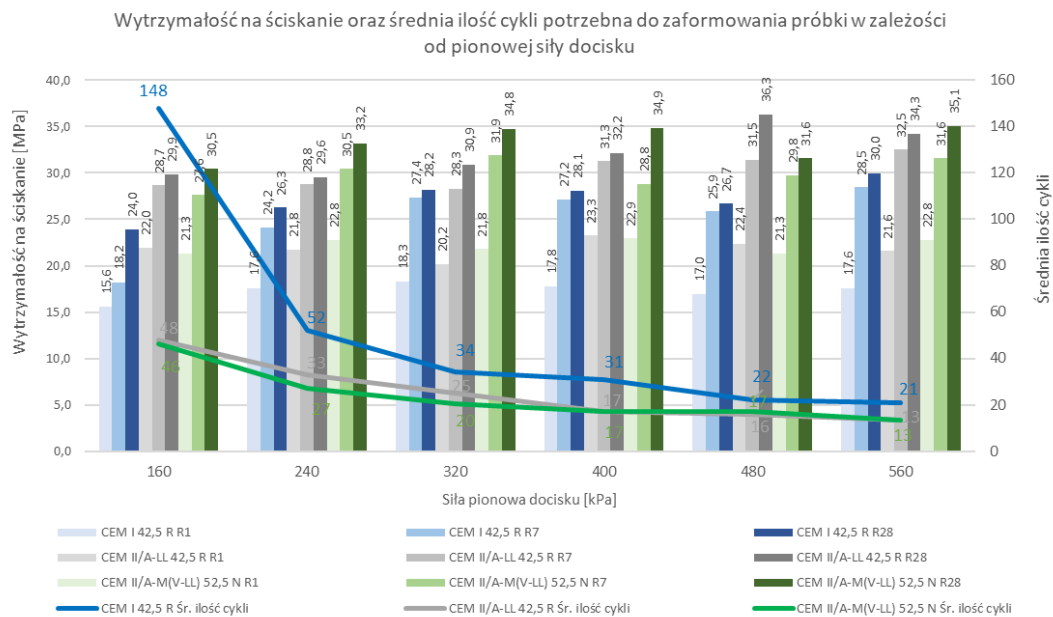
Na rysunku 3 przedstawiono liczbę cykli potrzebnych do osiągnięcia wysokości próbek 100 mm w zależności od zastosowanej siły docisku podczas zagęszczania.



Rysunek 3. Ilość cykli w zależności od pionowej siły docisku

Uzyskane wyniki wykazują zależność procesu zagęszczania mieszanki od rodzaju zastosowanego cementu oraz poziomu siły docisku użytej podczas formowania próbki.

Dla przyjętych wariantów zagęszczania przeprowadzono również badania wytrzymałości na ściskanie, których wyniki przedstawiono na rysunku 4. Dodatkowo, na wykresie zamieszczono średnią liczbę cykli potrzebnych do osiągnięcia wymaganej wysokości próbki dla każdego rodzaju cementu, w zależności od zastosowanej siły docisku.



Rysunek 4. Wyniki wytrzymałości na ściskanie wraz ze średnimi ilościami cykli

Przy zastosowaniu różnych sił docisku, przy jednocześnie niezmienionej recepturze mieszanki, zaobserwowano istotne różnice w uzyskiwanych wartościach wytrzymałości na ściskanie. Jednym z czynników wpływających na te wyniki może być liczba cykli zagęszczania, która decyduje o stopniu ułożenia się mieszanki w cylindrze formującym. Zbyt duża przyjęta siła docisku może spowodować trudności przy ocenie tendencji do łatwości zagęszczenia próbki.

b) Wytrzymałość na ściskanie przy stałej sile docisku oraz wysokości

Utrzymując stałą wysokość próbki, a tym samym zapewniając jej stałą gęstość, możliwa jest wiarygodna ocena wpływu zmian poszczególnych składników mieszanki. W analizowanym przypadku jedyną zmienną był rodzaj zastosowanego cementu. Obserwowano liczbę cykli potrzebnych do osiągnięcia wymaganej wysokości, co odzwierciedla właściwości reologiczne mieszanki. Dodatkowo przeanalizowano wyniki wytrzymałości na ściskanie.

Założenia zagęszczania:

- Wysokość próbki: 100 mm, (co odpowiada gęstości elementu na poziomie 2365 kg/m³).
- Siła docisku: 320 kPa.

Analizowane parametry:

- Liczba cykli potrzebnych do osiągnięcia zadanej wysokości (wartości minimalne, maksymalne oraz średnie).
- Wytrzymałość na ściskanie po 1, 7, 28 i 56 dniach dojrzewania.

