

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

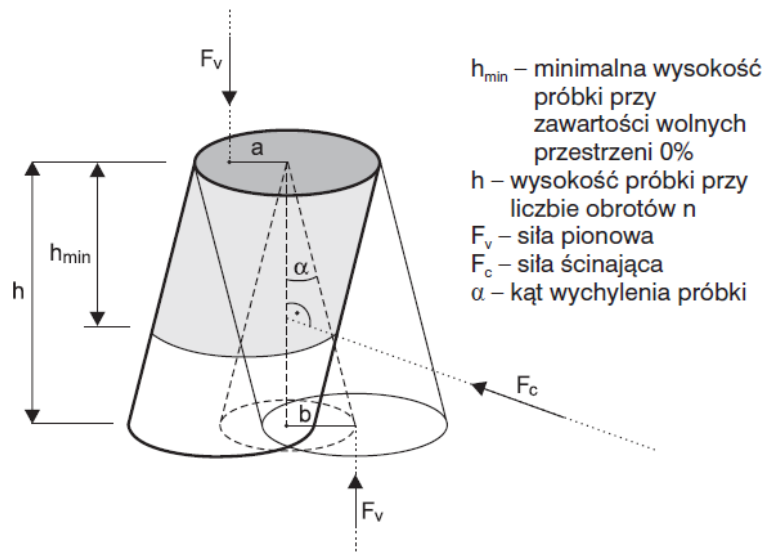
Prasa żyratorowa – zastosowanie, działanie i możliwości badawcze

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.

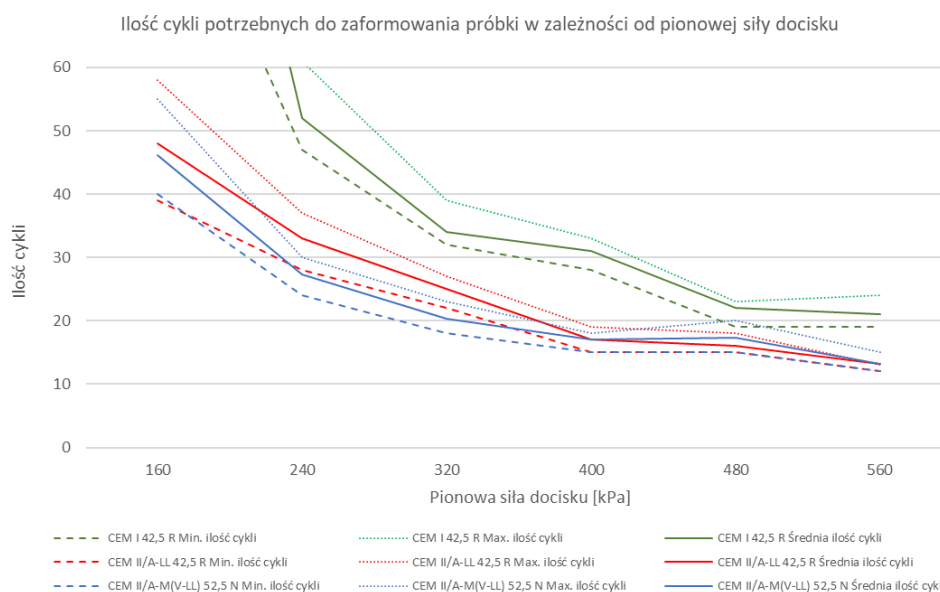
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- 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

