

**SCIENTIFIC
STUDIES**
Monographs

**PRACE
NAUKOWE**
Monografie

Marta Kadela

PIANOBETON

WYTWARZANIE, WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIE

FOAMED CONCRETE
PRODUCTION, PROPERTIES AND APPLICATION



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2025

KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor naczelny
Zastępcy redaktora naczelnego

Sekretarz
Członkowie

prof. dr hab. inż. LECH CZARNECKI, dr h.c.
prof. dr inż. LESŁAW BRUNARSKI
dr hab. inż. JADWIGA FANGRAT, prof. Instytutu
dr MICHAŁ GAJOWNIK
prof. dr hab. inż. JACEK NURZYŃSKI
mgr inż. JAN SIECZKOWSKI
dr inż. EWA SZEWCZAK
dr inż. SEBASTIAN WALL

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. ŁUKASZ DROBIEC
prof. dr hab. inż. ZBIGNIEW GIERGICZNY
prof. dr hab. inż. PIOTR WOYCIECHOWSKI

Redakcja
dr MICHAŁ GAJOWNIK

Opracowanie komputerowe
AnnGraf ANNA SZELĄG

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej
Warszawa 2025

Czterysta siedemdziesiąta szósta pozycja
„Prac Naukowych ITB”

ISBN 978-83-249-8680-4, 978-83-249-8681-1 (PDF)

Wydawca i Autorzy dołożyli wszelkich starań, aby publikowane informacje pochodziły z rzetelnych źródeł. Wydawca nie ponosi odpowiedzialności ani też nie zaciąga zobowiązań w wyniku wykorzystania przez użytkowników treści niniejszej publikacji. W szczególności nie ponosi odpowiedzialności w stosunku do czytelników i/lub strony trzeciej za jakiegokolwiek poniesione straty, wydatki i szkody bezpośrednie i pośrednie, łącznie z utratą zysku i innych korzyści majątkowych, które mogły powstać lub być związane bezpośrednio lub pośrednio z treściami opublikowanymi, w tym ewentualnymi błędami lub pominięciami zawartymi w publikowanych materiałach.

 Instytut Techniki Budowlanej

Dział Wydawnictw Naukowych
00-611 Warszawa, ul. Filtrowa 1, tel.: 22 843 35 19
e-mail: wydawnictwa@itb.pl, www.itb.pl

Spis treści

Od Autorki	5
<i>Streszczenie</i>	7
<i>Abstract</i>	11
Wykaz symboli i skrótów	15
1. Wprowadzenie	21
2. Definicje pianobetonu oraz pojęć z nim związanych	29
2.1. Definicja i klasyfikacja pianobetonu	29
2.2. Podstawowe definicje dotyczące pianobetonu	39
2.3. Podstawowe kryteria oceny właściwości	49
3. Składniki i metody wytwarzania pianobetonu	61
3.1. Podstawowe składniki pianobetonu	61
3.1.1. Cement.	61
3.1.2. Środki spieniające	63
3.1.3. Dodatki mineralne	66
3.1.4. Woda zarobowa.	67
3.1.5. Kruszywo	67
3.1.6. Domieszki.	68
3.2. Projektowanie mieszanki pianobetonowej	68
3.2.1. Specyfika projektowania składu pianobetonu	68
3.2.2. Metodyka projektowania pianobetonu.	70
3.3. Piana	73
3.3.1. Definicja, rodzaje i proces degradacji piany.	73
3.3.2. Stabilność pęcherzyków powietrza w mieszance pianobetonowej i modyfikacja struktury granicy międzyfazowej gaz-ciecz	83
3.4. Wytwarzanie pianobetonu	94
3.4.1. Technologia	94
3.4.2. Urządzenia spieniające	99
4. Właściwości pianobetonu	105
4.1. Informacje ogólne	105
4.2. Właściwości mieszanki pianobetonowej	108
4.2.1. Gęstość objętościowa	108
4.2.2. Zawartość pęcherzyków powietrza	110
4.2.3. Czas wiązania.	112
4.2.4. Właściwości technologiczne mieszanki pianobetonowej	113
4.3. Właściwości stwardniałego pianobetonu	123
4.3.1. Charakterystyka struktury pianobetonu.	123
4.3.2. Odkształcalność pianobetonu	143
4.3.3. Właściwości mechaniczne pianobetonu.	156

4.3.4. Zjawiska transportu masy i energii w pianobetonie w ocenie trwałości.	182
4.3.5. Właściwości izolacyjne pianobetonu	227
5. Zastosowanie pianobetonu w budownictwie	233
5.1. Przegląd zastosowań	233
5.2. Pianobeton w układzie nawierzchnia drogowa-podłoże gruntowe . . .	236
5.3. Pianobeton przy budowie infrastruktury technicznej i obiektów drogowych	253
5.3.1. Wypełnianie wolnych przestrzeni	253
5.3.2. Wypełnienie wolnej przestrzeni w obiektach mostowych	255
5.4. Pianobeton w budownictwie wielokubaturowym i mieszkaniowym	261
5.4.1. Zastosowanie pianobetonu w konstrukcji posadzek i jego modyfikacja na potrzeby posadowienia budynków.	261
5.4.2. Zastosowanie w przegrodach poziomych	274
5.4.3. Zastosowanie pianobetonu w przegrodach pionowych	277
5.5. Niekonwencjonalne zastosowania	282
6. Technologia wykonania warstw z pianobetonu	287
6.1. Wprowadzenie do opisu technologii	287
6.2. Wytyczne technologiczne wykonywania warstw z pianobetonu	289
6.2.1. Wprowadzenie	289
6.2.2. Wymagania ogólne	290
6.2.3. Roboty na budowie	291
6.2.4. Kontrola przed przystąpieniem do robót, w czasie robót i po ich zakończeniu	294
6.2.5. Uwagi końcowe.	294
6.3. Wybrane przykłady autorskich zastosowań pianobetonu	296
6.3.1. Wprowadzenie	296
6.3.2. Sytuacja I – pianobeton użyty w funkcji przenoszenia obciążenia	297
6.3.3. Sytuacja II – pianobeton jako materiał termoizolacyjny	307
7. Podsumowanie i wnioski końcowe	311
Bibliografia	317

OD AUTORKI

Monografia powstała jako wynik wieloletniej działalności naukowej, w tym w ramach realizacji projektu badawczego *Wzmacnianie słabego podłoża poprzez zastosowanie warstwy z pianobetonu w kontakcie z podłożem gruntowym*, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER IV (LIDER/022/537/L-4/NCBR/2013) oraz podczas półrocznego stażu na Wydziale Inżynierii Lądowej Uniwersytetu Żylińskiego (Faculty of Civil Engineering – University of Žilina), realizowanego dzięki Programowi Wymiany Osobowej Studentów i Naukowców w Ramach Współpracy Bilateralnej – Oferta Wyjazdowa – Rok Akademicki 2021/2022, finansowanego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (PPN/BIL/2020/1/00318/U/01). Ponadto w monografii przedstawiono wyniki projektu badawczego *Pianobeton – charakterystyka materiałowa*, realizowanego w ramach współpracy pomiędzy Instytutem Techniki Budowlanej a Wydziałem Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (06086/15/ROOR), w tym wyniki prac dyplomowych wykonywanych pod moją opieką naukową. Przedstawiono także efekty badań przeprowadzonych za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego zakupionego z dotacji celowej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na realizację inwestycji związanej z działalnością naukową ITB (6967/IA/SN/2019).

