

Wyzwania współczesnej prefabrykacji betonowej

Challenges of modern precast concrete construction

Andrzej Garbacz*

Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology

*corresponding author: A. Garbacz, e-mail: andrzej.garbacz@pw.edu.pl

Streszczenie

Nowoczesna prefabrykacja betonowa jest coraz bardziej istotną częścią współczesnego budownictwa, oferując korzyści takie jak skrócenie czasu realizacji, zmniejszenie zapotrzebowania na robociznę, bardziej efektywną kontrolę jakości, większe bezpieczeństwo pracy oraz efektywność produkcji. Przewiduje się rozwój światowego rynku prefabrykatów betonowych, przy średniorocznej stopie wzrostu przekraczającej 4% w latach 2025–2030. W 2026 roku Europa ma odpowiadać za około 24% przychodów światowego rynku prefabrykatów betonowych, podczas gdy w ciągu najbliższych pięciu lat udział regionu Azji i Pacyfiku może wzrosnąć do ponad 45%, z czego około połowa będzie związana z rynkiem chińskim. Polska odpowiada za około 1% światowego rynku i należy do znaczących producentów prefabrykatów w Europie. Rozwój prefabrykacji napędzają rosnące inwestycje infrastrukturalne, urbanizacja, budownictwo modułowe, cyfryzacja oraz rosnące zapotrzebowanie na rozwiązania zrównoważone i niskoemisyjne. Jednocześnie sektor stoi przed wyzwaniami związanymi z wysokimi nakładami kapitałowymi, logistyką, niedoborem wykwalifikowanej siły roboczej, koniecznością dekarbonizacji oraz ograniczonymi zasobami kruszyw naturalnych. Istotną rolę w dalszym rozwoju nowoczesnej prefabrykacji betonowej będą zatem odgrywać cementy niskoklinkierowe, materiały z recyklingu, zamknięte obiegi materiałowe, jak również postępujący proces cyfryzacji zarówno produkcji samych prefabrykatów, jak również obsługi całego procesu inwestycyjnego.

Słowa kluczowe: prefabrykacja betonowa, budownictwo, beton, cement

Summary

Modern precast concrete construction is becoming an increasingly important part of contemporary construction, offering benefits such as reduced construction time, lower labour requirements, more effective quality control, improved occupational safety and enhanced production efficiency. The global precast concrete market is expected to continue growing, with a compound annual growth rate exceeding 4 % in the period 2025–2030. In 2026, Europe is expected to account for approximately 24 % of global precast concrete market revenues, while over the next five years the share of the Asia-Pacific region may increase to more than 45 %, with approximately half of this market associated with China. Poland accounts for approximately 1 % of the global market and is among the major precast concrete producers in Europe. The development of precast construction is driven by increasing infrastructure investment, urbanization, modular construction, digitalization and growing demand for sustainable and low-carbon solutions. At the same time, the sector faces challenges related to high capital requirements, logistics, shortages of skilled labour, the need for decarbonization and limited natural aggregate resources. Low-clinker cements, recycled materials, closed-loop material systems, as well as the ongoing digitalization of both precast production and the management of the entire investment process, will therefore play an important role in the further development of modern precast concrete construction.

Keywords: precast concrete construction, construction industry, concrete, cement

1. Wprowadzenie

Nowoczesna prefabrykacja betonowa odgrywa istotną rolę w budownictwie, a jej udział w rynku budowlanym stale rośnie. Wzrost zainteresowania prefabrykacją betonową wynika z możliwości ograniczania kosztów, czasu i nakładów pracy oraz poprawy jako-

1. Introduction

Modern precast concrete technology plays an important role in the construction industry, and its share of the construction market continues to increase. Growing interest in precast concrete results from its potential to reduce costs, construction time and labour