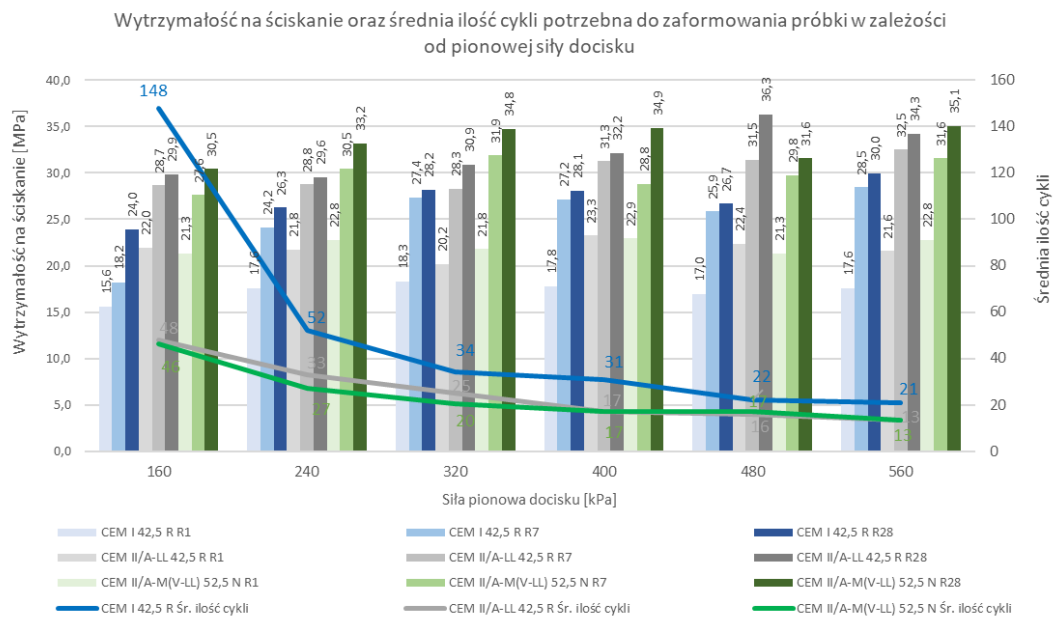
Na rysunku 3 przedstawiono liczbę cykli potrzebnych do osiągnięcia wysokości próbek 100 mm w zależności od zastosowanej siły docisku podczas zagęszczania.



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.

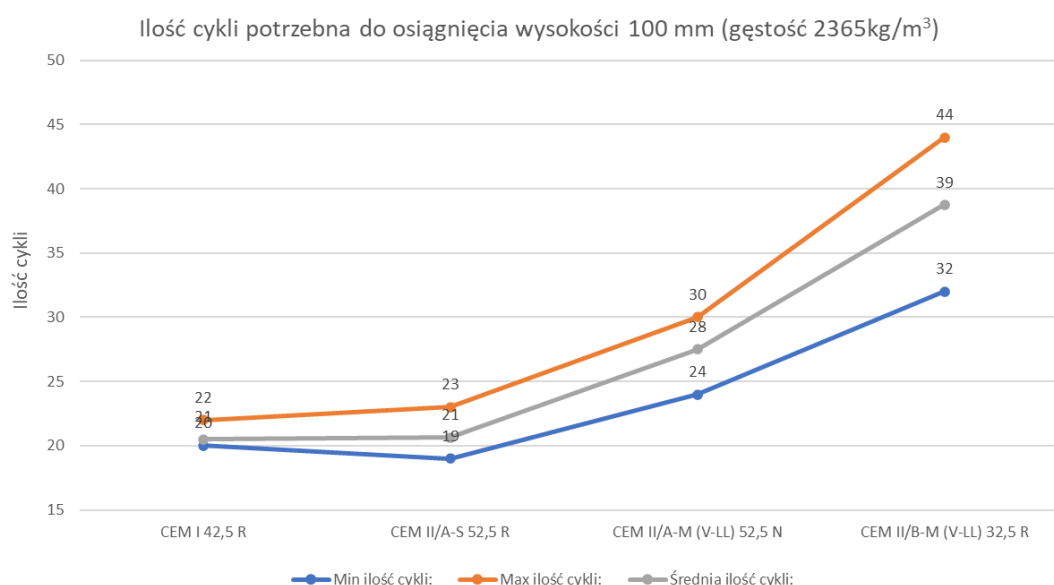
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- 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.):

