

MONIKA NOVIELLO

Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, Polska / University of the National Education Commission, Krakow, Poland

Zastosowanie technologii Digital Twin w edukacji zawodowej jako odpowiedź na wyzwania Przemysłu 4.0

The use of Digital Twin technology in vocational education as a response to the challenges of Industry 4.0

Streszczenie: Artykuł podejmuje analizę przemian zachodzących w obszarze Przemysłu 4.0 oraz ich implikacji dla kształcenia w szkołach branżowych, ze szczególnym uwzględnieniem technologii cyfrowego bliźniaka (Digital Twin, DT). W opracowaniu wskazano na rosnące znaczenie nowych kompetencji zawodowych oraz na wyzwania stojące przed uczniami w kontekście dynamicznego rozwoju technologii cyfrowych. Celem pracy jest przedstawienie możliwości integracji technologii cyfrowego bliźniaka z procesem dydaktycznym w szkołach branżowych jako istotnego elementu wspierającego rozwój kompetencji przyszłości. W artykule omówiono również rozwój technologii DT i przykładowe obszary jej zastosowań w Przemysle 4.0. Ponadto przedstawiono zmieniającą się rolę i wymagany zakres kompetencji, jakie powinni posiadać nauczyciele szkół branżowych, a także zaproponowano sposoby włączenia wybranych rozwiązań DT do programów nauczania. Badania oparto na analizie literatury przedmiotu, studiach przypadków wdrożeń technologii DT w szkołach w Niemczech oraz analizie rezultatów międzynarodowego projektu DiTwin. Wyniki potwierdzają zasadność i potrzebę wdrażania technologii DT w edukacji zawodowej jako narzędzia wspierającego nauczanie praktyczne oraz rozwój kompetencji technicznych i miękkich uczniów.

Abstract: The article examines the transformations taking place within the framework of Industry 4.0 and their implications for vocational education, with particular emphasis on Digital Twin (DT) technology. It highlights the growing importance of emerging occupational competences and the challenges faced by learners in the context of the rapid advancement of digital technologies. The aim of the study is to present the potential for integrating DT technology into the teaching and learning process in vocational schools as a key element supporting the development of future-oriented competences. The paper discusses the evolution of DT technology and selected areas of its application within Industry 4.0. It also explores the changing role of vocational school teachers and the expanded range of competences required in response to technological transformation. Furthermore, the study proposes practical approaches to incorporating selected DT solutions into vocational curricula. The research is based on a comprehensive review of the relevant literature, case studies of DT technology implementation in vocational schools in Germany, and an analysis of the outcomes of the international DiTwin project. The findings confirm the validity and necessity of implementing DT technology in vocational education as an effective tool for enhancing practical training and fostering the development of both technical and transversal (soft) skills among learners.

Słowa kluczowe: cyfrowy bliźniak, Projekt Erasmus, Przemysł 4.0, szkoły branżowe

Keywords: Digital Twin, Erasmus Project, Industry 4.0, Vocational Schools

Otrzymano: 30 grudnia 2025

Received: 30 December 2025

Zaakceptowano: 18 lutego 2026

Accepted: 18 February 2026

Sugerowana cytacja / Suggested citation:

Noviello, M. (2026). Zastosowanie technologii Digital Twin w edukacji zawodowej jako odpowiedź na wyzwania Przemysłu 4.0. *Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego*, 40(1), 73–90. doi: <https://doi.org/10.24917/20801653.401.5>

WSTĘP

Współczesne przemiany technologiczne, określane szeroko mianem Przemysłu 4.0, wprowadzają nowe wymagania wobec procesów produkcyjnych, systemów zarządzania oraz kompetencji zawodowych. Jednym z kluczowych narzędzi wspierających te zmiany jest technologia cyfrowego bliźniaka (Digital Twin, DT), która umożliwia tworzenie wirtualnych odpowiedników rzeczywistych systemów, maszyn czy procesów. Rozwój DT początkowo koncentrował się na sektorze przemysłowym, gdzie stanowił instrument optymalizacji produkcji, monitorowania operacji oraz przewidywania awarii. Stopniowo jednak technologia ta zaczęła znajdować zastosowanie w obszarze edukacji, oferując nowe możliwości kształcenia praktycznego, problemowego i kontekstualnego.