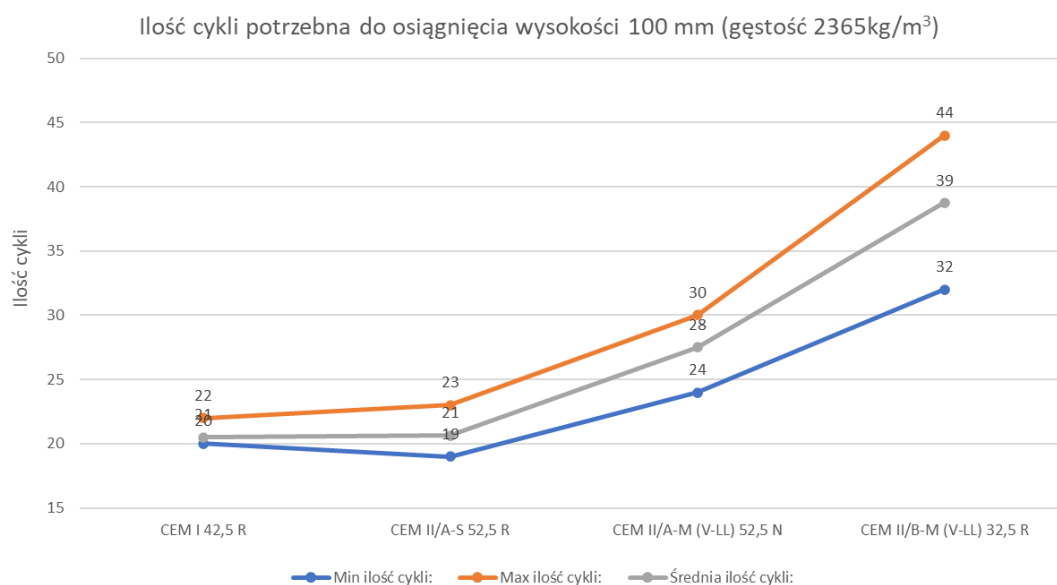
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- Wilgotność względna: $\geq 95\%$.
- Temperatura: $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Receptura warstwy konstrukcyjnej była identyczna dla wszystkich próbek, z wyjątkiem rodzaju zastosowanego cementu. Zastosowane rodzaje cementu (Cement Ożarów S.A.):

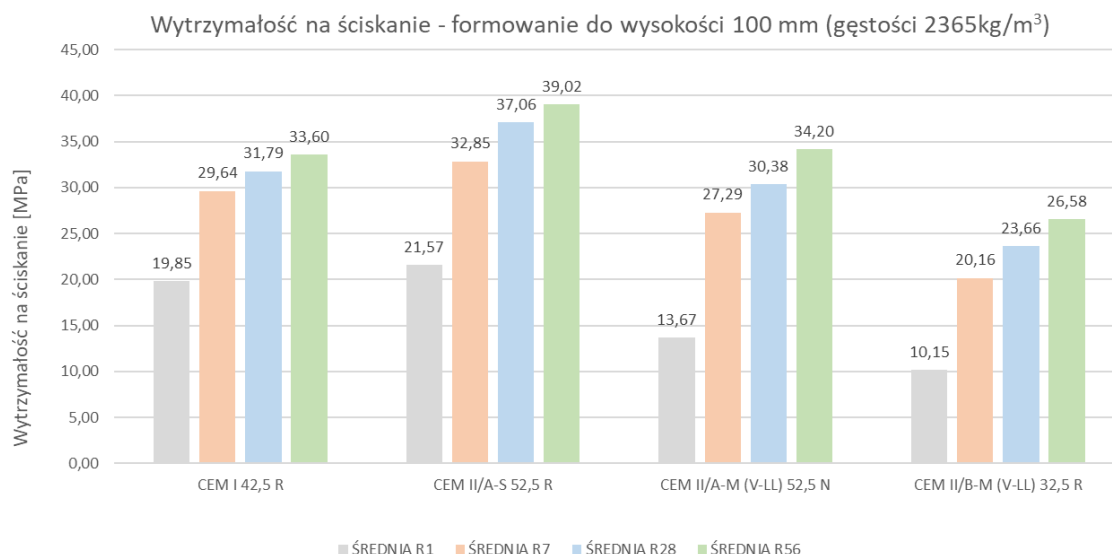
- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R

Rysunek 5 przedstawia liczbę cykli potrzebnych do osiągnięcia zadanej wysokości próbki. Zależnie od rodzaju zastosowanego cementu, widoczne są różnice w właściwościach reologicznych mieszanek betonowych.



Rysunek 5. Ilość cykli do osiągnięcia wysokości w zależności od wykorzystanego cementu

Liczba cykli zagęszczania oraz rodzaj zastosowanego cementu mają istotny wpływ na wytrzymałość na ściskanie zarówno we wczesnych, jak i późniejszych etapach dojrzewania próbek. Rysunek 6 przedstawia wyniki badań wytrzymałości na ściskanie dla przyjętych parametrów formowania.



Rysunek 6. Wytrzymałość na ściskanie przy stałej wysokości

c) Wytrzymałość na ściskanie przy stałej sile docisku oraz ilości cykli

W tradycyjnej produkcji formowanie próbek odbywa się w określonym czasie. W warunkach laboratoryjnych zastosowanie żyropasy umożliwia ocenę wpływu danej receptury na uzyskiwaną gęstość oraz wytrzymałość na ściskanie w zadanym czasie, wyrażonym liczbą cykli zagęszczania. Ponieważ wytrzymałość próbek jest ściśle powiązana z ich gęstością, jednoznaczne określenie wpływu poszczególnych składników mieszanki na właściwości mechaniczne końcowych wyrobów staje się trudne, zwłaszcza przy założeniu stałości pozostałych parametrów receptury. W niniejszej części przedstawiono wpływ liczby cykli zagęszczania na uzyskiwaną gęstość próbek oraz ich wytrzymałość na ściskanie.

Założenia zagęszczania:

- Liczba cykli: 20.
- Siła docisku: 320 kPa.

Analizowane parametry:

- Wysokość próbki, co przekłada się na uzyskanie różnych gęstości próbki,
- Wytrzymałość na ściskanie po 1, 7, 28 i 56 dniach dojrzewania.