Serdecznie dziękuję Prof. dr. hab. inż. dr. h.c. Lechowi Czarneckiemu, Sekretarzowi Naukowemu ITB, za przekazywanie wiedzy, za wszystkie rady, te merytoryczne i życiowe, a przede wszystkim za wsparcie na każdym etapie kariery naukowej w ITB. Dziękuję Recenzentom monografii: Prof. dr. hab. inż. Łukaszowi Drobcowi, Prof. dr. hab. inż. Zbigniewowi Giergicznemu oraz Prof. dr. hab. inż. Piotrowi Wojciechowskiemu za wszystkie uwagi i wskazówki, które były dla mnie niezwykle cenne, a które wpłynęły na obecny kształt monografii. Szczególne podziękowania i wdzięczność kieruję do Dyrektora Instytutu Techniki Budowlanej, Dr. inż. Roberta Geryło, Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Prof. dr. hab. inż. Andrzeja Garbacza oraz Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Uniwersytetu Żylińskiego, Prof. dr. inż. Mariana Drusy za nieocenione wsparcie w realizacji wyżej wymienionych projektów oraz wieloletnią współpracę.

Duże podziękowania składam członkom zespołów badawczych realizowanych projektów naukowych oraz współpracownikom. Powyższe nie udałoby się również bez wsparcia rodziny i przyjaciół, za które powiedzieć „dziękuję” to za mało.

Marta Kadela

PIANOBETON. WYTWARZANIE, WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIE

Streszczenie

Chociaż technologia wytwarzania pianobetonu została opatentowana w 1923 roku, to jego prawdziwy rozwój na świecie nastąpił pod koniec XX wieku. Wówczas w Stanach Zjednoczonych i Europie podjęto pierwsze próby pełnowymiarowego zastosowania pianobetonu podczas budowy autostrad, mostów, tuneli i niskich konstrukcji nasypów. Obecnie wykorzystanie pianobetonu w budownictwie jest statystycznie mniejsze niż 5% i ogranicza się głównie do zastosowań o charakterze niekonstrukcyjnym (w funkcji izolacyjnej, wypełniającej lub odciażającej).

Celem niniejszej monografii jest analiza możliwości zastosowania pianobetonu w budownictwie z uwzględnieniem aspektów wdrożenia pianobetonu do powszechnego stosowania. Zagadnienie to zostało omówione w siedmiu rozdziałach. W ramach pierwszego rozdziału (Wprowadzenie) omówiono historię rozwoju pianobetonu i przedstawiono dynamikę przyrostu literatury dotyczącej pianobetonu na przestrzeni lat. Ponadto wskazano potencjalne czynniki decydujące o tym, że pianobeton nie został do tej pory powszechnie wdrożony. Stanowiło to przesłankę do opracowania niniejszej monografii.

W rozdziale 2 (Definicje pianobetonu oraz pojęć z nim związanych) przedstawiono definicje i klasyfikacje pianobetonu. Omówiono jak zmieniał się opis pianobetonu na przestrzeni lat, poczynając od pierwszych prób jego zdefiniowania przez Neville'a w 1977 roku. Z uwagi na fakt, że do tej pory nie ma jednoznacznego opisu pianobetonu, zaproponowano jego definicję oraz opracowano autorską klasyfikację betonu lekkiego z uwzględnieniem pianobetonu. Ponadto przeprowadzono szerokie studia nad dokumentami normatywnymi, które mogą dotyczyć pianobetonu. Ostatecznie wykazano, że nie istnieją normy polskie i europejskie na prawach polskich stricte dedykowane pianobetonowi.

W rozdziale 2 przedstawiono także wykaz pojęć związanych z pianobetonem. Ponadto zaproponowano podstawowe kryteria oceny właściwości składników, mieszanki pianobetonowej i stwardniałego pianobetonu, jak również przedstawiono najczęstsze wady pianobetonu.

W rozdziale 3 (Składniki i metody wytwarzania pianobetonu) skupiono się na omówieniu składników mieszanki pianobetonowej oraz jej projektowania i produkcji. Za podstawowe składniki mieszanki pianobetonowej przyjęto cement oraz środek spieniający. Czynnikiem decydującym o pianobetonie jest

bowiem cement, tak jak we wszystkich kompozytach cementowych. Czynnikiem, który natomiast wyróżnia pianobeton jest środek spieniający (zwany także pianotwórczym), z którego wytwarzana jest piana. Środki spieniające mogą być pochodzenia syntetycznego oraz naturalnego na bazie białka zwierzęcego lub roślinnego. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury omówiono problem związany z kompatybilnością środków spieniających z innymi składnikami zaczynu cementowego, zaprawy cementowej lub mieszanki betonowej (głównie dodatkami mineralnymi i domieszkami). W rozdziale omówiono ponadto zagadnienia związane ze stabilnością pęcherzyków powietrza w mieszance pianobetonowej oraz sposoby poprawy stabilności piany i mieszanki pianobetonowej.

W rozdziale 3 przedstawiono także podział technologii wytwarzania piany oraz mieszanki pianobetonowej. Dobór technologii powinien uwzględniać wielkość, rodzaj i koszty planowanej inwestycji. W tym celu omówiono stosowane agregaty i maszyny do wytwarzania piany oraz mieszanki pianobetonowej.

Rozdział 4 (Właściwości pianobetonu) stanowi kompendium wiedzy na temat właściwości mieszanki pianobetonowej oraz właściwości fizycznych stwardniałego pianobetonu. Na podstawie wyników badań własnych oraz danych literaturowych przeanalizowano wpływ poszczególnych składników na właściwości mieszanki pianobetonowej oraz stwardniałego pianobetonu. Stwierdzono, że najważniejszą cechą jest gęstość objętościowa pianobetonu, ponieważ od niej zależą inne właściwości fizyczne. Opracowano empiryczne korelacje właściwości fizycznych stwardniałego pianobetonu w funkcji gęstości objętościowej. Oceniono wpływ dodatków mineralnych, w tym surowców z recyklingu, na właściwości mieszanki pianobetonowej oraz stwardniałego pianobetonu.

Z uwagi na brak norm badawczych dla pianobetonu zestawiono metodyki badawcze stosowane dotychczas do określania poszczególnych właściwości mieszanki pianobetonowej i stwardniałego pianobetonu, w tym ze szczególnym uwzględnieniem metodologii badawczych zgodnych z polskimi normami. Bazując na metodologii badawczej dla betonu zwykłego, opracowano metodologię do określania właściwości stwardniałego pianobetonu. Przedstawiono unikatowe wyniki badań laboratoryjnych, takich jak badanie pełzania pianobetonu pod długotrwałym obciążeniem, stabilności wymiarowej pianobetonu w różnych warunkach cieplno-wilgotnościowych oraz badania w zakresie oceny degradacji.

Wykazano, że największy wpływ na ograniczone stosowanie pianobetonu ma brak oceny jego trwałości. W literaturze można znaleźć tylko nieliczne publikacje dotyczące trwałości pianobetonu. Ponadto przedstawiają one raczej pojedyncze wyniki badań laboratoryjnych dla pianobetonu o danej gęstości

objętościowej i o danym składzie oraz narażonego na dany czynnik oddziaływania, niż szerokie studia i analizy nad trwałością pianobetonu. Stało się to przesłanką do podjęcia próby opisu zjawiska transportu masy i energii w pianobetonie w ocenie trwałości. W tym celu przeanalizowano odporność pianobetonu na oddziaływanie wody, mrozu, wysokiej temperatury oraz na działanie agresywnego środowiska chemicznego. W zakresie odporności na środowisko chemiczne rozpatrzono karbonatyzację, odporność na działanie siarczanów, chlorków i kwasów.