ści budowy dzięki standaryzacji procesów, która zapewnia dobrą kontrolę jakości i lepsze wykończenie. To przejście w kierunku budowy poza placem budowy radykalnie zmienia łańcuch wartości branży budowlanej i stanowi bezpośrednią strategiczną odpowiedź na utrzymujące się niedobory siły roboczej na placu budowy i presję terminów oraz zwiększa bezpieczeństwo pracowników w miejscu pracy. Zalety współczesnej prefabrykacji betonowej sprawiają, że zmienia się postrzeganie prefabrykacji budowlanej w Polsce, która do niedawna kojarzyła się z tak zwaną „wielką płytą”, z jej niską jakością oraz monotonią budynków i osiedli. Dzisiejsze możliwości techniczne, materiałowe, projektowe pozwalają zrealizować nawet bardzo złożone i niezwykle projekty, ale w przypadku budownictwa inicjującym punktem jest wizja architektów, którzy dostrzegają obecnie zalety i możliwości jakich dostarcza prefabrykacja. Nową jakością współczesnej prefabrykacji jest bowiem zindywidualizowanie projektów, co jest warunkiem koniecznym rozwoju prefabrykacji w obszarze budownictwa mieszkaniowego i użyteczności publicznej. Masowa produkcja powtarzalnych elementów dotyczyć może w tej chwili głównie elementów infrastruktury instalacyjnej i drogowej, konstrukcji prostych obiektów przemysłowych czy też elementów drobnowymiarowych. Pozostałe obszary budownictwa wymagają indywidualnego podejścia do formy i estetyki elementów, umożliwiających tworzenie obiektów atrakcyjnych wizualnie i optymalnie przystosowanych do potrzeb inwestora i użytkownika, a w przestrzeni medialnej można znaleźć coraz więcej realizacji spektakularnych zarówno pod względem estetycznym, jak i funkcjonalnym.

Raporty opracowane przez firmy konsultingowe przewidują stały wzrost udziału prefabrykacji w rynku budowlanym – średnioroczna stopa wzrostu CAGR [z ang. Compound Annual Growth Rate] w latach 2025-2030 ma wynieść powyżej 4%. W 2026 roku udział Europy w przychodach światowego rynku prefabrykatów betonowych wyniesie ok. 24%. Najbardziej dynamicznie prefabrykacja rozwija się jednak w krajach Azji i Pacyfiku. W najbliższych pięciu latach udział tych krajów może wzrosnąć do ponad 45%, z czego połowa związana jest prefabrykacją w Chinach. Za dominujący w Europie uważa się niemiecki rynek prefabrykacji [prawie 25%], ale za najszybciej rozwijający się uważany jest rynek hiszpański. Jestem przekonany, że udział polskiej prefabrykacji będzie stale wzrastał, już w tej chwili notując ok. 1 % udziału w globalnym rynku, a Polska jest wymieniana wśród największych graczy w Europie. Zasadniczy udział w prefabrykacji stanowią elementy konstrukcyjne [ok. 37%]. Drugim obszarem zastosowań są architektoniczne elementy prefabrykowane, takie jak fasady, elementy dekoracyjne, co jest wynikiem zwiększonego wykorzystania elastycznego projektowania architektonicznego i rewitalizacji starych budynków. Podział na poszczególne obszary zastosowań prefabrykacji, tj. budownictwo mieszkaniowe, przemysłowe, komercyjne i infrastrukturalne jest dość równomierny – po ok. 25%. Przewiduje się, że tego rodzaju struktura będzie utrzymywać się do 2030 roku.

Analizy firm konsultingowych wskazują, że wobec wyzwań związanych z zapotrzebowaniem na szybką realizację inwestycji infrastrukturalnych i rozwój budownictwa mieszkaniowego szybkość

requirements, while improving construction quality through process standardization, which provides effective quality control and a higher standard of finish. This shift towards off-site construction is radically transforming the value chain of the construction industry and represents a direct strategic response to persistent labour shortages on construction sites and schedule pressures, while also improving worker safety.

The advantages of modern precast concrete technology are changing the perception of precast construction in Poland, which until recently was associated with the so-called “large-panel system”, its low quality, and the monotonous appearance of buildings and housing estates. Today’s technological, material and design capabilities make it possible to implement even highly complex and unconventional projects. In construction, however, the starting point is the vision of architects, who are increasingly recognizing the advantages and opportunities offered by precast technology. A new quality of modern precast construction lies in the individualization of designs, which is a prerequisite for the further development of precast technology in residential and public buildings. Mass production of repetitive elements can currently be applied mainly to utilities and road infrastructure components, structures for simple industrial buildings and small-size precast elements. Other areas of construction require an individual approach to the form and aesthetics of precast elements, enabling the creation of visually attractive structures optimally adapted to the needs of the investor and end user. An increasing number of spectacular projects can also be found in the media, distinguished both by their aesthetic qualities and functionality.