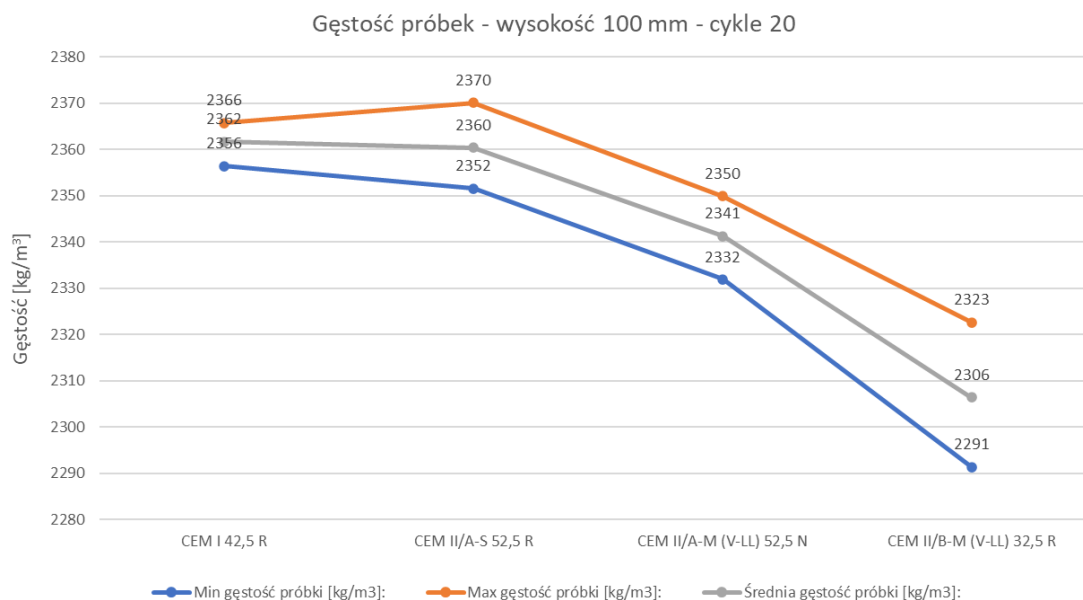
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- Wilgotność względna: $\geq 95\%$.
- Temperatura: $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Receptura warstwy konstrukcyjnej była identyczna dla wszystkich próbek, z wyjątkiem rodzaju zastosowanego cementu. Zastosowane rodzaje cementu (Cement Ożarów S.A.):

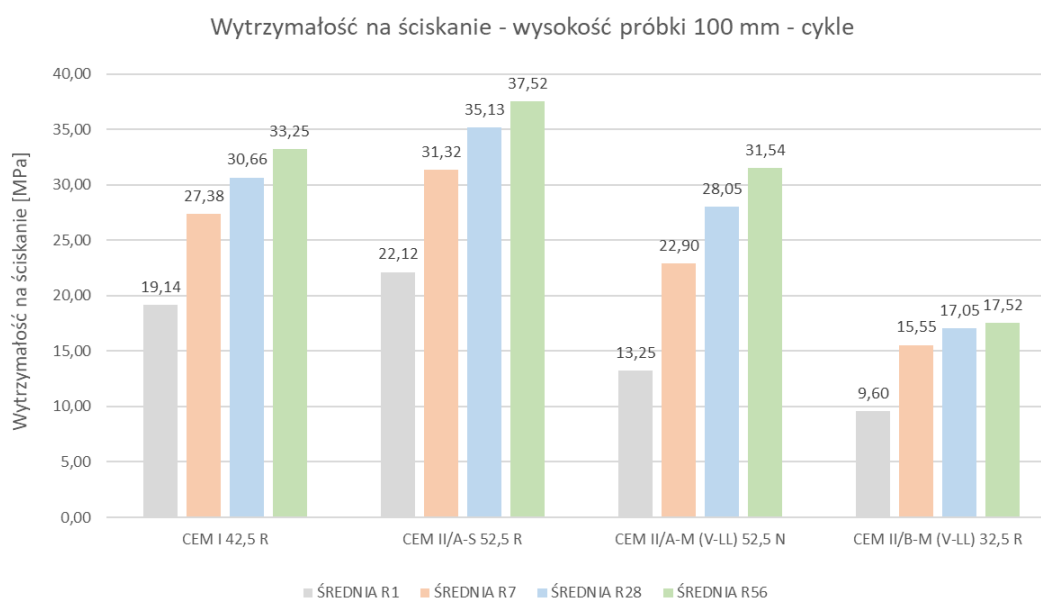
- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R

W zależności od rodzaju zastosowanego cementu, przy stałej liczbie cykli zagęszczania (20 cykli), uzyskiwane są różne wysokości próbek, co przekłada się na zróżnicowaną gęstość materiału. Rysunek 7 przedstawia porównanie otrzymanych gęstości dla poszczególnych cementów.



Rysunek 7. Gęstości próbek przy 20 cyklach w zależności od wykorzystanego cementu

Jak wcześniej wspomniano, istnieje ścisła zależność między gęstością elementu a jego właściwościami mechanicznymi. Rysunek 8 przedstawia wytrzymałość na ściskanie w zależności od rodzaju cementu, przy formowaniu próbek w stałej liczbie 20 cykli.



Rysunek 8. Wytrzymałość na ściskanie po 20 cyklach zagęszczania

d) Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu przy stałej sile docisku oraz wysokości

Kolejną możliwością jest wykorzystanie próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Ze względu na mniejszą wysokość próbek (80 mm), liczba cykli potrzebnych do osiągnięcia wymaganej gęstości ulega zmianie. Pomimo zachowania tej samej gęstości, różnica w wysokości wpływa na przebieg procesu zagęszczania.

Założenia zagęszczania:

- Wysokość próbki: 80 mm, (co odpowiada gęstości elementu na poziomie 2365 kg/m³).
- Siła docisku: 320 kPa.

Analizowane parametry:

- Liczba cykli potrzebnych do osiągnięcia zadanej wysokości (wartości minimalne, maksymalne oraz średnie).
- Wytrzymałość na rozłupywanie przy rozciąganiu po 1, 7, 28 i 56 dniach dojrzewania.
- Nasiąkliwość.