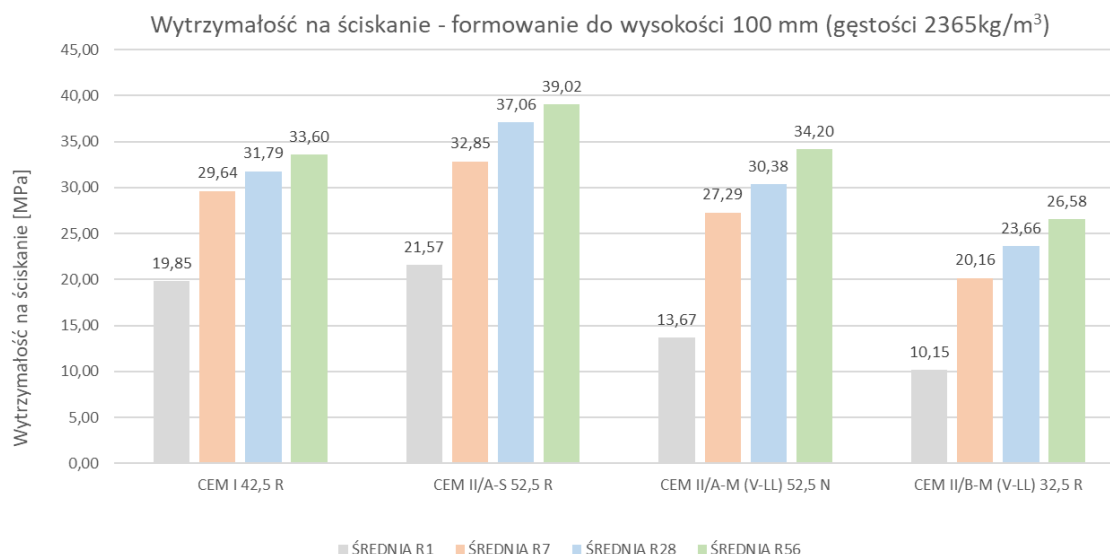
- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R

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.

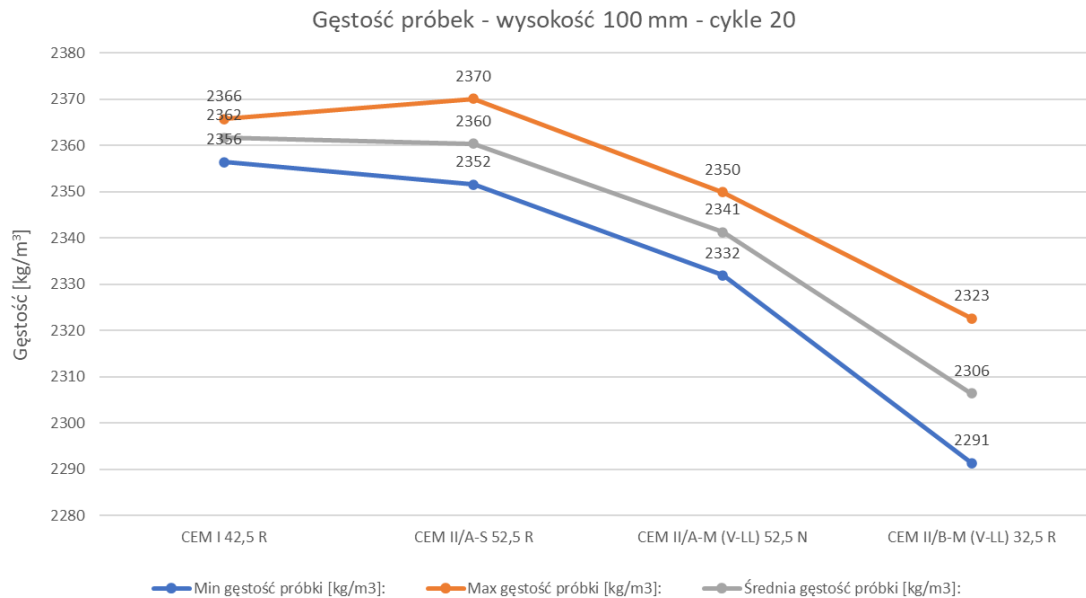
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- 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.):

