

Selected solutions for the production of precast concrete elements in the era of Industry 4.0

Wybrane rozwiązania stosowane w produkcji prefabrykatów w erze przemysłu 4.0

DOI: 10.15199/33.2025.10.16

Summary: The aim of the article is to present selected issues and solutions in the field of prefabrication for the needs of construction used in industrial production lines. The research methodology includes the author's observations of automated devices used, among others, in flow lines for forming reinforced concrete flat elements. Photos and basic technical characteristics of these devices are presented, and descriptions of their operation are included. In addition, the issue of software for designing and planning the production of precast concrete elements is discussed. The conclusions formulate potential benefits resulting from the further development of automation and digitalization in the production processes of prefabricated elements and further directions of development of the precast concrete industry.

Keywords: Industry 4.0; prefabrication; manufacturing, automation, concrete.

Streszczenie: Celem artykułu jest przedstawienie wybranych zagadnień i rozwiązań z dziedziny prefabrykacji na potrzeby budownictwa stosowanych w przemysłowych liniach produkcyjnych. Metoda badań obejmuje prowadzone przez mnie obserwacje zautomatyzowanych urządzeń wykorzystywanych m.in. w liniach potokowych do formowania żelbetowych elementów płaskich. Zaprezentowano zdjęcia oraz podstawowe charakterystyki techniczne tych urządzeń, zawarto opisy sposobu ich działania. Ponadto, poruszono zagadnienie oprogramowania do projektowania i planowania produkcji prefabrykatów. We wnioskach sformułowane zostały potencjalne korzyści wynikające z dalszego rozwoju automatyzacji i digitalizacji w procesach produkcyjnych prefabrykatów i dalsze kierunki rozwoju przemysłu produkcji prefabrykatów.

Słowa kluczowe: Przemysł 4.0; prefabrykacja; produkcja; automatyzacja; beton.

The term “Industry 4.0” was first used in 2011 at the Hannover Fair and sparked a wave of revolution across many industries [1]. Industry 4.0 is also described as the Fourth Industrial Revolution, representing the trend of developing modern intelligent technologies in traditional production and industrial practices. In this era of transformation, various technologies are connecting the virtual world with the real world, transforming the production model from digital to intelligent [2]. The Third Industrial Revolution preceding Industry 4.0 included the development of semiconductors and large computer systems (1960s), personal computers (1970s and 1980s), and the Internet (1990s) [3]. In the precast concrete industry, this period was associated with advances in the mechanization of production lines and the gradual elimination of manual labour. In Poland, this process coincided with the need to rebuild the country after the devastation of World War II and the need to provide housing for a rapidly growing population, particularly in large urban centres. The ongoing Fourth Industrial Revolution, in the case of precast concrete production, involves the emergence of smart factories equipped with component production systems and employing workers who communicate via networks and mobile devices. The development of the precast concrete industry is driven by factors such

Termin „Przemysł 4.0” został po raz pierwszy użyty w 2011 r. na targach w Hanowerze i wywołał falę rewolucji w wielu gałęziach przemysłu [1]. Przemysł 4.0 jest opisywany także jako Czwarta Rewolucja Przemysłowa, reprezentująca trend rozwoju nowoczesnych inteligentnych technologii w tradycyjnych praktykach produkcyjnych i przemysłowych. W epoce transformacji różne technologie łączą świat wirtualny ze światem rzeczywistym, przekształcając model produkcji z cyfrowego na inteligentny [2]. Trzecia Rewolucja Przemysłowa poprzedzająca Przemysł 4.0 obejmowała rozwój półprzewodników i dużych systemów komputerowych (lata sześćdziesiąte XX wieku), komputerów osobistych (lata siedemdziesiąte i osiemdziesiąte XX wieku) oraz Internetu (lata dziewięćdziesiąte XX wieku) [3]. W przemyśle prefabrykatów betonowych okres ten wiązał się z postępowaniem w mechanizacji linii produkcyjnych i stopniową eliminacją pracy ręcznej. W Polsce proces ten zbiegł się z potrzebą odbudowy kraju po zniszczeniach II wojny światowej i koniecznością zapewnienia mieszkań dla szybko zwiększającej się populacji, szczególnie w dużych ośrodkach miejskich. Trwająca Czwarta Rewolucja Przemysłowa, w przypadku produkcji prefabrykatów betonowych polega na pojawieniu się inteligentnych fabryk, wyposażonych w systemy produkcji komponentów i zatrudniających pracowników komunikujących się za pośrednictwem sieci i urządzeń mobilnych. Rozwój w branży prefabrykatów