W edukacji zawodowej cyfrowe bliźniaki umożliwiają uczniom bezpieczne eksperymentowanie w środowisku symulacyjnym, testowanie procedur, diagnozowanie problemów oraz obserwację skutków podejmowanych decyzji, co sprzyja zastosowaniu teorii w praktyce. W kontekście systemów kształcenia zawodowego (VET) integracja DT pozwala na dostosowanie ścieżek edukacyjnych do indywidualnych potrzeb uczniów, rozwój kompetencji cyfrowych i operacyjnych oraz przygotowanie do pracy w złożonych, w pełni zautomatyzowanych środowiskach przemysłowych.

Artykuł podejmuje problematykę konieczności, jaka stoi przed szkołami branżowymi w związku z rozwojem Przemysłu 4.0 oraz towarzyszącej mu technologii DT. W pracy wskazano zarówno na potencjał wprowadzenia tej technologii do nauczania, jak i na wyzwania związane z dostępem do narzędzi, przygotowaniem kadry oraz dostosowaniem programów nauczania do wymogów Przemysłu 4.0. Ponadto omówione zostały strategie integracji DT w systemach VET, współpraca szkół z przemysłem, pedagogiczne metody nauczania z wykorzystaniem cyfrowych bliźniaków oraz kompetencje przyszłości, które uczniowie i nauczyciele VET powinni rozwijać, aby sprostać wymaganiom cyfrowej transformacji rynku pracy.

CEL I METODY BADAŃ

Celem niniejszego artykułu jest wskazanie na przemiany zachodzące w obszarze Przemysłu 4.0 oraz ocena ich implikacji dla systemu kształcenia zawodowego, w szczególności w szkołach branżowych. W związku z powyższym artykuł jest również próbą identyfikacji mechanizmów dydaktycznych opartych na DT, które to w toku badań pilotażowych okazały się najbardziej adekwatne dla kształcenia zawodowego. Poza tym zidentyfikowano

warunki instytucjonalne dla wdrożenia DT w VET oraz bariery systemowe w implementacji DT w sektorze edukacji.

Mając na uwadze wzrost znaczenia technologii DT i prowadzone w tym zakresie projekty pilotażowe (w Polsce m.in. projekt DiTwin), pojawia się pytanie o możliwości implementacji modeli nauczania wykorzystujących technologię DT w realiach polskich szkół branżowych. W obszarze tych rozważań należy uwzględnić bardzo szeroko rozumiane wsparcie, jakiego potrzebują szkoły branżowe w Polsce do wdrożenia tego rodzaju rozwiązań. Jest to szczególnie ważne, gdyż dynamiczny rozwój nowoczesnych technologii, takich jak automatyzacja, robotyzacja, Internet Rzeczy (Internet of Things, IoT) czy sztuczna inteligencja, prowadzi do istotnych zmian w sposobie funkcjonowania przedsiębiorstw przemysłowych, a tym samym – generuje nowe wymagania wobec kompetencji przyszłych pracowników. Pracownikami przyszłego sektora Przemysłu 4.0 są w znacznej mierze obecni uczniowie szkół branżowych, którzy już teraz powinni być zaznajamiani z nowoczesnymi technologiami. Jedną z kluczowych jest technologia DT, która umożliwia tworzenie wirtualnych odwzorowań obiektów, procesów i systemów fizycznych oraz ich analizę i optymalizację w czasie rzeczywistym.

Prezentowane wyniki mają na celu wskazanie możliwości włączenia technologii DT do procesu dydaktycznego w szkołach branżowych jako istotnego elementu sprzyjającego rozwijaniu kompetencji przyszłości. Artykuł koncentruje się na identyfikacji obszarów, w których DT może wspierać nauczanie praktyczne, problemowe i kontekstowe, a także na określeniu potencjału tej technologii w rozwijaniu zarówno kompetencji technicznych (m.in. programowania, obsługi systemów IoT, automatyki i robotyki), jak i kompetencji miękkich (takich jak krytyczne myślenie, współpraca zespołowa czy kreatywność). Istotnym elementem celu badawczego jest również wskazanie wyzwań stojących przed nauczycielami i uczniami szkół branżowych w kontekście przygotowania młodych osób do funkcjonowania na rynku pracy Przemysłu 4.0.