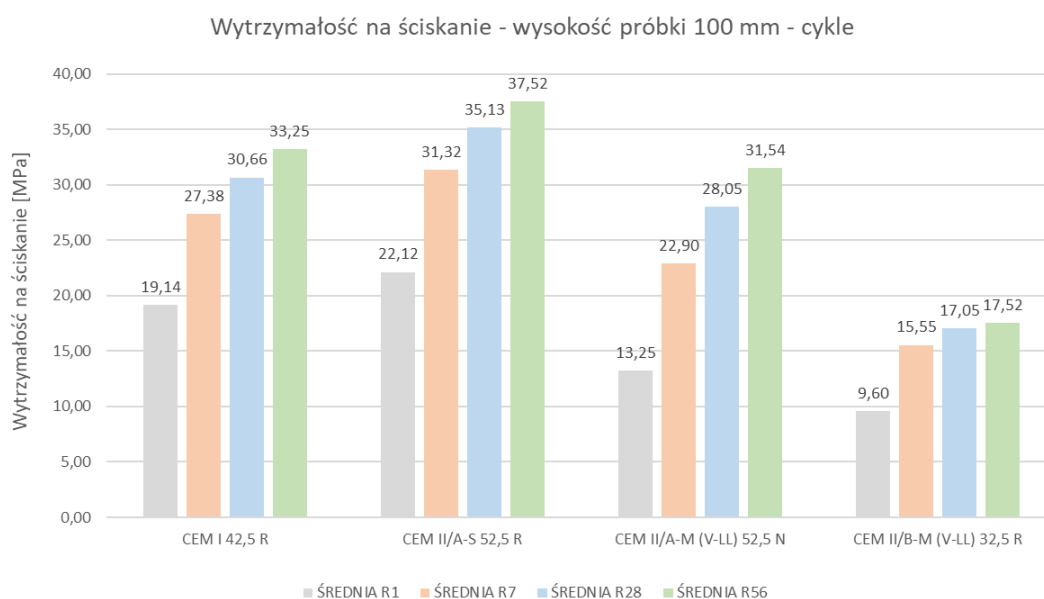
- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R

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.

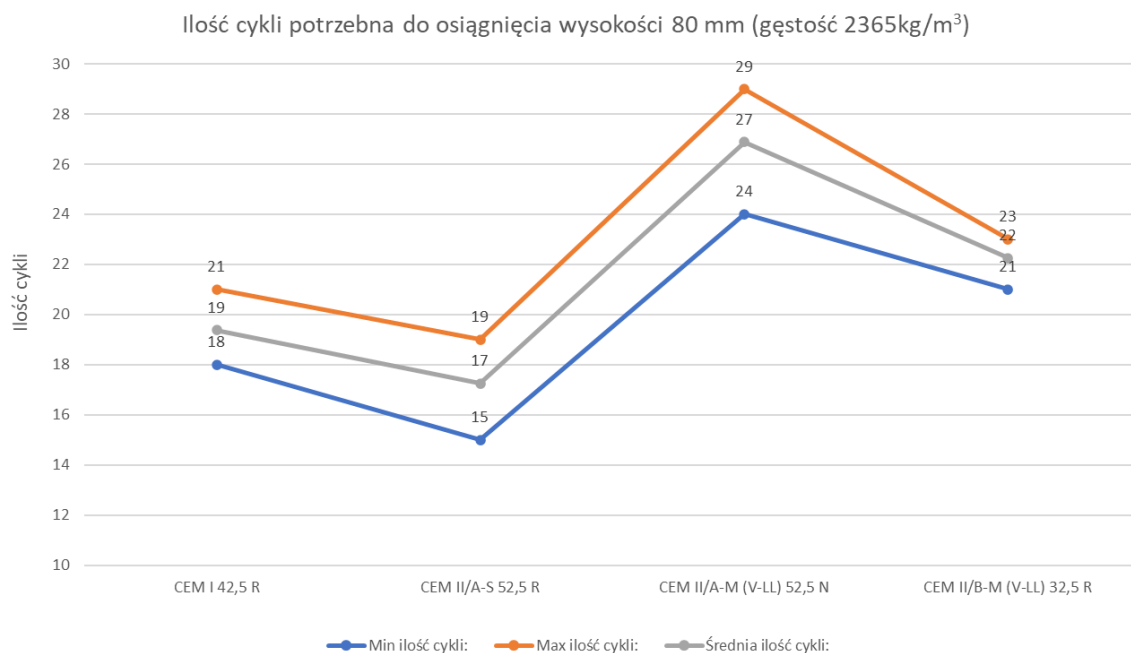
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- 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.):