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; aleksander.nical@pw.edu.pl

as the constant need to develop new structures, the low productivity of the construction sector compared to other sectors, low material efficiency, low levels of automation in design and construction, a lack of skilled workers, and the increasing scarcity of natural resources [4]. Labor productivity in the construction sector has remained stable over the last century [4], with global growth averaging 1% per year over the last two decades (world economy 2.8%, industrial production 3.6%). Other sectors, such as agriculture and manufacturing, have increased their productivity 10–15 times since the 1950s [5]. The construction sector is also a major contributor to the negative impact on the environment. Buildings account for 39% of energy-related carbon dioxide (CO₂) emissions and over 36% of global energy consumption [6]. Industrial prefabrication production, which is independent of weather conditions and involves the use of machines performing repetitive tasks with high precision, offers greater opportunities for implementing innovations than monolithic construction [7]. Prefabrication also addresses current challenges related to sustainable development and the pandemic situation in recent years [8–10].

Materials and Research Method

The research was conducted in two areas of precast production: digitalization and process automation. Digitalization involved the analysis of selected programs currently available on the market for the design and production of precast concrete elements, while automation involved the analysis of selected machines and devices used in computer-controlled production lines. Research materials were obtained during study visits, which enabled the development of a research method involving the analysis of programs integrated with the following systems:

- CAD (Computer Aided Design);
- ERP (Enterprise Resource Planning);
- CAM (Computer Aided Manufacturing);
- BIM (Building Information Modeling) [11].
- the research method for machines and equipment used on production lines involved analysing solutions that:
 - eliminate manual labour, or delegate it to supervisors at control panels,
 - integrate with CAD/BIM systems and transmit digital information to machine and equipment controllers.

The research I conducted over the last three years covered mostly solutions used by European manufacturers of prefabricated components for the construction industry.

Results and Discussion

Among the software analysed was **Technical Information/Integration Manager (TIM)**. It is a 3D planning platform that enables, among other things, the optimization of production, logistics, and assembly processes. The advantage of working in TIM, which is based on a 3D model, is the ease of process management, as it is very intuitive [12].

The software allows export of data contained in the model (both graphical and non-graphical) using various formats. Depending on the requirements imposed by the precast production

betonowych wynika m.in. z ciągłej potrzeby opracowywania nowych konstrukcji, małej produktywności sektora budowlanego w porównaniu z innymi sektorami, małej efektywności wykorzystania materiałów, niskiego poziomu automatyzacji w projektowaniu i budowie, braku wykwalifikowanych pracowników i zwiększającego się niedoboru zasobów naturalnych [4].

Produktywność pracy w sektorze budowlanym pozostała na tym samym poziomie przez ostatnie stulecie [4], przy globalnym jej zwiększeniu wynoszącym średnio 1% rocznie w ciągu ostatnich dwóch dekad (gospodarka światowa 2,8%, produkcja przemysłowa 3,6%). Inne sektory, takie jak rolnictwo i produkcja, zwiększyły swoją produktywność 10–15 razy od lat pięćdziesiątych XX wieku [5]. Sektor budowlany jest również jednym z głównych czynników mającym negatywny wpływ na środowisko. Budynki odpowiadają za 39% emisji dwutlenku węgla (CO₂) związanego z energią i ponad 36% globalnego zużycia energii [6]. Przemysłowa produkcja prefabrykatów, która jest niezależna od czynników atmosferycznych i związana z wykorzystaniem maszyn wykonujących z dużą precyzją powtarzalne czynności, daje większą szansę na wdrażanie innowacji niż w przypadku budownictwa monolitycznego [7]. Prefabrykacja wychodzi ponadto naprzeciw obecnym wyzwaniom związanych ze zrównoważonym rozwojem oraz z sytuacją pandemiczną w ostatnich latach [8–10].

Materiały i metoda badań

Badania przeprowadzono w dwóch obszarach produkcji prefabrykatów, tj. digitalizacji i automatyzacji procesu. Digitalizacja objęła analizę wybranych programów dostępnych obecnie na rynku do projektowania i produkcji prefabrykatów z betonu, natomiast automatyzacja dotyczyła analizy wybranych maszyn i urządzeń, które znajdują się na wyposażeniu linii produkcyjnych, sterowanych komputerowo. Materiały do badań pozyskano podczas wizyt studyjnych, które umożliwiły wypracowanie metody badawczej polegającej na analizowaniu programów, które są zintegrowane z systemami:

- CAD (Computer Aided Design, pol. Projektowanie wspomagane komputerowo);
- ERP (Enterprise Resource Planning, pol. Planowanie zasobów przedsiębiorstwa);
- CAM (Computer Aided Manufacturing, pol. Komputerowe wspomaganie wytwarzania);
- BIM (Building Information Modeling, pol. Modelowanie informacji o budynku) [11].