Reports prepared by consulting firms forecast continued growth in the share of precast construction in the building market, with a compound annual growth rate [CAGR] exceeding 4 % expected for the period 2025–2030. In 2026, Europe is expected to account for approximately 24 % of global precast concrete market revenues. The most dynamic growth in precast construction is observed, however, in the Asia-Pacific region. Over the next five years, the share of these countries may increase to more than 45 %, with approximately half of this market associated with precast construction in China. The German precast construction market is considered the dominant market in Europe, accounting for almost 25 %, whereas the Spanish market is regarded as the fastest-growing. The share of Polish precast construction is also expected to increase steadily. It currently accounts for approximately 1 % of the global market, and Poland is already listed among the major players in the European market. Structural precast elements account for the largest share of the market, at approximately 37 %. The second major application area comprises architectural precast elements, such as façades and decorative components, reflecting the increasing use of flexible architectural design and the revitalization of existing buildings. The distribution of precast applications among residential, industrial, commercial and infrastructure construction is relatively even, at approximately 25 % for each sector. This structure is expected to remain broadly unchanged through 2030.

produkcji poza placem budowy stanowi kluczową zaletę, a metody prefabrykacji umożliwiają ukończenie projektu kilka miesięcy przed terminem, zwiększając w niektórych przypadkach zwrot z inwestycji dewelopera o ponad 10%. Czynniki zrównoważonego rozwoju mają dwójakie znaczenie: produkcja prefabrykatów minimalizuje ilość odpadów na miejscu budowy, a proces produkcji prefabrykatów betonowych może zmniejszyć do 15% zużycie energii w budynku. Co więcej, integracja zaawansowanych technologii, takich jak automatyczne systemy pielęgnacji, zrobotyzowane deskowanie i druk 3D, sprawia, że prefabrykaty stają się bardziej atrakcyjną opcją, zwiększając precyzję dzięki automatyzacji produkcji prefabrykatów i rozszerzając możliwości architektoniczne dzięki prefabrykowanym fasadom betonowym i architektonicznym panelom prefabrykowanym. Kluczowym trendem rynkowym jest przyspieszone wdrażanie modułowych systemów konstrukcyjnych. Wdrażanie tego rodzaju modułowych prefabrykatów przestrzennych w projektach mieszkaniowych i hotelarskich przyspiesza, a niektóre zastosowania skracają czas budowy nawet o 50% w porównaniu z tradycyjnymi budynkami. Trend ten jest wspierany przez elastyczność projektowania prefabrykatów i zaawansowane projektowanie elementów prefabrykowanych. Standardem jest wykorzystanie BIM, a ostatnio wdrażana jest technologia bliźniaków cyfrowych i AI, dzięki czemu możliwy jest płynny cyfrowy proces produkcji od projektu do hali produkcyjnej, a liczba kolizji na placu budowy może ulec obniżeniu o ponad 95%.

Do najważniejszych wyzwań stojących przed prefabrykacją betonową i ograniczających jej rozwój zalicza się wysokie początkowe wymagania kapitałowe i znaczne ograniczenia logistyczne. Złożoność logistyczna może sprawić, że koszty transportu mogą obniżyć nawet 30% oszczędności kosztów produkcji w przypadku projektów zlokalizowanych poza optymalnym promieniem od zakładu. Z kolei, ciągły niedobór wykwalifikowanej siły roboczej może zwiększyć koszty pracy w projektach o ponad 20% w regionach o dużej konkurencji. Ponadto, obecne dążenie do dekarbonizacji budownictwa, ograniczenie śladu węglowego betonu i zminimalizowanie wykorzystania zasobów naturalnych zmusza branżę do poszukiwania nowych rozwiązań zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju i gospodarki obiegu zamkniętego. Standardem stały się już cementy niskoklinkierowe, a perspektywnie należy się spodziewać wdrożenia także innych zamienników klinkieru. Podobnym wyzwaniem są kurczące się zasoby kruszyw naturalnych, zarówno w wyniku intensywnej eksploatacji, jak i ograniczeń dostępności z uwagi na ochronę środowiska. Można spodziewać się intensyfikacji badań w kierunku zastępowania kruszywa naturalnego poroziórkowym gruzem betonowym, czy też stosowania obiegu zamkniętego własnego gruzu poprodukcyjnego w wytwórniach. Przyszłościowym wyzwaniem jest także takie konstruowanie obiektu z prefabrykatów, aby możliwy był wysoki stopień ponownego użycia elementów poroziórkowych w tej samej funkcji i formie co pierwotna, które można bez uszkodzenia zdemontować i ponownie użyć w budowie kolejnego obiektu.

Wspomniane zalety nowoczesnej prefabrykacji sprawiają, że należy oczekiwać wzrostu jej udziału w rynku budowlanym. Firmy

Analyses by consulting firms indicate that, in view of the growing demand for rapid implementation of infrastructure projects and the development of residential construction, the speed of off-site production is a key advantage. Precast methods can enable projects to be completed several months ahead of schedule and, in some cases, increase developers' return on investment by more than 10%. Sustainability has a dual significance in this context: precast production minimizes the amount of waste generated on the construction site, while the production of precast concrete elements can reduce building energy consumption by up to 15%. Furthermore, the integration of advanced technologies, such as automated curing systems, robotic formwork and 3D printing, makes precast construction an increasingly attractive option. These technologies improve production precision through automation and expand architectural possibilities through the use of precast concrete façades and architectural precast panels. A key market trend is the accelerated implementation of modular structural systems. The adoption of three-dimensional modular precast units in residential and hotel projects is gaining momentum, with some applications reducing construction time by as much as 50% compared with conventional construction. This trend is supported by the flexibility of precast design and advanced design methods for precast elements. BIM has become standard practice, while digital twin technology and artificial intelligence [AI] are increasingly being implemented. As a result, a seamless digital production workflow from design to the manufacturing plant is becoming possible, while the number of clashes on construction sites can be reduced by more than 95%.