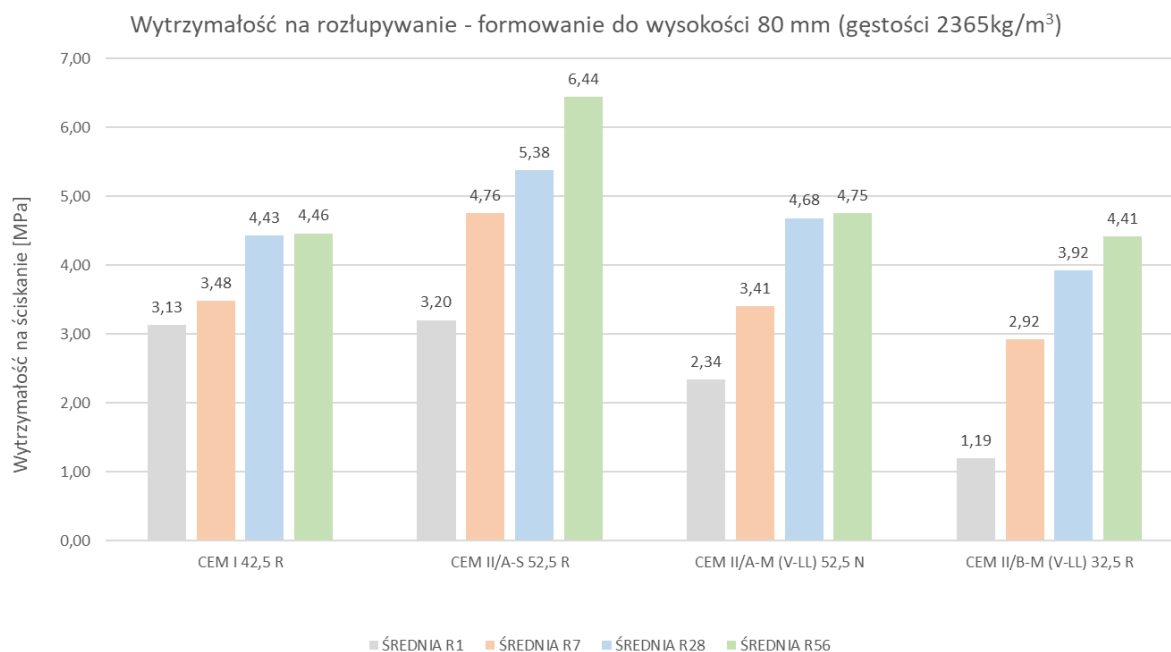
- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R

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.



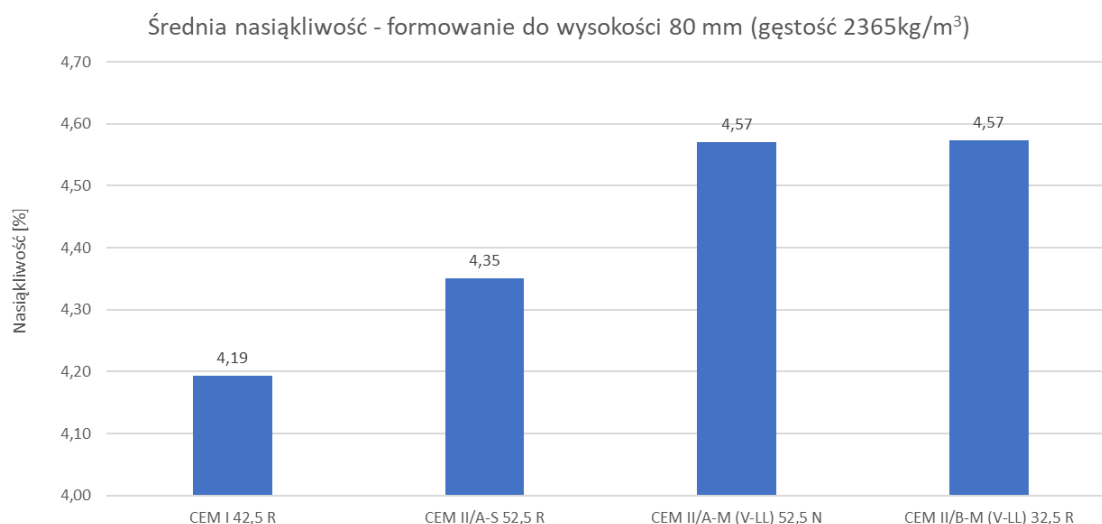
Rysunek 9. Ilość cykli potrzebna do zagęszczenia próbek 80 mm w zależności od rodzaju cementu

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.