Metoda badań maszyn i urządzeń stosowanych na liniach produkcyjnych polegała na analizie rozwiązań:

- eliminujących pracę ręczną, ewentualnie delegowanie jej do nadzoru z poziomów pulpitów sterowniczych,
- integrację z systemami CAD/BIM i przekazywanie informacji zdigitalizowanej do sterowników maszyn i urządzeń.

Badania, które przeprowadziłem w ostatnich trzech latach, obejmowały w przeważającej części rozwiązania stosowane przez europejskich producentów prefabrykatów dla budownictwa.

plant, data can be exported using specialized data exchange interfaces such as UNI, IFC, IFC4PRECAST, DXF, DWG, PDF, 3D-PDF, PXML, and many others [13, 14]. The TIM software is equipped with a Collaboration Manager module, which allows for detailed viewing of the three-dimensional building model after selecting a project or part of a project within the building structure [11]. Additionally, this module allows for downloading information about each prefabricated part and installation components, including reinforcement and documentation [11, 12]. The user can also assign deadlines for each manufactured element and automatically obtain a production schedule [11]. The TIM software also includes a Production Manager module, which offers optimal planning and placement of prefabricated elements on production lines and pallets.

Another software solution is **RIB One Prefab**, which integrates ERP (Planning and Scheduling Platform), MES (Manufacturing Execution System), Automation (Machine and Plant Control Family – Automation, a family for controlling machines and production plants), and Stockyard (Stockyard and Logistic Solution). Enterprise resource planning (ERP) in a precast concrete plant acts as the central nervous system of the enterprise [15]. It helps in the effective management of all key processes and operations, combining them into an integrated system. MES, in turn, is a comprehensive, dynamic software system that monitors, tracks, documents, and controls the production process, from raw materials (including aggregates, cement, admixtures) to finished precast concrete products. It provides a functional layer between enterprise resource planning (ERP) and process control systems.

The manufacturing management system (MES) provides decision-makers with the data they need to increase production efficiency [16]. The machine and plant control family provides expert automation services for all machines used in precast production, enabling them to work with BIM input data. Thanks to a 24/7 support hotline, the production plant can operate in three shifts.

Solutions for the storage yard and logistics include, among other things, full automation of warehouse equipment and stacking cranes, as well as automatic launching and transfer of goods for transport by trucks. The software enables order planning and production scheduling of prefabricated elements. The RIB software interface displays the status of the current order, including information on whether the element is ready for production, is currently in production, and has been delivered to the recipient or is awaiting approval. The RIB One Prefab production management system streamlines digital production and qualifies BIM data from all projects and intelligently places production units on workshop tables (photo 1). Based on the acquired data, the main computer plans the production process at all workstations [17]. The software enables automatic arrangement (“nesting”) of the completed double-layer walls on forming tables (photo 1). It contributes to savings in the preparation of formwork profiles and promotes optimal use of the forming surface. The symbols in the “type” column refer to the respective precast element, e.g., HC – Hollow Core Slab (multi-hole hollow core slab), SW – Sandwich Wall (multi-layer wall), S1 – First layer of filigree

Wyniki i dyskusja

Wśród przeanalizowanego oprogramowania był **Techniczny Informacyjny/Integracyjny Manager (TIM)**. Jest on platformą do planowania 3D, która umożliwia m.in.: optymalizację procesów związanych z produkcją, logistyką i montażem. Zaletą pracy w TIM, który bazuje na modelu 3D, jest łatwość zarządzania procesami, ponieważ odbywa się ono w bardzo intuicyjny sposób [12]. Oprogramowanie umożliwia eksport danych zawartych w modelu (zarówno graficznych, jak i niegraficznych) przy użyciu różnych formatów. W zależności od wymagań narzuconych przez zakład produkcyjny prefabrykatów dane można wyeksportować w specjalistycznych interfejsach wymiany danych, takich jak UNI, IFC, IFC4PRECAST, DXF, DWG, PDF, 3D-PDF, PXML oraz w wielu innych [13, 14]. Oprogramowanie TIM wyposażone jest w moduł Collaboration Manager, który umożliwia po wybraniu projektu bądź jego części w strukturze budynku, szczegółowe przeglądanie trójwymiarowego modelu budynku [11]. Dodatkowo, w module tym istnieje możliwość pobierania informacji o każdej prefabrykowanej części i częściach instalacyjnych aż po zbrojenie i dokumentację dotyczącą tych elementów [11, 12]. Użytkownik może także przydzielać terminy realizacji każdego wytwarzanego elementu i w sposób automatyczny uzyskiwać harmonogram procesu produkcji [11]. Oprogramowanie TIM ma także m.in. moduł Production Manager, oferujący optymalne planowanie i umieszczenie prefabrykatów na liniach produkcyjnych i paletach.