W rozdziale 5 (Zastosowanie pianobetonu w budownictwie) przedstawiono przykłady wykorzystania pianobetonu. Opracowano podział zastosowania pianobetonu w zależności od funkcji pełnionej w konstrukcji obiektu budowlanego lub układzie obiekt budowlany-podłoże gruntowe. Wykazano możliwość zastosowania pianobetonu w funkcji wypełniająco-izolacyjnej, izolacyjno-konstrukcyjnej i konstrukcyjnej.

W dalszej części rozdziału 5 przedstawiono konkretne przykłady zastosowania pianobetonu z podziałem na budownictwo drogowe, mostowe, infrastrukturalne oraz budownictwo przemysłowe i mieszkaniowe. Szczególną uwagę poświęcono układom nawierzchnia-podłoże gruntowe, które są głównym przedmiotem zainteresowania autorki. Przeanalizowano wykorzystanie pianobetonu od pierwszych, wielkowymiarowych inwestycji, do współczesnego, nowoczesnego budownictwa, jakim może być dom kopułowy w technologii monolitycznej. Ponadto przedstawiono potencjalne możliwości zastosowania pianobetonu, będące na etapie badań naukowych. Przedstawiono również wyniki badań własnych w warunkach *in situ* oraz analiz numerycznych.

Rozdział 6 (Technologia wykonania warstw z pianobetonu) stanowi autorskie wytyczne technologiczne wbudowywania pianobetonu. Określono czynniki decydujące o technologii wykonania elementów z pianobetonu. Na ich podstawie wykazano, że największe trudności występują przy układaniu pianobetonu w elementach wielkopowierzchniowych, w szczególności w kontakcie z podłożem gruntowym. Opracowana technologia wykonywania warstw z pianobetonu ma zastosowanie przy wzmacnianiu podłoża słabonośnego w układzie nawierzchnia-podłoże gruntowe, czyli w konstrukcjach obejmujących: nawierzchnie drogowe (asfaltowe i betonowe), nawierzchnie miejsc obsługi pasażerów (MOP), stacji benzynowych i parkingów oraz nawierzchnie przemysłowe. Ponadto, mając na uwadze szersze zastosowanie pianobetonu w budownictwie, rozszerzono opracowaną technologię dla dolnych warstw nawierzchni drogowych na inne elementy obiektów budowlanych (np. warstwy izolacyjnej w konstrukcji stropodachu), stanowiąc schemat wykonywania obiektów budowlanych powstałych z użyciem pianobetonu.

W rozdziale 6 opisano także doświadczenia własne autorki związane z wbudowywaniem pianobetonu. Rozważono zastosowanie pianobetonu w dwóch skrajnych sytuacjach, a mianowicie jako warstwę, która przenosi obciążenia na niżej położone warstwy i/lub podłoże gruntowe o mniejszej nośności oraz jako elementu wypełniającego, stosowanego z uwagi na zmniejszenie przenikania ciepła. Rozpatrzono zatem zastosowanie pianobetonu jako dolnej warstwy nawierzchni drogowej (sytuacja I) oraz jako wypełnienie pól między ławami fundamentowymi (sytuacja II).

Mając powyższe na uwadze stwierdzono, że pianobeton może być stosowany w budownictwie z pełną świadomością jego zalet i wad. Przeprowadzona analiza pozwoliła na opracowanie autorskiego podziału pianobetonu z uwagi na jego podstawowe właściwości (tj. gęstość objętościową, wytrzymałość na ściskanie i współczynnik przewodzenia ciepła), który przedstawiony został w rozdziale 7 (Podsumowanie i wnioski końcowe). Opracowano także autorską klasyfikację doboru pianobetonu o danej gęstości objętościowej z uwagi na jego zastosowanie w obiektach budowlanych. Ponadto w rozdziale 7 wskazano problemy i kierunki dalszego rozwoju pianobetonu, ze szczególnym uwzględnieniem przyszłych kierunków badań naukowych.

Wyniki badań własnych autorki, przedstawione w niniejszej monografii, zostały opracowane w ramach projektu badawczego *Wzmacnianie słabego podłoża poprzez zastosowanie warstwy z pianobetonu w kontakcie z podłożem gruntowym* (LIDER/022/537/L-4/NCBR/2013), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER IV oraz stażu na Wydziale Inżynierii Lądowej Uniwersytetu Żylińskiego (Faculty of Civil Engineering – University of Žilina), realizowanego w ramach Programu Wymiany Osobowej Studentów i Naukowców w ramach Współpracy Bilateralnej – Oferta Wyjazdowa – Rok Akademicki 2021/2022, finansowanego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (nr umowy: PPN/BIL/2020/1/00318/U/01).

FOAMED CONCRETE. PRODUCTION, PROPERTIES AND APPLICATION

Abstract

Although the technology for producing foamed concrete was patented in 1923, its development worldwide occurred at the end of the 20th century. In the United States and Europe, the first full-scale applications of foamed concrete were attempted during the construction of highways, bridges, tunnels, and low-embankment structures. At present, the use of foamed concrete in construction is statistically less than 5% and is mainly limited to non-structural applications, such as insulating, filling, or load-relieving materials.

The aim of this monograph was to analyse the possibilities of using foamed concrete in construction, taking into account aspects of its implementation for widespread use. This is discussed in seven chapters of the monograph. In the first chapter (Introduction), the history of foamed concrete development is discussed, and the dynamics of the increase in literature on foamed concrete over the years are presented. Additionally, potential factors that may have contributed to the lack of widespread implementation of foamed concrete were identified. This served as the rationale for the development of the monograph.

In Chapter 2 (The definition of foamed concrete and related terms) definitions and classifications of foamed concrete are presented. The evolution of the definition of foamed concrete over the years has been outlined, starting from the initial definitions by Neville in 1977. Given that there is still no unambiguous definition of foamed concrete, a new definition is proposed, and an original classification of lightweight concrete, including foamed concrete, is developed. Additionally, extensive studies have been conducted on normative documents pertaining to foamed concrete. Ultimately, it was shown that there are no Polish or European standards, with the force of Polish law strictly dedicated to foamed concrete.

In Chapter 2, concepts related to foamed concrete are presented. Basic criteria for assessing the properties of the components, foamed concrete mix, and hardened foamed concrete were also proposed. This section illustrates the most common defects to foamed concrete.

In Chapter 3 (Components and methods of producing foamed concrete) the focus is on discussing the components of the foamed concrete mix, the design, and the production of the foamed concrete mix. The basic components of the foamed concrete mix are considered to be the cement and foaming agent. As in other cement composites, the decisive factor for foamed concrete

is the cement. The distinguishing factor for foamed concrete is the foaming agent, from which the foam is produced. Foaming agents can be of synthetic or natural origin based on animal or plant proteins. Based on the literature analysis, the issue of compatibility between foaming agents and other components of cement paste, cement mortar, or concrete mix (mainly mineral additions and admixtures) is discussed. Additionally, this chapter addresses issues related to the stability of air bubbles in the foamed concrete mix and methods to improve foam and foamed concrete mix stability.

Chapter 3 provides a classification of the technologies for producing foam and foamed concrete mixes. The choice of technology should consider the size and type of the planned project, as well as economic factors. For this purpose, the units and machines used to produce the foam and foamed concrete mix are presented.