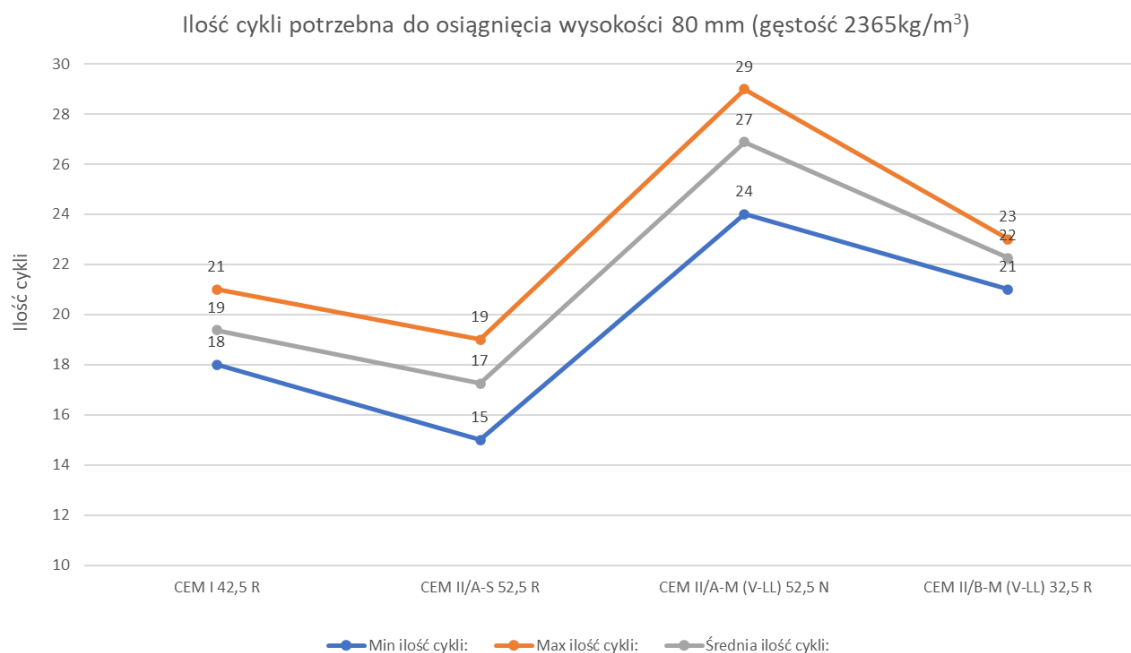
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- Wilgotność względna: $\geq 95\%$.
- Temperatura: $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Receptura warstwy konstrukcyjnej była identyczna dla wszystkich próbek, z wyjątkiem rodzaju zastosowanego cementu. Zastosowane rodzaje cementu (Cement Ożarów S.A.):

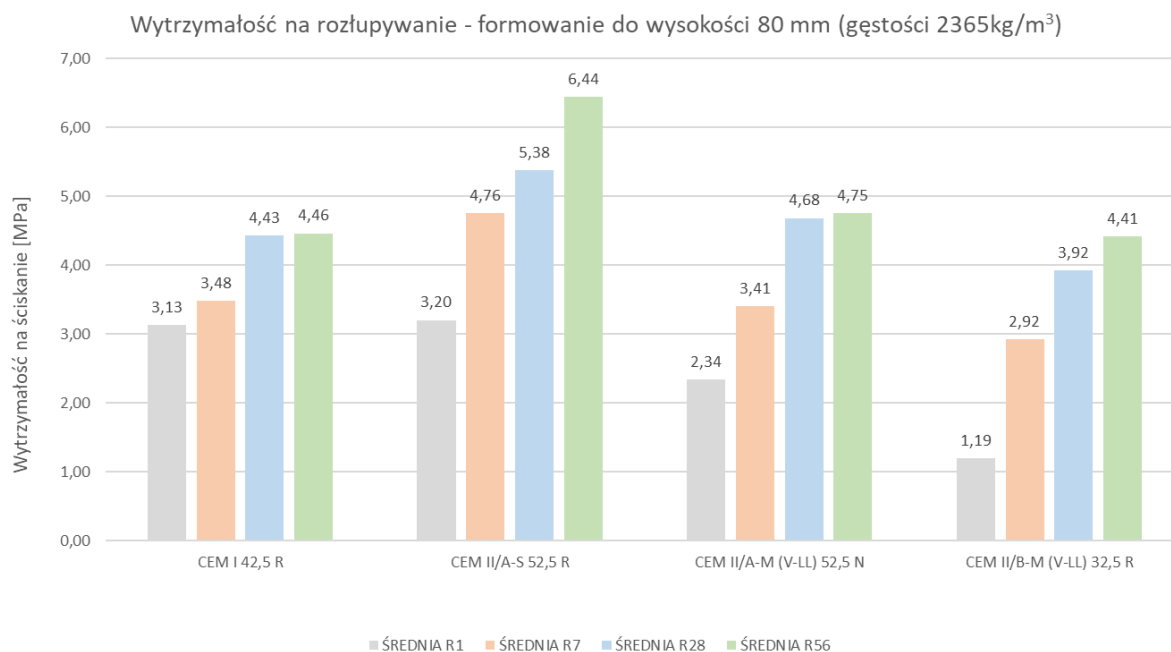
- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R

W zależności od rodzaju zastosowanego cementu obserwuje się różnice w zagęszczalności mieszanki, co znajduje odzwierciedlenie w liczbie cykli potrzebnych do osiągnięcia wymaganej gęstości. Parametry te zostały przedstawione na rysunku 9.