Realizacja założonego celu została oparta na wieloetapowej metodologii badawczej o charakterze jakościowym. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę literatury przedmiotu, obejmującą publikacje naukowe, raporty branżowe dotyczące Przemysłu 4.0 oraz rozwoju i prób wdrożenia technologii cyfrowego bliźniaka w przemyśle. Analiza ta pozwoliła na ustalenie istoty technologii DT, kierunków jej rozwoju oraz najczęściej wskazywanych obszarów zastosowań w nowoczesnym przemyśle. Na tej podstawie stwierdzono konieczność wprowadzenia zmian w zakresie przygotowania nauczycieli, uczniów, programów nauczania i infrastruktury, które pozwolą na implementację DT do edukacji zawodowej.

W kolejnej części przedstawiono studia przypadków wdrożeń technologii cyfrowego bliźniaka w szkołach zawodowych i technicznych w Niemczech. Analiza ta miała na celu identyfikację wyzwań oraz dobrych praktyk w zakresie wykorzystania DT w procesie dydaktycznym, określenie form i zakresu integracji tej technologii z programami nauczania oraz ocenę jej wpływu na efektywność kształcenia praktycznego i rozwój kompetencji uczniów. Doświadczenia niemieckie mogą być zatem traktowane jako wskazania działań do wdrożenia DT w szkołach branżowych w Polsce.

Przeprowadzone badania obejmowały także analizę wyników międzynarodowego projektu DiTwin, realizowanego przez konsorcjum partnerów z Polski, Hiszpanii, Irlandii, Włoch oraz Grecji. Projekt ten miał na celu przygotowanie rozwiązań dydaktycznych, narzędzi i technik nauczania opartych na technologii cyfrowego bliźniaka, możliwych do implementacji w szkołach branżowych. Analizie poddano wypracowane w projekcie

materiały, scenariusze zajęć oraz modele integracji DT z edukacją zawodową, traktując je jako adekwatne przygotowanie młodzieży do aktualnych i przyszłych potrzeb Przemysłu 4.0.

TECHNOLOGIA CYFROWEGO BLIŹNIAKA – POCZĄTKI ROZWOJU I OBSZARY ZASTOSOWANIA

Początki koncepcji, która dziś znana jest jako technologia cyfrowego bliźniaka, sięgają lat 60. XX w. W tym okresie NASA tworzyła fizyczne repliki statków kosmicznych, aby analizować ich zachowanie w różnych warunkach jeszcze przed wysłaniem rzeczywistych obiektów na orbitę. Modele te umożliwiały testowanie potencjalnych scenariuszy i ograniczanie ryzyka związanego z misjami kosmicznymi. Ich znaczenie szczególnie uwidoczniło się w 1970 r. podczas misji Apollo 13, kiedy eksplozja na pokładzie statku zagroziła życiu załogi. Inżynierowie NASA, korzystając z replik znajdujących się na Ziemi, analizowali możliwe warianty działań ratunkowych i opracowali skuteczną strategię bezpiecznego powrotu astronautów (Allen, 2021). Choć w tym okresie wykorzystywano fizyczne modele, a nie wirtualne symulacje, działania te stworzyły podstawy dla późniejszego rozwoju idei cyfrowych bliźniaków.

Współczesne rozumienie DT zaczęło kształtować się na początku XXI w. W 2002 r. Michael Grieves zaproponował koncepcję zarządzania cyklem życia produktu (Product Lifecycle Management, PLM), która zakładała ścisłe powiązanie fizycznego produktu z jego wirtualnym odpowiednikiem poprzez ciągłą wymianę danych. Model ten, określany mianem *mirror spaces*, stanowił przełom w myśleniu o integracji świata rzeczywistego i cyfrowego oraz umożliwiał monitorowanie i optymalizację produktu na każdym etapie jego istnienia (Grieves, 2002). Jednak termin DT został oficjalnie wprowadzony w 2010 r. przez Johna Vickersa z NASA, który użył go w technicznej mapie drogowej agencji, rozwijając wcześniejsze założenia koncepcji Grievesa. Od tego momentu technologia cyfrowego bliźniaka zaczęła dynamicznie ewoluować, przechodząc od narzędzia stosowanego głównie w sektorze kosmicznym i inżynieryjnym do uniwersalnego rozwiązania wykorzystywanego w przemyśle, medycynie, infrastrukturze oraz zarządzaniu złożonymi systemami społeczno-technicznymi.