Chapter 4 (Properties of foamed concrete) serves as a compendium of knowledge on the properties of foamed concrete mixes and the physical properties of hardened foamed concrete. Based on our research results and literature data, the impact of the components on the properties of the foamed concrete mix and hardened foamed concrete was analysed. It is concluded that the most important property is the density of the foamed concrete, as it determines the physical properties. Empirical correlations of the physical properties of hardened foamed concrete as a function of density were developed. The effect of mineral additions, including recycled additions, on the properties of the foamed concrete mix and hardened foamed concrete was also evaluated.

Owing to the lack of testing standards for foamed concrete, various research methodologies have been used to determine the specific properties of the foamed concrete mix and hardened foamed concrete, with particular emphasis on testing methodologies consistent with Polish standards. Based on the testing methodology for ordinary concrete, a method for determining the properties of hardened foamed concrete was developed. Unique laboratory test results are presented, including creep testing of foamed concrete under long-term loading, dimensional stability of foamed concrete under various thermal-humidity conditions, and degradation assessment studies.

The limited use of foamed concrete is primarily owing to the lack of material assessment concerning its durability. In the literature, only a few publications have addressed the durability of foamed concrete. Moreover, these publications tend to present individual laboratory test results for foamed concrete with a specific density, made from a foamed concrete mix of a particular composition and exposed to a specific influencing factor, rather than comprehensive studies and analyses on foamed concrete durability.

This prompted an attempt to describe the phenomenon of mass and energy transport in foamed concrete to assess its durability. To this end, resistance to water exposure, frost, high temperatures, and chemical environments was examined. In terms of resistance to chemical environments, carbonation, sulphate attack, chloride attack, and acid attack on foamed concrete have been considered.

Chapter 5 (Application of foamed concrete in construction) presents examples of foamed concrete applications. A classification of foamed concrete applications was developed based on the function it serves in the construction or the construction structure-subsoil system. These possibilities include filling-insulation, insulating-structure, and structural functions.

In this chapter, specific examples of applications are provided, categorised into road pavement structures, bridge construction, infrastructure, industrial and residential construction. Special attention is given to pavement-subsoil systems, which are particularly interesting to the author. The use of foamed concrete has been analysed from its initial large-scale projects to contemporary modern construction methods, such as monolithic dome homes. In addition, potential applications of foamed concrete that are currently under scientific research are discussed. This chapter also presents the results of *in situ* experiments and numerical analyses, confirming the feasibility and effectiveness of integrating foamed concrete in various construction contexts.

Chapter 6 (Technology for laying foamed concrete layers) presents the proprietary technological guidelines for integrating foamed concrete into construction projects. The factors determining the technology for laying foamed concrete elements were developed. Based on this, it is shown that the greatest challenges arise when laying foamed concrete in large-area elements. Therefore, the analysis focused on applying foamed concrete as a large-area slab in contact with the ground.

The developed technology for laying a foamed concrete layer is applicable for reinforcing weak soil of the pavement-subsoil system, such as road pavements (asphalt and concrete), passenger service area surfaces (rest areas), gas station pavements, parking lot surfaces, and industrial surfaces. Additionally, with the broader application of foamed concrete in construction, the developed technology for laying foamed concrete layers for lower layers of road pavements has been expanded to other elements of construction objects (e.g., a layer in an inverted green roof system), serving as a schema for implementation in any project using foamed concrete layers.

In Chapter 6, author's own experiences related to the integration of foamed concrete are described. The application of foamed concrete is considered in

two extreme scenarios: first, as a layer that transfers loads to lower layers and/or a subsoil with a lower bearing capacity, and second, as a filling element aimed at reducing heat penetration. Therefore, this chapter presents the use of foamed concrete as a lower layer in road pavements (situation I) and as an infill between foundation benches (situation II).

Considering the above, it is concluded that foamed concrete can be used in construction with full awareness of its advantages and disadvantages. The analysis led to the development of a proprietary classification of foamed concrete based on its basic properties, such as density, compressive strength, and thermal conductivity, as presented in Chapter 7 (Summary). In addition, a proprietary classification for selecting foamed concrete of a specific density based on its application in construction projects was developed. Chapter 7 also highlights current issues and directions for further development, with a focus on future scientific research directions.

The results of own research presented in this monograph were developed as part of the research project 'Stabilisation of weak soil by application of a layer of foamed concrete used in contact with subsoil' (LIDER/022/537/L-4//NCBR/2013), funded by the National Centre for Research and Development under the LIDER IV program, and during an internship at the Faculty of Civil Engineering at the University of Žilina, carried out within the Student and Academic Staff Exchange Program in Bilateral Cooperation – Outgoing Offer – Academic Year 2021/2022, financed by the National Agency for Academic Exchange (agreement No. PPN/BIL/2020/1/00318/U/01).

WYKAZ SYMBOLI I SKRÓTÓW

Duże litery łacińskie

A	– pole powierzchni próbki [m ²]
AAC	– autoklawizowany beton komórkowy (ang. <i>autoclaved aerated concrete</i>) – patrz ABK
ABK	– autoklawizowany beton komórkowy (ang. <i>autoclaved aerated concrete</i> AAC), często utożsamiany w Polsce z betonem komórkowym, stąd oznaczenie ABK przypisuje się również betonowi komórkowemu
AC	– beton napowietrzony (ang. <i>aerated concrete</i>)
Al ₂ O ₃	– tritlenek diglinu
C	– cement
CaCO ₃	– węglan wapnia
C-A-H	– hydrat glinianu wapnia (ang. <i>calcium aluminate hydrate</i>)
CaO	– tlenek wapnia
3CaO · Al ₂ O ₃ · 3CaSO ₄ · 32H ₂ O	– ettringit
Ca(OH) ₂	– wodorotlenek wapnia (wapno gaszone)
CaSO ₄ · 2H ₂ O	– gips
CC	– beton komórkowy (ang. <i>cellular concrete</i>)
CMC	– krytyczne stężenie micelizacji, definiowane jako stężenie surfaktantów w roztworze, przy którym ich wolne cząsteczki są w równowadze z formami zagregowanymi (ang. <i>critical micelle (micellar) concentration</i>)
CMOD	– przemieszczenie rozwarcia wylotu szczeliny [mm]
CNT	– nanorurki węglowe
CO ₂	– dwutlenek węgla
CS	– stearynian potasu i wapnia
CSA	– szybkowiążący cement wapniowo siarczanoglinianowy (ang. <i>calcium sulphoaluminate</i>)
C-S-H	– hydrat krzemianu wapnia (ang. <i>calcium silicate hydrate</i>)
CTAB	– kationowy środek powierzchniowo czynny (roztwór bromku cetylotrimetyloamoniowego)
DEF	– zjawisko opóźnionego powstawania ettringitu
D _m	– średnica rozptywu mieszkanki betonowej [mm]
E	– statyczny moduł odkształcenia [MPa]