Kolejnym oprogramowaniem jest **RIB One Prefab Software**, który integruje środowisko ERP (Planning and Scheduling Platform, czyli Planowanie zasobów przedsiębiorstwa), MES (Manufacturing Execution System, tj. System zarządzania produkcją), Automation (Machine and Plant Control Family – Automatyzacja, Rodzina do sterowania maszynami i zakładami produkcyjnymi) oraz Stockyard (Stockyard and Logistic Solution, czyli Plac składowy i logistyka). Planowanie zasobów przedsiębiorstwa (ERP) w zakładzie produkcji prefabrykatów betonowych działa jak centralny układ nerwowy przedsiębiorstwa [15]. Pomaga w efektywnym zarządzaniu wszystkimi kluczowymi procesami i operacjami, łącząc je w zintegrowany system. Z kolei MES to kompleksowy, dynamiczny system oprogramowania, który monitoruje, śledzi, dokumentuje i kontroluje proces produkcji wyrobów począwszy od surowców (m.in. kruszywa, cement, domieszki) po gotowe prefabrykowane produkty betonowe. Zapewnia warstwę funkcjonalną między Planowaniem zasobów przedsiębiorstwa (ERP) a systemami kontroli procesów. System zarządzania produkcją (MES) dostarcza decydom danych, których potrzebują, aby zwiększyć wydajność produkcyjną [16]. Rodzina do sterowania maszynami i zakładami produkcyjnymi odnosi się do usług ekspertów w dziedzinie automatyzacji wszystkich maszyn wykorzystywanych w produkcji prefabrykatów, umożliwiając im pracę z danymi wejściowymi BIM. Dzięki całodobowej infolinii wsparcia zakład produkcyjny może pracować na 3 zmiany. Rozwiązania dotyczące placu składowego i logistyki obejmują m.in. pełną automatyzację urządzeń magazynowych i dźwigów sztaplujących oraz automatyczne uruchamianie i przekazywanie do transportu pojazdów ciężarowych. Oprogramowanie umożli-

(first layer of filigree slabs), S2 – Second layer of filigree (second layer of filigree slabs). Individual precast elements are assigned positions, and the production date, concrete type, and element dimensions are provided. Labels, which are synchronized with the appropriate mobile application, and in conjunction with the module, enable the monitoring of element status based on QR codes. The RIB software also provides information on the progress of precast element deliveries to the construction site, including the shipment number, driver's personal data, the license plate numbers of the vehicle transporting the shipment, the shipment weight, and the delivery address. There are also many other programs available on the market for managing precast production processes, such as ERPBOS®, AHEADAPS, EBOS®, progress vision, profit, Stabos Pro [19], or The Elematic ELISLAB 2.0 [20].

wia planowanie zamówień oraz harmonogramowanie produkcji prefabrykatów. W interfejsie oprogramowania RIB widoczny jest status realizowanego zamówienia, w tym m.in. informacja o tym, czy element jest gotowy do produkcji, ewentualnie znajduje się w trakcie produkcji oraz czy został dostarczony do odbiorcy lub oczekuje na akceptację. System zarządzania produkcją RIB One Prefab usprawnia cyfrową produkcję i kwalifikuje dane BIM ze wszystkich projektów oraz inteligentnie umieszcza jednostki produkcyjne na stołach w warsztacie. Na podstawie pozyskanych danych, komputer główny planuje proces produkcji na wszystkich stanowiskach roboczych [17].

Oprogramowanie umożliwia automatyczne rozmieszczenie („gniazdowanie”) wykonywanych ścian dwuwarstwowych na blatach formujących (fotografia 1). Przyczynia się do oszczędności w czasie przygotowania profili szalunkowych