Technologia ta odnosi się do tworzenia dynamicznych, wirtualnych reprezentacji obiektów, systemów lub procesów fizycznych, które są ściśle powiązane ze swoimi rzeczywistymi odpowiednikami za pomocą danych. Jak podaje de Kerckhove (2021), jedną z najkrótszych i jednocześnie najbardziej precyzyjnych definicji cyfrowego bliźniaka jest ta sformułowana przez Thomasa van Zutphena (2018), który określa go jako cyfrową reprezentację danych w stosunku 1:1 fizycznego produktu lub procesu w całym jego cyklu życia (de Kerckhove, 2018). Definicja ta trafnie podkreśla dwie kluczowe cechy technologii DT: dążenie do możliwie wiernego odwzorowania rzeczywistości oraz uwzględnienie pełnej historii funkcjonowania obiektu.

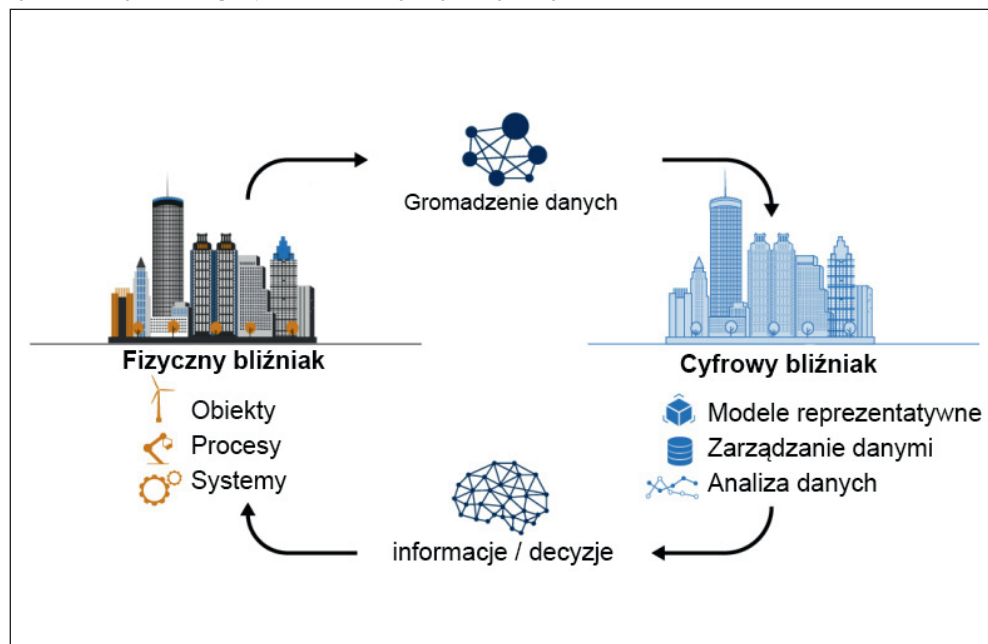
Rozszerzone ujęcie cyfrowego bliźniaka, zaproponowane przez zespół IEEE, wskazuje na inżynieryjne korzenie tej koncepcji. Zgodnie z nim cyfrowy bliźniak umożliwia integrację Internetu Rzeczy (IoT) z analityką danych poprzez stworzenie połączonej pary – obiektu fizycznego i jego wirtualnego odpowiednika. Takie środowisko pozwala na szybkie analizy oraz podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym na podstawie precyzyjnych danych analitycznych (Fuller i in., 2019). Kluczową rolę odgrywa tu stały

przepływ informacji z czujników zainstalowanych na obiekcie fizycznym do systemów przetwarzania, które aktualizują model cyfrowy.

Ze względu na coraz szersze zastosowanie technologii cyfrowego bliźniaka również sama definicja tego pojęcia ewoluowała, a badacze zdefiniowali elementy składowe DT. Wynikiem podjętych prac było ustalenie, że technologia DT składa się z trzech podstawowych elementów: (a) fizycznych obiektów funkcjonujących w przestrzeni rzeczywistej, (b) wirtualnych obiektów istniejących w przestrzeni cyfrowej, (c) połączeń danych i informacji, które integrują oba te światy (Grieves, 2015). W ciągu kilkunastu lat od powstania tej idei obserwuje się rosnący postęp w zakresie ilości, jakości i szczegółowości danych opisujących zarówno obiekty fizyczne, jak i ich wirtualne odpowiedniki.