F	– maksymalna siła niszcząca [N]
FA	– popiół lotny (ang. <i>fly ash</i>)
F_b	– siła wyporu [N]
F_c	– siła utrzymująca pęcherzyk powietrza [N]
FC	– pianobeton (ang. <i>foamed concrete</i>) – patrz PB
F_d	– siła drenażu [N]
F_f	– siła tarcia w pianie podczas procesu mieszania [N]
FLC	– pianobeton o niskiej gęstości objętościowej (ang. <i>foamed lightweight concrete</i>) – patrz PB
FRP	– kompozyt polimerowy zbrojony włóknami (ang. <i>fibre reinforced polymer</i>)
FV	– zawartość piany [% obj.]
GBFS	– granulowany żużel wielkopiecowy (ang. <i>granulated blast-furnace slag</i>)
G_F	– energia pęknięcia [N/m]
GFC	– geopianobeton
GGBFS	– mielony granulowany żużel wielkopiecowy (ang. <i>ground granulated blast-furnace-slag</i>)
GOZ	– gospodarka obiegu zamkniętego
H_0	– wysokość formy sześcienniej wypełnionej mieszanką pianobetonową [mm]
H_1	– odległość między meniskiem wklęsłym powierzchni mieszanki pianobetonowej a podstawą formy wypełnionej mieszanką [mm]
H_2O	– woda
H_2SO_4	– kwas siarkowy
HP	– naturalny środek spieniający na bazie białka (hydrolizowane białko zwierzęce)
HPMC	– hydroksypropylometyloceluloza
I_s	– wskaźnik zagęszczenia gruntu [-]
KOH	– wodorotlenek potasu
L	– długość belki [m]
LAC	– beton lekki kruszywowy o strukturze otwartej (ang. <i>lightweight aggregate concrete</i>)
LC	– beton lekki (ang. <i>lightweight concrete</i>)
LCC	– lekki beton komórkowy (ang. <i>lightweight cellular concrete</i>)
LWAC	– beton lekki kruszywowy
MA	– mączka wapienna
$Mg(OH)_2$	– wodorotlenek magnezu
$MgSO_4$	– siarczan magnezu

MOP	– miejsce obsługi pasażerów
MPC	– cement fosforanowo-magnezowy
N	– stopień spienienia/rozrzedzenia piany [-]
NA	– nanocząsteczki tlenku glinu
NaCl	– chlorek sodu
Na_2CO_3	– węglan sodu
NaOH	– wodorotlenek sodu
Na_2SO_4	– siarczan sodu
OP-10	– niejonowy środek powierzchniowo czynny (emulgator)
OPC	– cement portlandzki (ang. <i>ordinary portland cement</i>)
P	– piasek naturalny
PA	– włókna poliamidowe
PB	– pianobeton
PCE	– superplastyfikator na bazie eteru polikarboksylanowego
PCM	– materiał zmienny fazowo
PFA	– popiół lotny (ang. <i>pulverised fuel ash</i>)
$P_{\max}$	– maksymalne obciążenie [MN]
PP	– włókna polipropylenowe
PS	– polisiloksan
PSBE	– przrtworzona ziemia bieląca
PT	– trimetylosilanolan
PVA	– włókna polialkoholu winylowego
R	– współczynnik korelacji
RCA	– kruszywa z recyklingu betonu (ang. <i>recycled concrete aggregate</i>)
RDL	– redyspergowalny proszek lateksowy
RH	– wilgotność względna
S_a	– sorpcyjność [$\text{mm}/\text{min}^{0,5}$]
SAC	– cement sulfoglinianowy
SAP	– superchłonny polimer
SCC	– beton samozagęszczalny
SDS	– anionowy środek powierzchniowo czynny (roztwór dodecylu-siarczanu sodu)
SF	– pył krzemionkowy (ang. <i>silica fume</i>)
SiO_2	– dwutlenek krzemu
SLS	– substancja powierzchniowo czynna (ang. <i>sodium lauryl sulfate</i>)
SLES	– substancja powierzchniowo czynna, powstała w wyniku etoksyłowania cząsteczki SLS (ang. <i>sodium laureth sulfate</i>)
SNF	– superplastyfikator z sulfonianem naftalenoformaldehydowym
SO	– oleinian sodu

SO_4^{2-}	– jon siarczanowy
SP	– superplastyfiktor
SS	– środek spieniający
SSP	– mączka ze skały płonnej; mineralny pył odpadowy pochodzący ze skały płonnej, czyli kamiennego materiału wydobywanego na powierzchnię podczas eksploatacji złóż węgla kamiennego
T	– temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
TiNT	– nanorurki tytanianowe
T_m	– czas rozplywu mieszanki pianobetonowej [s]
V	– objętość próbki [m^3]
V_f	– objętość piany [dm^3]
V_s	– objętość próbki wysuszonej do stałej masy [m^3]
VEA	– domieszka modyfikująca lepkość
W	– woda zarobowa
W_0	– pole pod krzywą obciążenie-przemieszczenie [Nm]
WGWL	– mielona na mokro mączka wapienna
WLP	– sucha mączka wapienna
ZS	– stearynian cynku

Małe litery łacińskie

a	– objętość popiołu lotnego [m^3]
b	– szerokość próbki [m]
a/c	– współczynnik popiołowo-cementowy [-]
c	– objętość cementu [m^3]
d	– grubość próbki [m]
f_c	– wytrzymałość na ściskanie [MPa]
$f_{c,7}$	– wytrzymałość na ściskanie pianobetonu po 7 dniach dojrzewania [MPa]
$f_{c,F1}$	– średnia wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych pianobetonu (niezamrażanych) w stanie powietrzno-suchym [MPa]
$f_{c,F2}$	– średnia wytrzymałość na ściskanie próbek pianobetonu po cyklach zamrażania-rozmrażania w stanie powietrzno-suchym [MPa]
f_{ct}	– wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]
f_t	– wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]
g	– przyspieszenie ziemskie [m/s^2]
h	– stopień osiadania mieszanki pianobetonowej [%]

i	– szybkość absorpcji spowodowana podciąganiem kapilarnym [mm]
k	– objętość kruszywa [m^3]
k/c	– współczynnik kruszywowo-cementowy [-]
l	– odległość między podporami [m]
l_0	– początkowa odległość między punktami pomiarowymi [μm]
l_t	– odległość między punktami pomiarowymi po określonym czasie [μm]
m	– masa próbki [kg]
m_0	– masa pojemnika [g]
m_1	– masa pojemnika wypełniona pianą [g]
m.c.	– w odniesieniu do masy cementu
m.kd	– w odniesieniu do masy kruszywa drobnego
m_f	– masa piany [kg]
m_{fa}	– masa środka spieniającego [kg]
m_n	– masa próbki nasyconej wodą do stałej masy [kg]
m_s	– masa próbki wysuszonej do stałej masy [kg]
m.s.	– w odniesieniu do masy spoiwa
m_{sp}	– masa próbki wysuszonej do stałej masy w podwyższonej temperaturze [kg]
n_w	– nasiąkliwość wagowa [%]
n_o	– nasiąkliwość objętościowa [%]
p_o	– porowatość pianobetonu [% obj.]
p/c	– współczynnik piaskowo-cementowy [-]
t	– czas [s]
u	– przemieszczenie końcowe belki po zniszczeniu [-]
w/a	– współczynnik wodno-popiołowy [-]
w/c	– współczynnik wodno-cementowy [-]
w/s	– współczynnik wodno-spoiwowy [-]