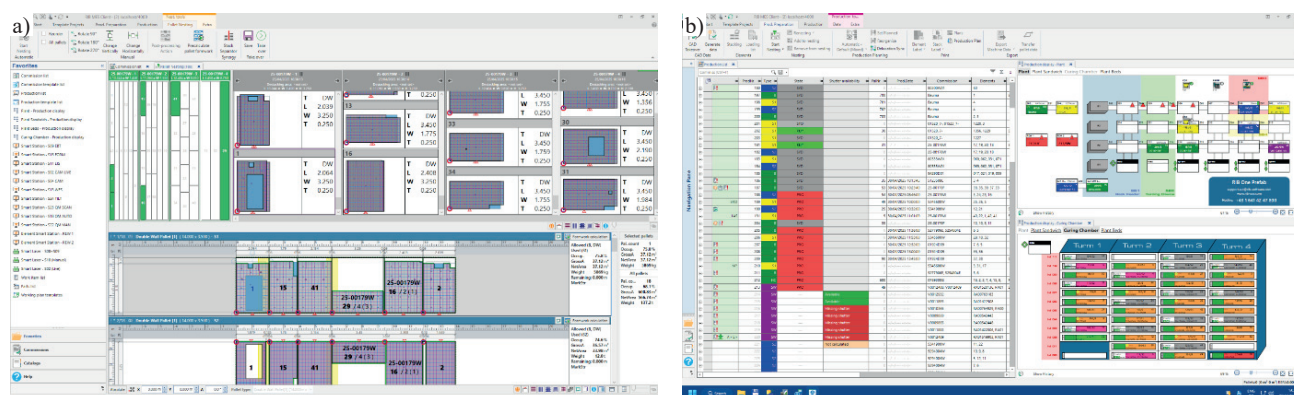


Photo. 1. RIB One Prefab production preparation and pallet nesting (a) as well as production list (b) [18]
Fot. 1. Planowanie produkcji i rozmieszczanie elementów na blatach formujących (a) i lista produkcyjna RIB One (b) [18]

The software selection criterion was, among other things, its ability to be integrated with precast production processes. **Pallet circulation systems** for the production of double walls, with and without insulation, are generally highly automated. These lines also utilize devices for the production of reinforcing mats and truss girders, automatic reinforcement placement, and automatic concrete distributors [21]. During the production of double walls, the first layer is rotated over the freshly poured second layer using a turntable. The process is supported by software that visualizes and optimizes production. The manufactured products can be equipped with an insulating layer.

The stirrup production machines are equipped with a quick wire change system (photo 2), automatic changeover from double to single processing, and automatic straightening set adjustment, ensuring very high efficiency [21]. The machines are adapted for 3D bending during the production of three-dimensional reinforcement stirrups.

The technical parameters of the automatic stirrup benders used are summarized in the table. Current equipment also includes straighteners and double benders simultaneously. An example of such a device is the Pluristar, which operates with wire diameters of 6–16 mm. This device has a combined straightening system consisting of a roller straightener and a rotary straightener. This solution allows for the flexible production of

oraz sprzyja optymalnemu wykorzystaniu powierzchni formującej. Symbole w kolumnie „type” dotyczą odpowiednio wykonywanego prefabrykatu, np. HC – Hollow Core slab (wielotworowa płyta kanałowa), SW – Sandwich Wall (ściana wielowarstwowa), S1 – First layer of filigree (pierwsza warstwa płyt typu filigran), S2 – Second layer of filigree (druga warstwa płyt typu filigran). Poszczególnym prefabrykatom przypisane są stanowiska, podana jest data produkcji, rodzaj betonu oraz wymiary elementu. Dzięki etykietom, które podlegają synchronizacji z odpowiednią aplikacją do urządzeń mobilnych i w połączeniu z modułem możliwy jest proces monitorowania statusu elementów bazujący na kodach QR. Oprogramowanie RIB dostarcza także informacje o zaawansowaniu dostaw prefabrykatów na budowę, m.in. numer przesyłki, dane osobowe kierowcy, numery tablic rejestracyjnych pojazdu transportującego przesyłkę, masę przesyłki i adres dostawy. Na rynku dostępnych jest także wiele innych programów do obsługi procesów produkcyjnych prefabrykatów, takich, jak m.in. ERPBOS®, AHEADAPS, EBOS®, progress vision, profit, Stabos Pro [19] lub The Elematic ELISLAB 2.0 [20].

Kryterium wyboru oprogramowania była m.in. możliwość jego integracji z procesami produkcyjnymi prefabrykatów. **Sytemy obiegu palet do produkcji ścian podwójnych** z izolacją i bez izolacji są na ogół w wysokim stopniu zautomatyzowane. Linie tego rodzaju wykorzystują także urządzenia do

reinforcing stirrups, straight bars, and bars with large bends using a single machine. Wire replacement can be performed fully automatically or manually, depending on the needs.

A 3D bending system is also possible, allowing obtaining not only two-dimensional but also three-dimensional reinforcing stirrups [22].

The plotter traces the outlines of the concrete elements onto the cleaned surface of the pallet formwork or forming board, which has been previously coated with lubricant (photo 2).

A robotic system [23] can also be used to increase the degree of automation. Before concreting, the formwork elements are placed on a pallet. Data provided by a CAD/BIM system, such as Allplan Precast [12], is sent to the plotter. The device then precisely traces the contour lines of the concrete elements and construction elements onto the surface of the pallet formwork. The paint is applied using a spray device. Plotters can operate on a portal or bridge structure.