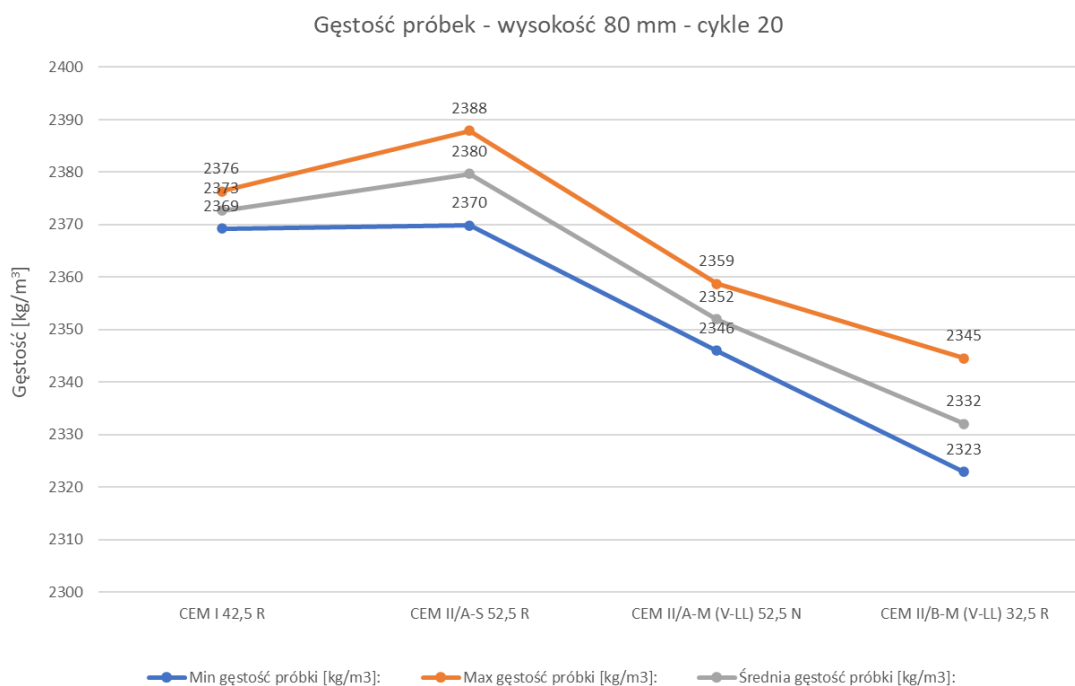
Warunki dojrzewania próbek (28 dni):

- 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.):

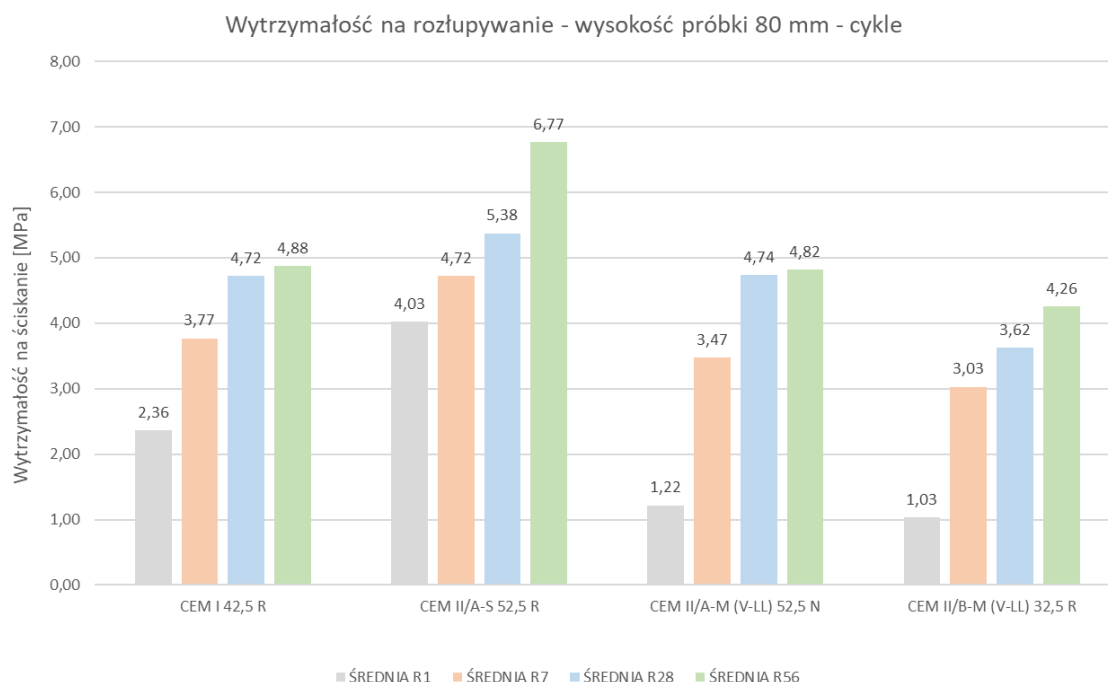
- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 R
- CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N
- CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R

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.