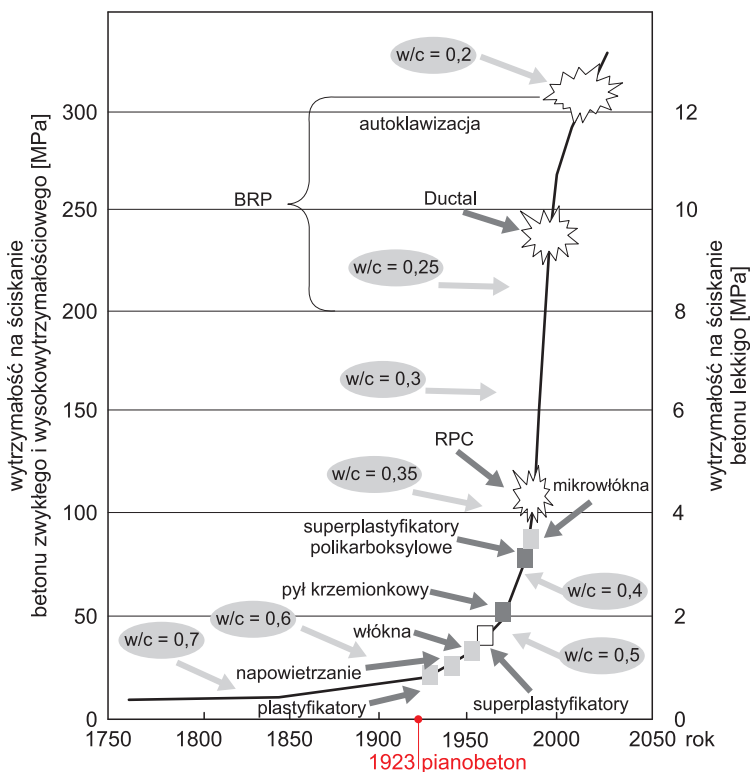
Litery greckie

α_w	– wskaźnik pochłaniania dźwięku [-]
γ_m	– gęstość objętościowa mieszanki pianobetonowej [kg/m^3]
γ	– gęstość objętościowa stwardniałego pianobetonu [kg/m^3]
$\gamma_{m,zal}$	– założona gęstość objętościowa stwardniałego pianobetonu [kg/m^3]
$\Delta\gamma$	– miara stabilności, stanowiąca różnicę pomiędzy gęstością objętościową mieszanki pianobetonowej a gęstością objętościową stwardniałego pianobetonu [kg/m^3]

$\Delta f_{c,F}$	– zmiana wytrzymałości na ściskanie próbek pianobetonu po badaniu mrozoodporności [%]
ΔQ	– ilość ciepła przepływająca przez badaną próbkę [W]
ΔT	– różnica temperatur w kierunku przewodzenia ciepła [K]
δ	– stopień wyciekania piany w ciągu 1 godziny [%]
ε_a	– odkształcenie doraźne [-]
$\varepsilon_c(t)$	– odkształcenie pełzania po określonym czasie [-]
ε_s	– odkształcenie skurczowe [m/m]
ε_{sc}	– odkształcenie skurczowe dla zaczynu cementowego, zaprawy cementowej lub mieszanki betonowej [m/m]
$\varepsilon_{tot}(t)$	– całkowite zmierzone odkształcenie pełzania próbki przy obciążeniu długotrwałym w czasie t [-]
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m · K)]
ν	– współczynnik Poissona [-]
ρ_f	– gęstość piany [kg/m ³]
ρ_{fa}	– gęstość środka spieniającego [kg/m ³]
ρ_c	– gęstość cementu [kg/m ³]
ρ_w	– gęstość wody [kg/m ³]
ρ_a	– gęstość popiołu [kg/m ³]
ρ_p	– gęstość piasku [kg/m ³]
σ_c	– maksymalne naprężenie rozciągające [MPa]
ϕ	– udział objętościowy cieczy w pianie [% obj.]
ϕ_c	– krytyczny udział objętościowy cieczy w pianie [% obj.]

1. WPROWADZENIE

Beton towarzyszy człowiekowi od wielu stuleci, wypierając niejednokrotnie inne materiały budowlane. Należy jednak zaznaczyć, że na przestrzeni lat kompozyt ten ulegał wielu modyfikacjom m.in. poprzez zastosowanie różnego rodzaju dodatków mineralnych i domieszek (Czarnecki 2006, Kurdowski 2010, Łukowski 2016, Garbacz i in. 2018). Na krzywej rozwoju betonu (rys. 1.1), na lata 50. XX wieku datuje się rozwój w zakresie modyfikacji betonu, polegającej na wprowadzeniu do mieszanki betonowej pęcherzyków powietrza.



Rys. 1.1. Uogólniona krzywa rozwoju betonu (Czarnecki 2006)

W rzeczywistości koncepcja ta znana była znacznie wcześniej. Przyjmuje się, że w wersji podstawowej pojawiła się przeszło 100 lat temu (Dhir i in. 2005), chociaż pierwsze wzmianki o materiale kompozytowym zawierającym celowo wprowadzone pęcherzyki gazu pochodzą sprzed około dwóch tysięcy lat. Wówczas to Rzymianie, dodając krew zwierzęcą do mieszanki żwiru drobnego i piasku grubego z wapnem palonym i wodą, otrzymywali w trakcie mieszania małe pęcherzyki powietrza (Dhir i in. 2005). Powstała mieszanka była uznawana za bardziej funkcjonalną i trwalszą. Istotną wadą tak wytworzonego kompozytu były jednak znaczne odkształcenia skurczowe, które starano się zminimalizować poprzez dodawanie do mieszanki włosia końskiego; można dopatrzeć się tu analogii do dzisiejszego zbrojenia rozproszonego (Aldridge 2005).

Komercyjna produkcja kompozytów silnie napowietrzonych oraz zaawansowane badania nad nimi zaczęły się na początku XX wieku. Uznaje się, że do ich rozwoju przyczyniły się głównie prace badawcze prowadzone przez Axela Ericssona (Kośny i Yarbrough 2022). Pęcherzyki powietrza wprowadzano do matrycy cementowej na różne sposoby, określając powstały kompozyt terminem beton komórkowy lub pianobeton. Obecnie obowiązujące rozróżnienie tych dwóch terminów, związane z chemiczną lub fizyczną genezą powstawania pęcherzyków, przyjęło się znacznie później i będzie omówione szczegółowo w dalszej części monografii.

Technologia wytwarzania pianobetonu po raz pierwszy została opatentowana przez firmę Bayer i Ericsson w 1923 roku (Hellers i Schmidt 2011). Ericsson kontynuował prace badawcze nad betonem komórkowym i w 1923 roku wynalazł sposób utwardzania betonu komórkowego w autoklawach za pomocą gorącej pary wodnej. Rozwiązanie to stanowiło przesłankę do powstania autoklawizowanego betonu komórkowego, za który otrzymał patent w 1924 roku. Następnie Ericsson, jako pierwszy na świecie, rozpoczął przemysłową produkcję autoklawizowanego betonu komórkowego, nazywając go „Ytong” (Zapotoczna-Sytek i Balkovic 2013). Jednak dopiero w 1954 roku Valore (1961) przedstawił pierwszy ogólny przegląd z zakresu właściwości i stosowania betonów komórkowych, a w 1963 roku szczegółowe opracowanie w tym zakresie opublikowali Rudnai (1963) oraz Short i Kinniburgh (1963).