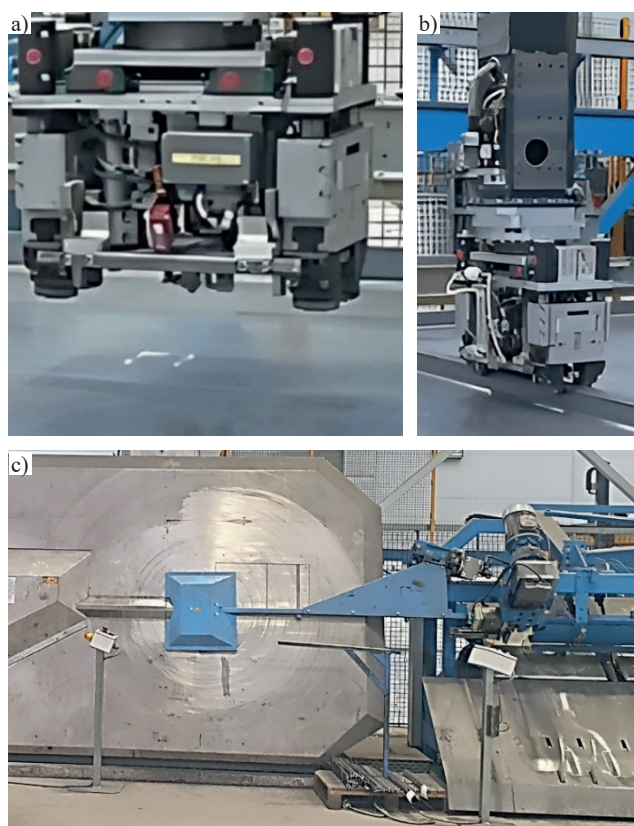


Photo. 2. A plotter applying contours on a steel pallet formwork (a); view of the formwork robot (b) and automatic stirrup bender (c).

Photo autor

Fot. 2. Ploter nanoszący kontury na stalowym szalunku paletowym (a); widok robota szalunkowego (b) oraz automatycznej giętarki do strzemion (c).

Fot. autor

Furthermore, they can be used as a workstation for manually positioning the formwork. For a high degree of automation, robots are used for formwork and stripping [23]. There are also many other manufacturers of equipment, machines and production lines available on the market [24÷27], and in the case of preparing reinforcement for prefabricated elements, companies such as [28÷30] are present.

produkcji mat zbrojeniowych i dźwigarów kratownicowych, automatyczne układanie zbrojenia i automatyczny dystrybutor betonu [21]. Podczas produkcji ścian podwójnych pierwsza warstwa jest obracana nad świeżo zabetonowaną drugą warstwę za pomocą obrotnicy. Proces wspierany jest oprogramowaniem, które wizualizuje i optymalizuje produkcję. Produkowane wyroby mogą być wyposażone w warstwę izolacyjną.

Automaty do produkcji strzemion wyposażone są w system szybkiej wymiany drutu (fotografia 2), automatyczną zmianę z obróbki podwójnej na pojedynczą oraz automatyczną regulację zestawu prostującego zapewniającą bardzo dużą wydajność [21]. Urządzenia są przystosowane do gięcia 3D podczas produkcji trójwymiarowych strzemion zbrojeniowych. Parametry techniczne stosowanych automatycznych giętarek do strzemion zestawiono w tabeli. Obecne stosowane urządzenia obejmują także prostowarki oraz podwójne giętarki jednocześnie. Przykładem takiego urządzenia jest Pluristar, który pracuje w zakresie średnic drutu 6–16 mm. Urządzenie to posiada połączony system prostowania składający się z prostownic rolkowej i rotorowej. Rozwiązanie takie pozwala na elastyczną produkcję strzemion zbrojeniowych, prętów prostych i prętów z dużymi gięciami za pomocą jednej maszyny. Wymiana drutu może odbywać całkowicie automatycznie lub ręcznie w zależności od potrzeb. Możliwe jest zastosowanie systemu gięcia 3D, powodującego uzyskiwanie nie tylko dwuwymiarowych, ale także trójwymiarowych strzemion zbrojeniowych [22].

Ploter nanosi kontury elementów betonowych na oczyszczonej powierzchni szalunku paletowego lub blatu formującego, która została wcześniej pokryta środkiem smarującym (fotografia 2).