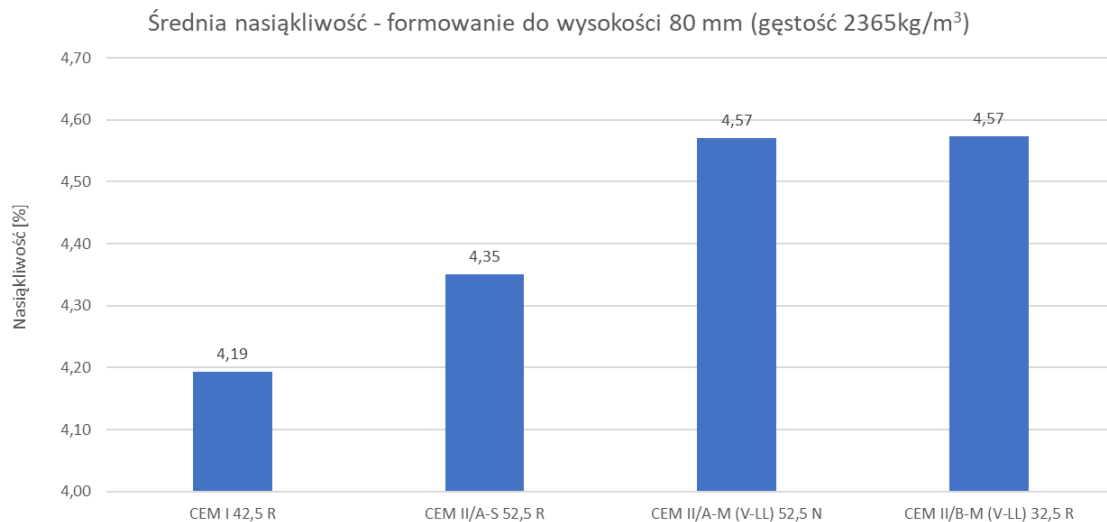
Rysunek 9. Ilość cykli potrzebna do zagęszczenia próbek 80 mm w zależności od rodzaju cementu

Zastosowane surowce mają istotny wpływ na wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Na rysunku 10 przedstawiono wartości wytrzymałości w zależności od rodzaju użytego cementu, przy zachowaniu stałej gęstości próbek.



Rysunek 10. Wytrzymałość na ściskanie w zależności od rodzaju cementu przy stałej gęstości

W produkcji elementów wibroprasowanych jednym z istotnych parametrów jest nasiąkliwość gotowych wyrobów. Dzięki zastosowaniu prasy żyratorowej w warunkach laboratoryjnych możliwe jest określenie tego parametru. Rysunek 11 przedstawia wyniki nasiąkliwości próbek o stałej gęstości, w zależności od rodzaju zastosowanego cementu.



Rysunek 11. Wyniki nasiąkliwości próbek przy stałej gęstości w zależności od rodzaju cementu

e) Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu przy stałej sile docisku oraz ilości cykli

Podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu jest ściśle powiązana z gęstością próbki uzyskaną po 20 cyklach zagęszczania.

Założenia zagęszczania:

- Liczba cykli: 20.
- Siła docisku: 320 kPa.

Analizowane parametry:

- Wysokość próbki, co przekłada się na uzyskanie różnych gęstości próbki.
- Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 1, 7, 28 i 56 dniach dojrzewania.
- Nasiąkliwość.

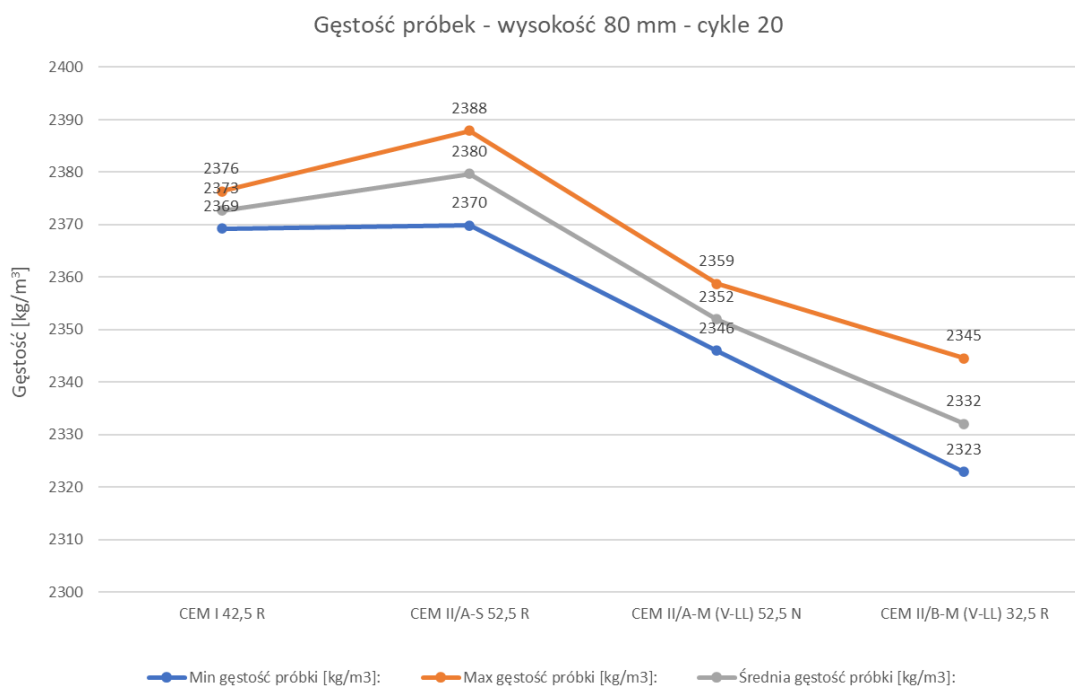
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- Wilgotność względna: $\geq 95\%$.
- Temperatura: $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Receptura warstwy konstrukcyjnej była identyczna dla wszystkich próbek, z wyjątkiem rodzaju zastosowanego cementu. Zastosowane rodzaje cementu (Cement Ożarów S.A.):