W Polsce rozwijały się równolegle oba warianty technologii. Pianobeton był stosowany w latach 1952-1969 do wykonywania bloków ściennych, wykorzystywanych do murów nośnych i wypełniających oraz jako izolacja w murach mieszanych. Ponadto w latach 50. XX wieku pianobeton był używany jako rozwiązanie konstrukcyjno-izolacyjne w przekryciach hal na dźwigarach kablo-betonowych, a po rezygnacji z tego rozwiązania i przejściu na typowe żelbetowe płyty żebrowe, był stosowany jako izolacja termiczna (w formie kostek lub płyt

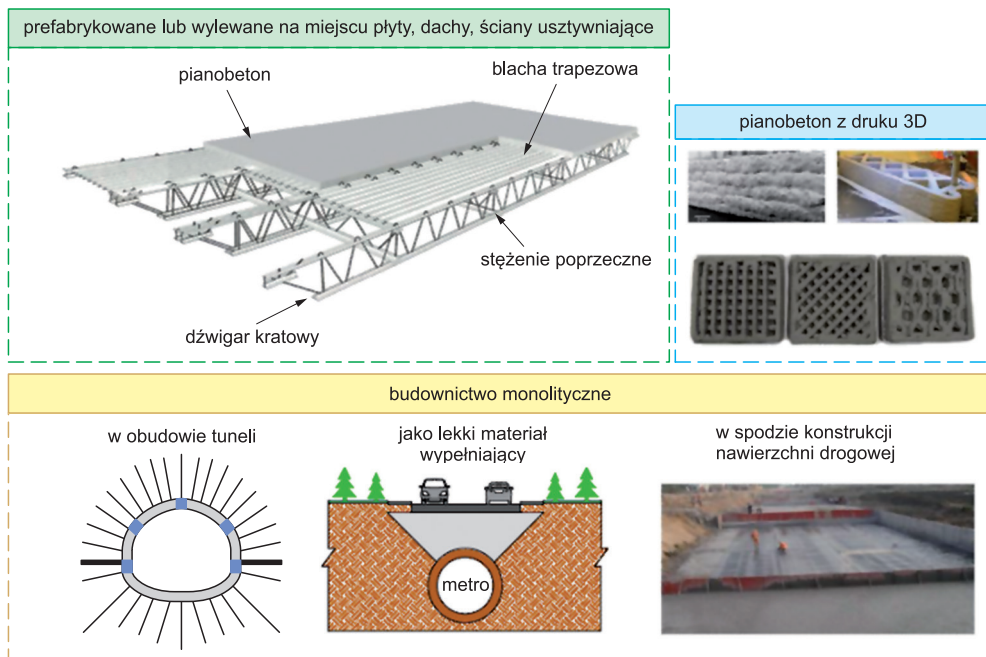
układanych na płytach żebrowych, Hulimka 2019). Równocześnie w 1951 roku rozpoczęto w Polsce produkcję autoklawizowanego betonu komórkowego na licencji firm Ytong i Siporex oraz zakupiono częściowe wyposażenie dwóch zakładów doświadczalnych (Zapotoczna-Sytek i Balkovic 2013). W kolejnych latach nastąpił intensywny rozwój technologii betonu komórkowego, łącznie z opracowaniem polskiej technologii Unipol. Natomiast w 1956 roku, po rozwiązaniu umów licencyjnych z firmami Ytong i Siporex, rozwój produkcji był kontynuowany na podstawie krajowych rozwiązań technologicznych (Zapotoczna-Sytek 2006, Zapotoczna-Sytek i Soboń 2011). Krajowa produkcja betonu komórkowego systematycznie wzrastała do 1989 roku, natomiast w latach 1990-1992 nastąpił jej znaczący spadek, co było związane z ogólnym załamaniem się rynku budowlanego, wynikającym m.in. z transformacji gospodarczej (Zapotoczna-Sytek i Balkovic 2013).

Równocześnie, w końcu lat 80. ubiegłego wieku w Stanach Zjednoczonych i Europie, podjęto pierwsze próby zastosowania pianobetonu w pełnej skali podczas budowy autostrad, mostów, tuneli i niskich konstrukcji nasypów (Brady i in. 2001). W tym samym czasie, czyli na przełomie lat 80. i 90. XX wieku, organizacja badawcza CUR¹ prowadziła w Holandii obszerne badania i prace rozwojowe nad pianobetonem (Van Deijk 1991). Program tych badań uwzględniał opracowanie składu mieszanki pianobetonowej, metody produkcji i właściwości stwardniałego pianobetonu, takie jak: wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu, moduł sprężystości, współczynnik przewodzenia ciepła, mrozoodporność oraz absorpcja wody. W ich wyniku pianobeton został uznany w Holandii za pełnoprawny wyrób budowlany. Równocześnie w tym czasie w Wielkiej Brytanii badania i rozwój pianobetonu zainicjowało *British Cement Association* (BCA). Wyniki prac zostały zawarte w cyklu sześciu publikacji, które ukazały się w latach 1990–1994 (BCA 1990, 1991bcd, 1993, 1994). Zawierały one opis składu i instalacji służącej do wytwarzania mieszanki pianobetonowej oraz opis zalet stosowania i właściwości pianobetonu (tj. wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, modułu sprężystości, współczynnika przewodzenia ciepła oraz skurczu). Efekty tych prac były jednak ukierunkowane przede wszystkim na wykorzystanie pianobetonu podczas zabezpieczania wykopów, rowów i przepustów w autostradach.

¹ Jednostka założona w 1987 roku przez rząd Holandii w celu standaryzacji rozwiązań w budownictwie drogowym, technologii ruchu i projektowania przestrzeni publicznej, obecnie najbardziej znana z Zaleceń CUR (*nl. CUR-Aanbevelingen*). Nazwę organizacji zmieniono w 2018 roku na CROW – Centrum Regulacji i Badań w Technologii Budownictwa Wodnego, Hydraulicznego i Drogowego [www.cur-aanbevelingen.nl/].

Do zwiększenia produkcji i poszerzenia zakresu stosowania pianobetonu w Wielkiej Brytanii (Dransfield 2000) przyczyniły się, zawarte w raporcie krajowym, zalecenia dotyczące stosowania pianobetonu w pracach związanych z przebudową autostrad (Horne 1985) oraz specyfikacje robót drogowych, dotyczące zastosowania pianobetonu przy budowie autostrad i przepustów w autostradach (HA 2004, HAUC(UK) 1992, 1996). W następnych latach pianobeton nie był już tak powszechnie stosowany, głównie z uwagi na brak oceny trwałości (Zhou i Su 2023).

Obecnie wykorzystanie pianobetonu w budownictwie (rys. 1.2) jest statystycznie mniejsze niż 5% w stosunku do wszystkich wyrobów używanych w procesie budowlanym (Zhao i in. 2015). W większości stosuje się go przede wszystkim w funkcji wypełniającej (np. wolne przestrzenie), odciażającej oraz izolacyjnej. Znane są przykłady użycia pianobetonu w konstrukcji nawierzchni bieżni na boiskach sportowych, przy budowie dróg (Lee i in. 2009, Tian i in. 2009, Decký i in. 2016, Kadela i Babiak 2018), przy budowie obiektów mostowych (Cox 2005, Kadela i Chady 2023). Pianobeton jest również stosowany w budownictwie przemysłowym i mieszkaniowym (Singh 2005, Hulimka i in.



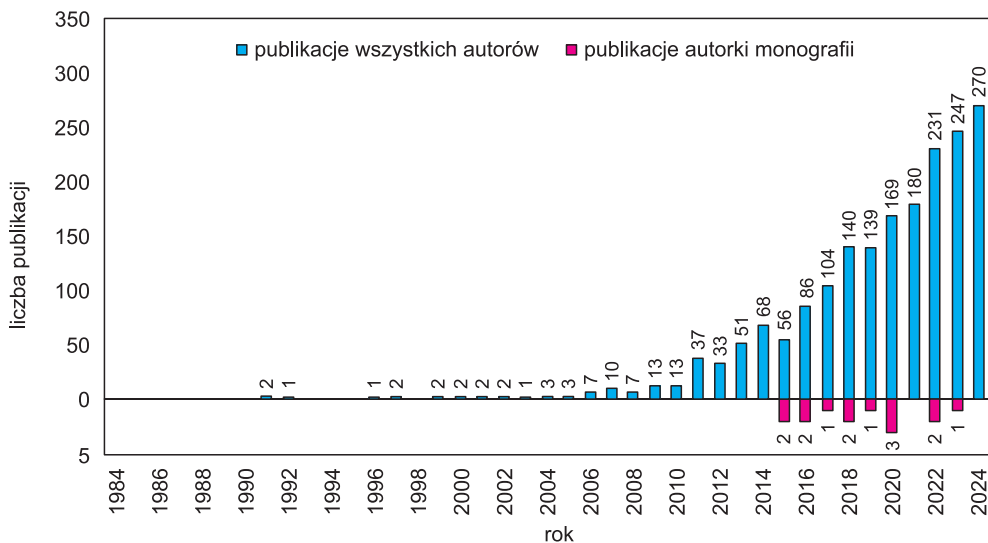
Rys. 1.2. Przykłady zastosowania pianobetonu w budownictwie (Tran i in. 2022)