W celu zwiększenia stopnia automatyzacji może być również stosowany system robotów [23]. Przed betonowaniem elementy szalunków umieszcza się na palecie. Dane dostarczane przez system CAD/BIM, np. Allplan Precast [12], są przesyłane do plotera. Następnie urządzenie precyzyjnie nanosi m.in. linie konturów elementów betonowych oraz elementów zabudowy na powierzchni szalunku paletowego. Farba jest nakładana za pomocą urządzenia natryskowego. Plotery mogą pracować oparte na konstrukcji portalowej lub pomostowej. Ponadto

Technical parameters of selected stirrup benders [22]

Parametry techniczne wybranych giętarek do strzemion [22]

Single wire diameter range/ Zakres średnicy pojedynczego drutu	5–12 mm, 5–14 mm, 5–16 mm, 10–20 mm
Double wire diameter range/ Zakres średnicy podwójnych drutów	6–10 mm, 6–12 mm, 10–16 mm
Maximum feed speed/ Maksymalna prędkość posuwu	140–160 m/min
Drive/Napęd	Servo-electric drive (no hydraulics)/ serwonapęd elektryczny (bez hydrauliki)
Automatic wire diameter change/ Automatyczna zmiana średnicy drutu	Included or optional/ w zestawie lub opcjonalnie
Data entry/Wpisywanie danych	Keyboard/network/USB/barcode/ klawiatura/sieć/USB/kody kreskowe

Conclusions

The Fourth Industrial Revolution, taking place in recent years, has not spared the production of precast construction elements. The computer solutions currently available on the market, presented in this article, include the integration of precast element design, production planning, automation and robotization, monitoring, control, and optimization of storage yards, and product deliveries to customers. The increasing digitalization of production processes provides many benefits, such as fast and accurate document flow, easy access to documents 24/7, the ability to monitor production data, and remote operation, e.g., from mobile devices.

The observed automation and robotization of production lines promotes shortening production cycles while maintaining very high assembly precision. Performing many simple, repetitive, and yet dangerous work operations (e.g., tensioning prestressing strands, assembling massive reinforcement cages in moulds) by machines and robots results in improved occupational health and safety conditions. Moreover, due to rising labour costs, it appears that the further development of digitization, automation, and robotics is not threatened. However, it should not be forgotten that costs, the need for specialized staff, and the interoperability of CAD/BIM systems may pose barriers. The perception of the prefabricated construction industry by the workers currently entering the market, who grew up in the era of access to the internet and mobile devices, is also significant.

The author would like to thank AllPlan GmbH, BIM Platform, MD Prefabrykacja, Pekabex, Progress Group and RIB Software for all materials and information that contributed to the creation of this article.

mogą one być wykorzystywane jako stanowisko pracy do ręcznego ustawiania szalunków. W przypadku wysokiego stopnia automatyzacji zastosowanie znajdują roboty do szalowania i rozszalowania [23]. Na rynku dostępnych jest także wiele innych producentów urządzeń, maszyn i linii produkcyjnych [24÷27], a w przypadku przygotowywania zbrojenia prefabrykatów, obecne są m.in. firmy [28÷30].

Wnioski

Dokonująca się w ostatnich latach Czwarta Rewolucja Przemysłowa nie ominęła produkcji prefabrykatów budowlanych. Oferowane obecnie na rynku rozwiązania komputerowe, przedstawione w artykule, obejmują integrację projektowania prefabrykatów, planowania produkcji, jej automatyzacji i robotyzacji, monitorowania, kontroli i optymalizacji placów składowych oraz dostaw wyrobów do klientów. Postępująca cyfryzacja w procesach produkcyjnych zapewnia wiele korzyści, takich jak szybki i dokładny obieg dokumentów, łatwość dostępu do dokumentów przez całą dobę, możliwość monitorowania danych produkcyjnych oraz obsługi zdalnej, np. z urządzeń mobilnych.

Obserwowana automatyzacja i robotyzacja linii produkcyjnych sprzyja skracaniu cykli produkcyjnych z zachowaniem bardzo dużej precyzji montażowej. Wykonywanie wielu prostych, powtarzalnych i zarazem niebezpiecznych operacji roboczych (m.in. naciąg splotów sprężających, montaż masywnych kosztów zbrojeniowych w formach) przez automaty i roboty powoduje poprawę warunków bezpieczeństwa i higieny pracy. Ponadto w związku ze zwiększającymi się kosztami robocizny wydaje się, że dalszy rozwój cyfryzacji, automatyzacji i robotyzacji nie jest zagrożony. Nie należy przy tym zapominać, że barierą mogą być jednak koszty, potrzeba specjalistycznej kadry, interoperacyjność systemów CAD/BIM. Nie bez znaczenia jest również postrzeganie funkcjonowania przemysłu prefabrykatów dla budownictwa przez wchodzących obecnie na rynek pracowników, którzy wychowali się w erze dostępu do internetu oraz urządzeń mobilnych.