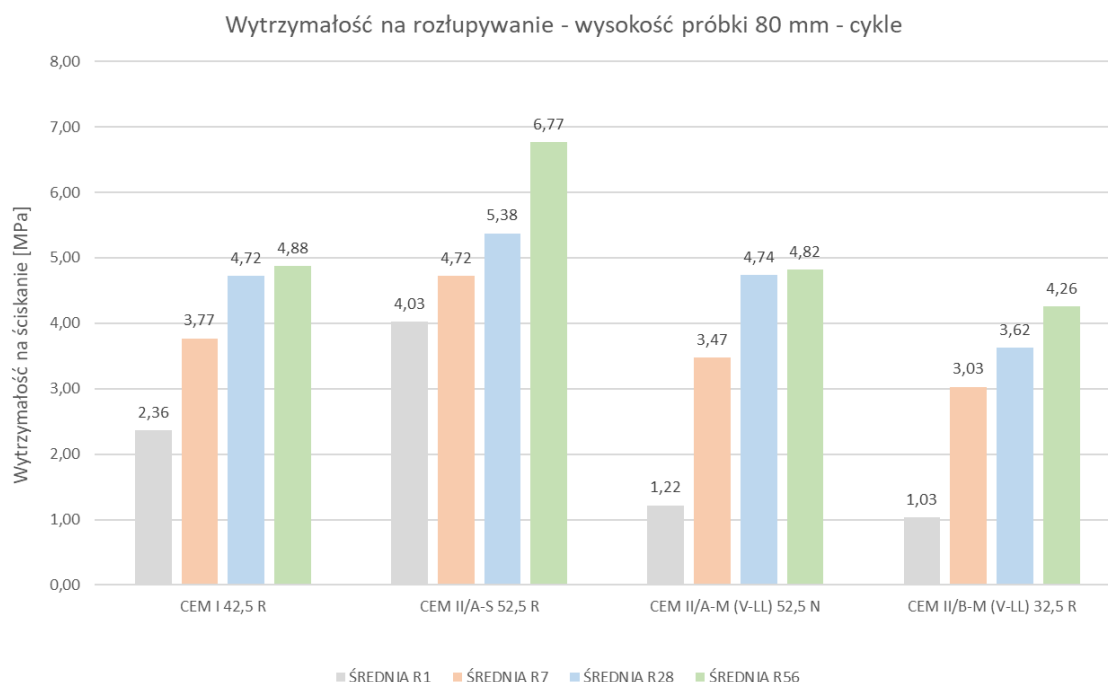
- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R

W zależności od rodzaju zastosowanego cementu, przy stałej liczbie cykli zagęszczania (20 cykli), uzyskiwane są różne wysokości próbek, co przekłada się na zróżnicowaną gęstość materiału. Rysunek 12 przedstawia porównanie otrzymanych gęstości dla poszczególnych cementów.



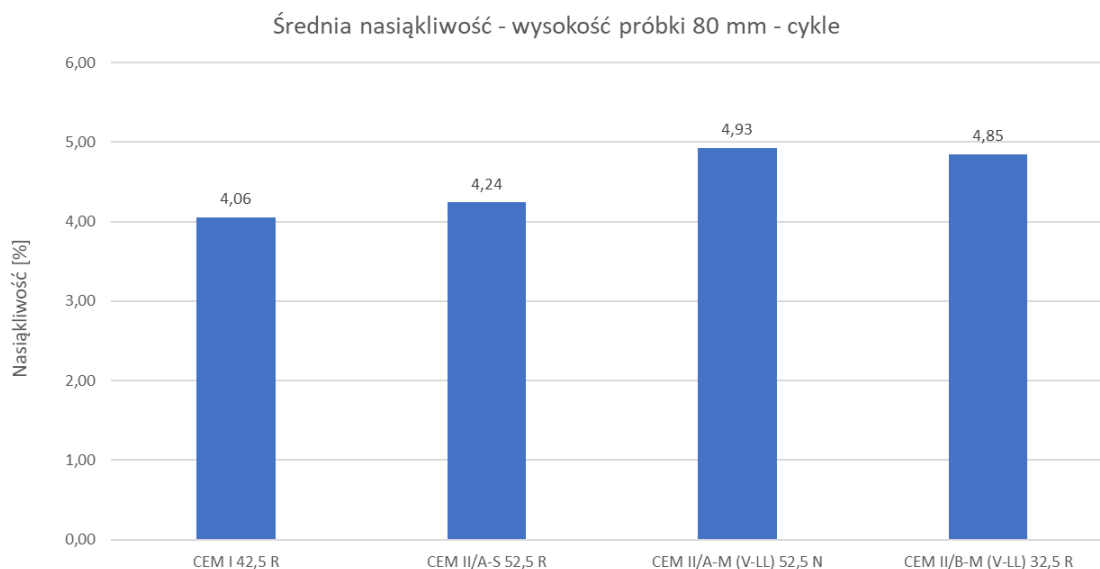
Rysunek 12. Gęstości próbek przy 20 cyklach w zależności od wykorzystanego cementu

Gęstość próbki wpływa na uzyskiwane poziomy wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zgodnie rysunkiem 13.



Rysunek 13. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 20 cyklach zagęszczania

Dla analizowanego przypadku przeprowadzono również badania nasiąkliwości, których wyniki przedstawiono na rysunku 14. Uzyskane wartości są powiązane z gęstością próbek.



Rysunek 14. Nasiąkliwość po 20 cyklach w zależności od rodzaju cementu

Na podstawie przeprowadzonych badań można jednoznacznie stwierdzić, że zastosowanie prasy żyratorowej, wraz z możliwością indywidualnego dostosowania parametrów, stanowi skuteczne narzędzie do laboratoryjnej oceny właściwości

surowców wykorzystywanych w konstrukcyjnej warstwie kostki brukowej. Uzyskane wyniki nie tylko umożliwiają dokładną analizę wpływu poszczególnych składników na końcowe właściwości produktu, ale również mogą stanowić podstawę do optymalizacji receptur stosowanych w procesie produkcyjnym, prowadząc do poprawy jakości oraz efektywności technologicznej.