2011, Mydin i Wang 2011, Amran i in. 2015, Drobiec i in. 2022), głównie jako warstwa wyrównująca (Krzywoń i in. 2017), np. jako warstwa wyrównująco-izolacyjna pod posadzki betonowe. Wydaje się, że niewielkie wykorzystanie pianobetonu związane jest z brakiem wiedzy o zachowaniu i specyfice samego kompozytu, koniecznością zachowania dużych reżimów jakościowych przy jego wytwarzaniu oraz brakiem badań starzeniowych i oceny trwałości pianobetonu (Zhou i Su 2023). Jednakże, zdaniem autorki, główną przyczynę stanowi fakt, że pianobeton i autoklawizowany beton komórkowy wywodzą się z tej samej technologii, stanowiąc tę samą rodzinę betonów komórkowych. Analizując jednak rozwój produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), przedstawiony przez Zapotoczną-Sytek i Balkovica (2013), stwierdza się, że prawdopodobnie po sukcesie związanym z rozwojem autoklawizowanego betonu komórkowego dalsze prace skupiły się na rozwoju technologii jego wytwarzania i docelowo opracowaniu normy PN-EN 771-4 dotyczącej ABK, pomijając w zupełności pianobeton.

Ponowny wzrost zainteresowania kompozytami projektowanymi do konkretnych zastosowań spowodował, że wzrosła rola betonów o zdefiniowanej użyteczności – ang. *defined performance concretes* (Walraven 2002), a w przyszłości również *well defined performance concretes* (Czarnecki i Kurdowski 2006). Stało się to przesłanką do ponownego zainteresowania pianobetonem, w przypadku którego zachodzi możliwość projektowania właściwości w szerokim zakresie, dostosowanych do indywidualnych zastosowań, często o charakterze specjalnym. Sprzęga się to również z poszukiwaniem nowych rozwiązań technologicznych, materiałowych i konstrukcyjnych w ramach dostosowywania przemysłu budowlanego do zmieniających się norm w zakresie zrównoważonego rozwoju (Czarnecki 2022), związanych z gospodarką obiegu zamkniętego (GOZ), zmniejszeniem zużycia energii i ograniczeniem śladu węglowego oraz wpisujących się w normy społeczne (Giergiczny i in. 2002, Zhang i Cheng 2009, Deja i in. 2010, Jaunky 2011, Arouri i in. 2012, Lapinskienė i in. 2017, Sterpu i in. 2018, Woyciechowski 2020, Furtak 2021, Zygmunt i in. 2021, Geryło i Garbacz 2022). Z tego powodu pianobeton postrzegany jest jako „specjalny” kompozyt cementowy, który może spełniać wymagania w zakresie zrównoważonego rozwoju w ciągu całego swojego cyklu życia, w tym warunki niskoemisyjności i energooszczędności (Pan i in. 2014, Amran i in. 2015, Kadela i in. 2018b, Martínez i in. 2019, Falliano 2020b, Shang i in. 2020, Marais i in. 2021, Shah i in. 2021, Cho i in. 2022, Liu i in. 2022, Pasupathy i in. 2022).

Również rozwój technologii w zakresie chemii budowlanej, która przyczyniła się do poprawy jakości środków spieniających oraz rozwój maszyn do wytwarzania piany i mieszanki pianobetonowej sprawiły, że o pianobetonie

ponownie myśli się jako o kompozycie cementowym, który może być stosowany w budownictwie, analogicznie do tradycyjnych wyrobów budowlanych. Trend ten jest szczególnie widoczny w liczbie publikacji naukowych, której wzrost odnotowuje się od 2014 roku w funkcji wykładniczej, co obrazuje rysunek 1.3.



Rys. 1.3. Zestawienie dynamiki przyrostu liczby publikacji z zakresu pianobetonu na przestrzeni lat (opracowanie własne autorki na podstawie bazy Web of Science²)

Powszechne wprowadzenie pianobetonu do stosowania w budownictwie wymaga jednak znajomości jego właściwości oraz sposobu zachowania w danych warunkach obciążeniowych i użytkowych, w których ma zostać zastosowany, ponieważ „nie można (...) mówić, o <trwałym> ani <nietrwałym> (piano³)betonie w kategoriach bezwzględnych; jest (piano³)beton trwały w danym środowisku” (Czarnecki 2004).

Powyższe przesłanki stały się inspiracją do opracowania niniejszej monografii, która stanowi kompleksowe ujęcie tematyki dotyczącej pianobetonu, poczynając od sposobu wytwarzania, poprzez analizę jego właściwości fizycznych, aż po zastosowania w budownictwie. Niniejsza monografia systematyzuje wiedzę z zakresu mieszanek pianobetonowych i stwardniałego pianobetonu oraz definicji z nimi związanych. Istotnym elementem monografii jest szerokie studium

² Dane aktualne na dzień 14 stycznia 2025 r., www.webofscience.com.

³ Dopisek autorki monografii.

nad właściwościami mieszanki pianobetonowej i stwardniałego pianobetonu oraz ocena wpływu składników mieszanki pianobetonowej na ich właściwości, ze szczególnym uwzględnieniem surowców z recyklingu i składników uznawanych jako odpadowe. W monografii przedstawiono opracowane modele matematyczne dla poszczególnych właściwości fizycznych w zależności od gęstości objętościowej stwardniałego pianobetonu na bazie cementu portlandzkiego CEM I. Przeprowadzono unikalne badania pianobetonu w zakresie energii pękania i stabilności wymiarowej. Monografia porusza też zagadnienia związane z trwałością pianobetonu oraz definiuje obszary potencjalnego i powszechnego zastosowania pianobetonu, dążąc do określenia tzw. „zdefiniowanych warunków użytkowania”.

Ponadto, chcąc wprowadzić pianobeton do powszechnego stosowania, zachodzi potrzeba opracowania technologii jego układania. W monografii przedstawiono, opracowane na bazie własnych doświadczeń autorki, wytyczne dotyczące wbudowania pianobetonu w warstwy podbudowy pomocniczej w układzie nawierzchnia-podłoże gruntowe. Wytyczne mogą być również stosowane przy budowie lub przebudowie nawierzchni miejsc obsługi pasażerów (MOP), nawierzchni stacji benzynowych, czy nawierzchni parkingów. Mogą być także rozszerzone na wielkopowierzchniowe elementy budynków, takie jak nawierzchnie przemysłowe, posadzki na gruncie, fundamenty płytowe i izolacje dachowe. Przedstawiono również dwa przykłady zastosowania pianobetonu w kontakcie z podłożem gruntowym w konkretnych realizacjach, w których pianobeton pełni odmienną funkcję (konstrukcyjną lub izolacyjną). Ponadto zdefiniowano w jakim kierunku powinny rozwijać się dalsze badania naukowe nad pianobetonem.