Dziękuję firmom AllPlan GmbH, BIM Platform, MD Prefabrykacja, Pekabex, Progress Group i RIB Software za materiały i informacje, które przyczyniły się do powstania artykułu.

Received: 16.06.2025
Revised: 11.08.2025
Published: 23.10.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 16.06.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 11.08.2025 r.
Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] Wu K, Xu J, Zheng M. "Industry 4.0: review and proposal for implementing a smart factory," *The international journal of advanced manufacturing technology/International journal, advanced manufacturing technology*, May 2024, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13839-7>.
- [2] Chen B, Wan J, Shu L, Li P, Mukherjee M, Yin B. „Smart factory of industry 4.0: key technologies, application case, and challenges,” *IEEE Access* 6: 6505–6519, 2017.
- [3] <https://nexelem.com/blog/przemysl-4-0/>, accessed 23.04.2025.
- [4] Reichenbach S, Kromoser B, „State of practice of automation in precast concrete production,” *Journal of Building Engineering*, vol. 43, pp. 102527, 2021.
- [5] Sanjayan JG, Nazari A, Nematollahi B, „3D concrete printing technology: construction and building applications,” *Butterworth-Heinemann*, 2019.
- [6] Dean B, Dullac J, Petrichenko K, Graham P., „Towards zero-emission efficient and resilient buildings,” *Global Status Report 2016*, 2016.
- [7] Kosse S, Forman P, Stindt J, Hoppe J, König M, Mark P. „Industry 4.0 Enabled Modular Precast Concrete Components: A Case Study,” *Rilem bookseries*, pp. 229–240, Jan. 2023, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_21.
- [8] Adamczewski G, Woyciechowski PP. „Prefabrykacja w czasach pandemii – ratunek dla budownictwa?”, *Materiały Budowlane*, art. nr 9, 2020, DOI: 10.15199/33.2020.09.07.

- [9] Derkowski W. „Prefabrykacja betonowa – zrównoważone rozwiązanie dla budownictwa”. *Materiały Budowlane*, art. no. 11 591, 2021, DOI: 10.15199/33.2021.11.02.
- [10] Adamczewski G, Woyciechowski PP. „Kierunki rozwoju prefabrykacji”, *Materiały Budowlane*, art. nr 10, 2019.
- [11] Nicał AK. „Wybrane aspekty produkcji prefabrykatów w kontekście technologii BIM”. *Nowoczesne Hale*, pp. 62–68, 2022.
- [12] <http://precast.bimplatform.pl/strona-glowna/tim/>, accessed 29.04.2025.
- [13] Nicał A, Protchenko K, Kaczorek K, Szmigiera E. „BIM w prefabrykacji”. *PWN, Warszawa*, 2021.
- [14] Pubanz K, Protchenko K, Kaczorek K, Nicał A. „Przygotowanie dokumentacji wykonawczej dla elementów konstrukcji prefabrykowanych przy wykorzystaniu narzędzi informatycznych działających zgodnie z technologią BIM”. *Nowoczesne Hale*, pp. 2–7, 2022.
- [15] <https://www.sap.com/products/erp/what-is-erp.html>, accessed 29.04.2025.
- [16] <https://www.sap.com/products/scm/execution-mes/what-is-mes.html>, accessed 29.04.2025.
- [17] Materiały informacyjne od RIB Software/Informational materials from RIB Software.
- [18] <https://www.rib-software.com/en/rib-one-prefab>, accessed 29.04.2025.
- [19] <https://www.progress-psd.com/en/complete-solution/mes>, accessed 29.04.2025.
- [20] https://leimro.com/elementary_category/plant-control/, accessed 29.04.2025.
- [21] <https://www.ebawe.de/pl/produkty/system-obiegu-palet-dla-scian-podwojnych>, accessed 29.04.2025.
- [22] <https://www.progress-m.com/pl/produkty/automaty-do-produkcji-strzemion>, accessed 29.04.2025.
- [23] <https://www.ebawe.de/pl/produkty/pojedyncze-maszyny-w-obiegu-plo-ter>, accessed 29.04.2025.
- [24] https://www.sommer-precast.de/en_GB/, accessed 30.04.2025.
- [25] <https://www.avermann.de/pl/>, accessed 30.04.2025.
- [26] <https://www.vollert.de/en/home>, accessed 30.04.2025.
- [27] <https://www.construx.eu/pl/>, accessed 30.04.2025.
- [28] <https://www.mbk-kisslegg.de/en/>, accessed 30.04.2025.
- [29] <https://evg.com/en/>, accessed 30.04.2025.
- [30] <https://www.schnellgroup.com/awm/en/>, accessed 30.04.2025.