Among the major challenges facing precast concrete construction and limiting its development are high initial capital requirements and significant logistical constraints. Logistical complexity can result in transportation costs reducing production cost savings by as much as 30% for projects located beyond the optimal service radius of a precast plant. At the same time, the persistent shortage of skilled labour can increase labour costs by more than 20% in highly competitive regions. In addition, the current drive to decarbonize the construction sector, reduce the carbon footprint of concrete and minimize the use of natural resources is forcing the industry to seek new solutions consistent with the principles of sustainable development and the circular economy. Low-clinker cements have already become standard practice, and the implementation of other clinker substitutes can also be expected in the future.

The depletion of natural aggregate resources represents a similar challenge, resulting both from intensive extraction and from restrictions on resource availability associated with environmental protection. Research can be expected to increasingly focus on replacing natural aggregate with recycled concrete demolition waste and on implementing closed-loop systems for the reuse of internally generated production waste at precast plants. A further future challenge is to design precast structures in such a way as to enable a high degree of reuse of reclaimed elements in the same function and form as their original application. This requires elements to be designed for disassembly so that they can

konsultingowe jako czynniki napędzające jej rozwój wymieniają rosnące wydatki na infrastrukturę drogową i wodną, wzrost popularności budownictwa modułowego i prefabrykowanego oraz szybka urbanizacja w krajach rozwijających się, rosnące znaczenie zrównoważonego i niskoemisyjnego budownictwa, w tym wykorzystania materiałów odnawialnych i z recyklingu. Pewnym wyzwaniem są rosnące koszty kapitałowe wraz z rosnącymi wyzwaniami związanymi z transportem i modyfikacją prefabrykacji betonu. Rosnące zainteresowanie prefabrykacją jest niewątpliwie wynikiem wdrażania innowacyjnych rozwiązań materiałowo-technologicznych, uwzględniających również wymagania polityki klimatycznej. W kształtowaniu europejskiego rynku prefabrykatów betonowych znaczącą rolę odgrywają dokumenty normalizacyjne. Rozporządzenie w sprawie wyrobów budowlanych [CPR] i aktualizacje zharmonizowanych norm, takich jak EN 1992-1-1 [Eurokod 2] i EN 15251, zostały zmienione w celu uwzględnienia postępów w zakresie materiałów, metodologii produkcji i podejść projektowych. Ponadto Federacja Europejskiego Przemysłu Prefabrykatów Betonowych [BIBM] ogłosiła w 2023 r. BIBM Decarbonisation Pledge, prezentując zaangażowanie branży w promowanie zrównoważonego i niskoemisyjnego społeczeństwa. Te przepisy i inicjatywy będą miały głęboki wpływ na rynek, napędzając innowacje i zrównoważony rozwój w branży prefabrykatów betonowych, w tym również w Polsce.

be dismantled without damage and subsequently reused in the construction of another structure.

The aforementioned advantages of modern precast construction indicate that its share of the construction market is likely to continue to increase. Consulting firms identify several key drivers of this development, including increasing expenditure on road and water infrastructure, the growing popularity of modular and precast construction, rapid urbanization in developing countries, and the increasing importance of sustainable and low-carbon construction, including the use of renewable and recycled materials. At the same time, rising capital costs, together with increasing transportation challenges and the need to adapt precast concrete production processes, constitute important constraints.

The growing interest in precast construction is undoubtedly also driven by the implementation of innovative material and technological solutions that take into account the requirements of climate policy. Standardization documents play a significant role in shaping the European precast concrete market. The Construction Products Regulation (CPR) and updates to harmonized standards, such as EN 1992-1-1 (Eurocode 2) and EN 15251, have been revised to reflect advances in materials, production methodologies and design approaches. Furthermore, the Federation of the European Precast Concrete Industry (BIBM) announced the BIBM Decarbonisation Pledge in 2023, demonstrating the industry's commitment to promoting a sustainable and low-carbon society. These regulations and initiatives are expected to have a profound impact on the market, driving innovation and sustainability in the precast concrete industry, including in Poland.