Szczególnie istotny stał się rozwój badań z obszaru możliwości wdrożenia tej technologii do życia codziennego (Bauernhansl i in., 2018; Grzesik, 2023; Jones i in., 2020; Kumar, 2020; Kusiak, 2018; Kritzinger i in., 2018; Qi i in., 2021; Lu i in., 2019; O'Sullivan, 2020; Raza i in., 2020; Singh i in., 2021; Tomczyk, van der Valk, 2022; Wang i in., 2019; Yang i in., 2021). Jak wskazują prowadzone w różnych ośrodkach badawczych analizy, dynamiczny rozwój technologii cyfrowego bliźniaka sprawił, że jego zastosowanie znacznie wykroczyło poza klasyczne zadania inżynieryjne. Obecnie tworzone są cyfrowe bliźniaki przedsiębiorstw, organizacji, miast, a nawet całych regionów (rycina 1). Koncepcja ta znajduje również zastosowanie w działaniach podejmowanych na poziomie globalnym, takich jak inicjatywa „Digital Twin Earth”, której celem jest monitorowanie aktywności człowieka i zmian klimatycznych w skali całej planety (Hazeleger i in., 2024; Le Moigne i in., 2024).

Rycina 1. Przykład integracji bliźniaków fizycznych i cyfrowych



Źródło: opracowanie własne na podstawie GAO (2023)

Tak szerokie wykorzystanie technologii DT wpisuje się w jej rosnącą rolę jako narzędzia wspierającego zarządzanie złożonymi systemami społeczno-technicznymi. Znaczący wkład w rozwój technologii cyfrowego bliźniaka ma firma IBM. Zgodnie z jej definicją cyfrowy bliźniak jest „żyjącym” modelem obliczeniowym, który jest stale aktualizowany na podstawie danych pochodzących z obiektu fizycznego. Dzięki temu możliwe jest zdalne monitorowanie, utrzymanie oraz prognozowanie zachowania systemu, a także testowanie alternatywnych scenariuszy bez ingerencji w rzeczywistość. Dane generowane przez cyfrowe bliźniaki są coraz częściej analizowane z wykorzystaniem sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego, co dodatkowo zwiększa ich wartość predykcyjną i decyzyjną (IBM, 2025).

Technologia cyfrowego bliźniaka odgrywa również istotną rolę w działaniach realizowanych w interesie publicznym. Jak wskazują analizy GAO (2023), cyfrowe bliźniaki są coraz częściej wykorzystywane do modelowania i łagodzenia skutków katastrof naturalnych, takich jak powodzie. Tworzenie wirtualnych scenariuszy zdarzeń ekstremalnych pozwala decydentom lepiej zrozumieć ryzyko, ocenić skuteczność interwencji oraz zwiększyć gotowość i odporność społeczności na zagrożenia.