Wyniki przedstawione w punktach b–e opierają się na jednej recepturze mieszanki, w której zmiennym czynnikiem był wyłącznie rodzaj zastosowanego cementu (CEM I 42,5 R, CEM II/A-S 52,5 R, CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N oraz CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R). Analiza uzyskanych rezultatów pozwala jednoznacznie ocenić wpływ wybranych metod formowania na właściwości wytrzymałościowe oraz nasiąkliwość próbek. Wyniki te stanowią istotną podstawę do dalszej optymalizacji procesu technologicznego.

2. Ocena właściwości użytkowych warstwy licowej

W celu sprawdzenia możliwości laboratoryjnej oceny warstwy licowej elementów wibroprasowanych, wykonano próbki dwuwarstwowe zgodnie z tradycyjną technologią, zachowując minimalną grubość warstwy ścieralnej (vorsatz) wynoszącą 4 mm.

Receptura warstwy licowej (vorsatz):

- Cement: 410 kg/m³
- Piasek 0/2: 100%
- Współczynnik woda/cement: 0,35
- Domieszka napowietrzająco-uszczelniająca: 0,40% m.c.

Zastosowane rodzaje cementu (Cement Ożarów S.A.):

- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/A-LL 42,5 R
- CEM II/B-S 42,5 R-NA
- CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA

Zakres przeprowadzonych badań dla każdej partii próbek obejmował:

- Odporność na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odladzającej.
- Odporność na ścieranie.
- Ocenę wizualną połączenia warstw wraz z grubością warstwy.
- Ocenę kolorystyki powierzchni warstwy licowej.
- Ocenę powierzchni po badaniu odporności na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odladzającej.

Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- Wilgotność względna: $\geq 95\%$.
- Temperatura: $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Wyniki badań odporności na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odladzającej

Dla każdego rodzaju cementu wykonano po 3 próbki, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1338:2005. W tabeli 4 przedstawiono wyniki indywidualne oraz średnie ubytki masy dla poszczególnych cementów zastosowanych w warstwie licowej.

Tabela 4. Wyniki odporności na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odladzającej dla warstwy licowej.

Rodzaj cementu	Średni ubytek masy L [kg/m ²]			
	PRÓBKA 1	PRÓBKA 2	PRÓBKA 3	ŚREDNIA
CEM I 42,5 R	0,00	0,00	0,00	0,00
CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N	0,23	0,69	0,00	0,31
CEM II/A-LL 42,5 R	0,00	0,00	0,77	0,26
CEM II/B-S 42,5 R-NA	0,00	0,91	0,00	0,30
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	0,16	0,04	0,00	0,07

Jak widać, pojedyncze wyniki mogą znacząco wpływać na średnią wartość ubytku masy. Mimo to, uzyskane rezultaty potwierdzają możliwość przeprowadzenia tego typu badań na próbkach wykonanych w warunkach laboratoryjnych.

Dodatkowo w tabeli 5 zestawiono średnie i maksymalne ubytki masy w odniesieniu do wymagań normy.

Tabela 5. Wyniki odporności na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odladzającej w odniesieniu do wymagań normowych PN-EN 1338.

Rodzaj cementu	Odporność na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odladzających		
	Średni ubytek masy L [kg/m ²]	Najwyższy pojedynczy ubytek masy L [kg/m ²]	Wymaganie normowe L [kg/m ²]
CEM I 42,5 R	0,00	0,00	Wartość średnia $\leq$ 1,0 przy czym żaden pojedynczy wynik $> 1,5$
CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N	0,31	0,69	
CEM II/A-LL 42,5 R	0,26	0,77	
CEM II/B-S 42,5 R-NA	0,30	0,91	
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	0,07	0,16	

Wyniki badań odporności na ścieranie

Dla każdego rodzaju cementu wykonano po 3 próbki, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1338:2005. Badanie przeprowadzono zgodnie z załącznikiem H normy - metodą Böhme. W tabeli 6 przedstawiono najwyższe uzyskane wyniki ścieralności dla każdego rodzaju cementu.

Tabela 6. Wyniki ścieralności zgodnie z PN-EN 1338.

Rodzaj cementu	Ścieralność na tarczy Böhme	
	Najwyższy wynik badania ścieralności w 1000mm ³ /5000mm ²	Wymagania normowe dla ścieralności PN-EN 1338 zał. H
CEM I 42,5 R	6000 mm ³ / 5000 mm ²	Oznaczenie F: nie określa się H: ≤ 20 000 mm ³ /5 000 mm ² I: ≤ 18 000 mm ³ /5 000 mm ²
CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N	11300 mm ³ / 5000 mm ²	
CEM II/A-LL 42,5 R	6700 mm ³ / 5000 mm ²	
CEM II/B-S 42,5 R-NA	5600 mm ³ / 5000 mm ²	
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	10550 mm ³ / 5000 mm ²	

Wszystkie badane rodzaje cementu spełniły wymagania normowe dla najwyższej klasy odporności na ścieranie – klasy I zgodnie z normą PN-EN 1338:2005 załącznik H.