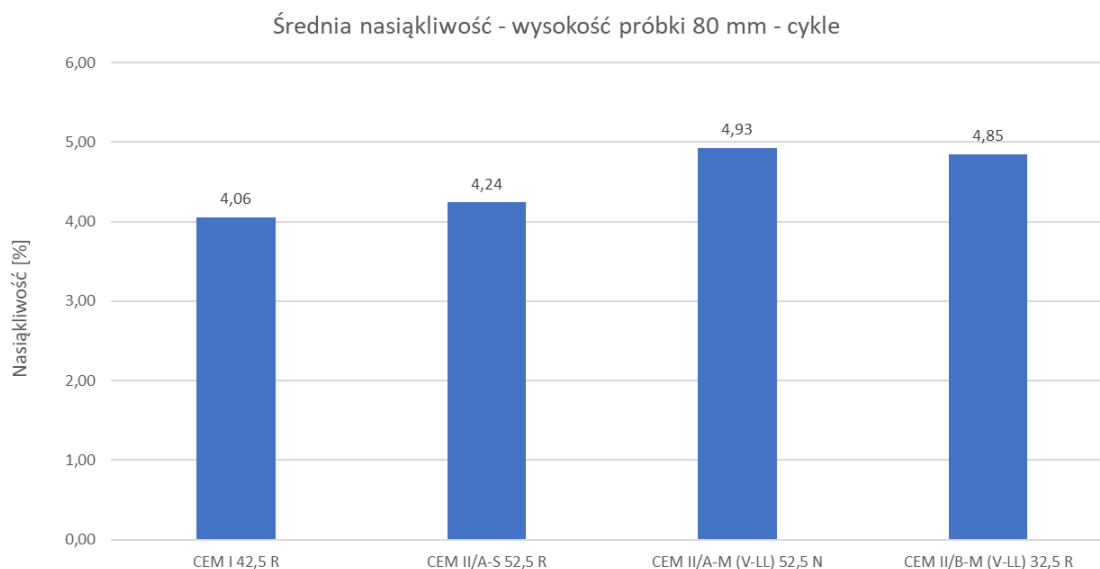
Rysunek 12. Gęstości próbek przy 20 cyklach w zależności od wykorzystanego cementu

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 $1000\text{mm}^3/5000\text{mm}^2$	Wymagania normowe dla ścieralności PN-EN 1338 zał. H
CEM I 42,5 R	$6000\text{ mm}^3 / 5000\text{ mm}^2$	Oznaczenie F: nie określa się H: $\leq 20\,000\text{ mm}^3/5\,000\text{ mm}^2$ I: $\leq 18\,000\text{ mm}^3/5\,000\text{ mm}^2$
CEM II/A-M (V-LL) 52,5 N	$11300\text{ mm}^3 / 5000\text{ mm}^2$	
CEM II/A-LL 42,5 R	$6700\text{ mm}^3 / 5000\text{ mm}^2$	
CEM II/B-S 42,5 R-NA	$5600\text{ mm}^3 / 5000\text{ mm}^2$	
CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	$10550\text{ mm}^3 / 5000\text{ mm}^2$	

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 próbek w celu oceny:

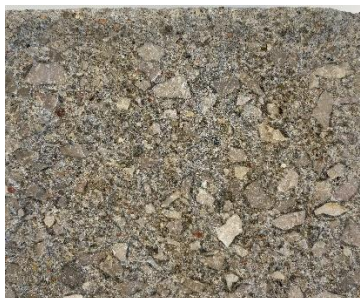
- jakości połączenia warstw (warstwa konstrukcyjna – warstwa licowa),
- grubości warstwy licowej (vorsatz),
- rozmieszczenia składników w całym przekroju elementu.

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.”