Ocena przełamu próbki, kolorystyki powierzchni oraz wyglądu próbki po badaniu odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzającej

Dla każdej serii cementu wykonano przełamy próbki w celu oceny:

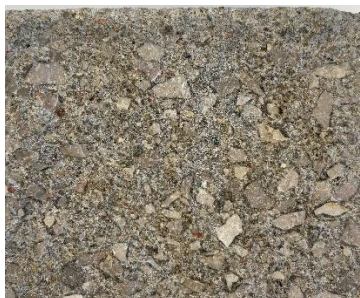
- jakości połączenia warstw (warstwa konstrukcyjna – warstwa licowa),
- grubości warstwy licowej (vorsatz),
- rozmieszczenia składników w całym przekroju elementu.

Dodatkowo przeprowadzono:

- ocenę kolorystyki powierzchni warstwy licowej dla każdego rodzaju cementu,
- ocenę wyglądu próbek po zakończeniu badania odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzającej.

Poniżej przedstawiono zestawienie rysunków dla poszczególnych rodzajów cementu.

CEM I 42,5 R



Rys 15 . Przełam próbki CEM I 42,5 R



Rys 16. Wygląd powierzchni licowej CEM I 42,5 R



Rys 17. Wygląd powierzchni po badaniu w soli CEM I 42,5 R

CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N



Rys 18. Przełam próbki CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N



Rys 19. Wygląd powierzchni licowej CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N



Rys 21. Wygląd powierzchni po badaniu w soli CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N

CEM II/A-LL 42,5 R



Rys 22. Przełam próbki CEM II/A-LL 42,5 R



Rys 23. Wygląd powierzchni licowej CEM II/A-LL 42,5 R



Rys 24. Wygląd powierzchni po badaniu w soli CEM II/A-LL 42,5 R

CEM II/B-S 42,5 R-NA



Rys 25. Przełam próbki
CEM II/B-S 42,5 R-NA



Rys 26. Przełam próbki
CEM II/B-S 42,5 R-NA



Rys 27. Przełam próbki
CEM II/B-S 42,5 R-NA

CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA



Rys 28. Przełam próbki
CEM III/A 42,5 N-
LH/HSR/NA



Rys 29. Wygląd
powierzchni
warstwy
licowej CEM III/A 42,5 N-
LH/HSR/NA



Rys 30. Wygląd
powierzchni po badaniu w
soli CEM III/A 42,5 N-
LH/HSR/NA

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wizualnej oceny powierzchni można jednoznacznie stwierdzić, że wykorzystanie prasy żyratorowej do laboratoryjnego wykonywania próbek elementów kostki brukowej z warstwą licową jest w pełni uzasadnione.

Wykorzystanie prasy żyratorowej umożliwia:

- Precyzyjne formowanie warstwy licowej (vorsatz) z zachowaniem wymaganej grubości i jednorodności.
- Ocenę właściwości użytkowych gotowych elementów, takich jak odporność na ścieranie czy odporność na działanie soli odładzających.
- Analizę wpływu zastosowanych składników (rodzaju cementu, domieszek, kruszyw) na jakość i trwałość warstwy licowej.

PODSUMOWANIE

Prasa żyratorowa okazała się skutecznym narzędziem do laboratoryjnego projektowania i oceny mieszanek betonowych przeznaczonych do produkcji elementów wibroprasowanych - w szczególności kostki brukowej. Umożliwia ona odwzorowanie warunków produkcyjnych w skali laboratoryjnej, co pozwala na ograniczenie kosztownych prób przemysłowych oraz minimalizację strat materiałowych.

Poprzez możliwość regulacji parametrów takich jak siła docisku, liczba cykli, kąt nachylenia czy prędkość obrotowa, możliwe jest precyzyjne dostosowanie procesu zagęszczania do specyfiki badanej mieszanki. Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno rodzaj cementu, jak i parametry zagęszczania mają istotny wpływ na właściwości reologiczne, gęstość, wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, a także nasiąkliwość próbek.

Można wymienić kilka wniosków z przeprowadzonych testów:

- Prasa żyratorowa umożliwia wiarygodne odwzorowanie warunków produkcji elementów wibroprasowanych w warunkach laboratoryjnych, co pozwala na wczesną ocenę jakości mieszanki i jej składników.
- Rodzaj zastosowanego cementu i jego parametrów znacząco wpływają na zagęszczalność mieszanki oraz właściwości mechaniczne i trwałościowe próbek, nawet przy zachowaniu stałych parametrów zagęszczania.
- Gęstość próbki jest kluczowym czynnikiem determinującym jej wytrzymałość, zarówno na ściskanie, jak i na rozciąganie przy rozłupywaniu – potwierdzono silną korelację między tymi parametrami.
- Zastosowanie prasy żyratorowej pozwala na ocenę nie tylko warstwy konstrukcyjnej, ale również warstwy licowej kostki brukowej, w tym jej odporności na ścieranie, działanie soli odladzających oraz estetyki powierzchni.
- Możliwość wykonywania próbek dwuwarstwowych otwiera drogę do kompleksowej oceny kostki brukowej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1338:2005.
- Prasa żyratorowa może być z powodzeniem wykorzystywana jako narzędzie badawcze i optymalizacyjne w laboratoriach producentów betonu wibroprasowanego.

Literatura:

[1] Magdalena Kucińska, „Zagęszczenie próbek mieszanek mineralno-asfaltowych z wykorzystaniem pracy żyratorowej.”, Drogownictwo 7-8/2013

[2] GALILEO Gyrotory Compactor for cement and concrete – Instruction Manual

[3] NT BUILD 427, CONCRETE, FRESH: COMPACTIBILITY WITH IC-TESTER
(INTENSIVE COMPACTION TESTER)

[4] PN-EN 1338:2005 „Betonowe kostki brukowe. Wymagania i metody badań.”

XIII
KONFERENCJA

DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



PARTNERZY PROGRAMOWI



SPONSORZY / FIRMY



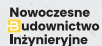
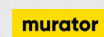
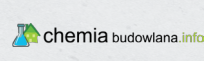
PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



WSPÓŁPRACA MEDIALNA



ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3