CYFROWY BLIŹNIAK JAKO SZANSA NA WSPARCIE ROZWOJU PRZEMYSŁU 4.0

Przemysł 4.0 odnosi się do współczesnego etapu transformacji przemysłowej, którego istotą jest pogłębiona integracja świata fizycznego i cyfrowego. Opiera się on na wykorzystaniu zaawansowanych technologii informacyjno-komunikacyjnych, takich jak Internet Rzeczy, sztuczna inteligencja, uczenie maszynowe, analiza dużych zbiorów danych (Big Data, BD), rzeczywistość rozszerzona (Extended Reality, XR) oraz cyfrowe bliźniaki (Digital Twin, DT). Celem tej koncepcji jest zwiększenie efektywności, elastyczności i odporności systemów produkcyjnych oraz infrastrukturalnych poprzez automatyzację, inteligentne sterowanie i podejmowanie decyzji na podstawie danych. W literaturze międzynarodowej oraz praktyce przemysłowej Przemysł 4.0 bywa często utożsamiany z koncepcją *Industrial Internet of Things* (IIoT; Voigt i in., 2018), przy czym pojęcie to nie ma jednej, powszechnie akceptowanej definicji. Coraz częściej podkreśla się również, że Przemysł 4.0 nie stanowi rewolucji w sensie porównywalnym z mechanizacją, elektryfikacją czy automatyzacją, lecz ma charakter ewolucyjny, polegający na dalszym rozwoju i integracji rozwiązań trzeciej rewolucji przemysłowej (Roll, Ifenthaler, 2020). Okazuje się, że szczególnie istotną rolę w realizacji holistycznej wizji Przemysłu 4.0 odgrywa technologia cyfrowego bliźniaka. Jej znaczenie nie wynika z zastosowania zupełnie nowych narzędzi technologicznych, lecz z całościowego podejścia do w pełni usieciowionego systemu tworzenia wartości, w którym ludzie, maszyny i procesy są ze sobą powiązani za pośrednictwem Internetu. Cyfrowe bliźniaki umożliwiają pionową integrację danych w przedsiębiorstwie – od poziomu strategicznego zarządzania po operacje realizowane na hali produkcyjnej – oraz integrację poziomą wzdłuż całego łańcucha, a coraz częściej także sieci wartości (Gebhardt, Grimm, Neugebauer i in., 2015; Hecklau i in., 2016). Stanowią one dynamiczne, wirtualne modele obiektów, systemów lub procesów fizycznych, zasilane danymi w czasie rzeczywistym, co pozwala na monitorowanie stanu systemów, prognozowanie ich zachowania oraz symulowanie alternatywnych scenariuszy działania.

Jak wskazano powyżej, podstawą funkcjonowania cyfrowych bliźniaków są cyberfizyczne systemy (CPS), integrujące komponenty fizyczne i cyfrowe poprzez czujniki, akulatory oraz sieci komunikacyjne. CPS rejestrują dane w czasie rzeczywistym,

przetwarzają je cyfrowo i oddziałują zwrotnie na procesy fizyczne (Spöttl i in., 2016), a dzięki sieciowej architekturze, interfejsom człowiek – maszyna oraz zdolnościom autonomicznego reagowania umożliwiają inteligentne sterowanie złożonymi systemami produkcyjnymi (Vogel-Heuser, Bayrak, Frank, 2012; Acatech, 2016). W tym kontekście cyfrowy bliźniak pełni funkcję warstwy analityczno-decyzyjnej, wspierającej symulację, optymalizację i predykcję zarządzania procesami w różnego rodzaju przedsiębiorstwach. Badania wskazują, że jego zastosowanie w sieciach wartości zwiększa zdolność przedsiębiorstw do reagowania na dynamiczne i nieprzewidywalne zmiany otoczenia (Hecklau i in., 2016), prowadząc do redukcji redundancji procesów, ograniczenia kosztów magazynowania i transportu oraz bardziej efektywnego wykorzystania zasobów. Jednocześnie umożliwia realizację masowej produkcji wyrobów zindywidualizowanych oraz testowanie wariantów produkcyjnych w środowisku wirtualnym, co sprzyja innowacjom i rozwojowi nowych modeli biznesowych (Gebhardt i in., 2015).

Znaczenie Przemysłu 4.0 i cyfrowych bliźniaków wykracza jednak poza sektor przemysłowy, a jego potencjał stale rośnie. Pomimo tego wdrażanie rozwiązań Przemysłu 4.0 wiąże się z istotnymi wyzwaniami. Transformacja cyfrowa jest uznawana przez przedsiębiorstwa za jedno z kluczowych zadań rozwojowych, jednak jedynie niewielka ich część jest w stanie efektywnie funkcjonować w zintegrowanych sieciach wartości (Schäffer, Weber, 2018). Do najczęściej identyfikowanych barier należą kwestie bezpieczeństwa informatycznego, obejmujące zarówno infrastrukturę produkcyjną, jak i złożone systemy IT, co stanowi szczególne wyzwanie dla małych i średnich przedsiębiorstw (Thames, Schaefer, 2017; Sommer, 2015). Dodatkowo zdolność do opanowania złożoności technologii, w tym cyfrowych bliźniaków, jest silnie uzależniona od kapitału ludzkiego, co sprzyja dużym organizacjom, a dla MŚP stanowi istotną barierę inwestycyjną (Sommer, 2015). W tym kontekście kluczowe znaczenie mają kompetencje pracowników. Przemysł 4.0 implikuje zmiany w kulturze uczenia się oraz konieczność rozwoju szerokich kompetencji cyfrowych (Ifenthaler, 2018; Wilbers, 2017). Odpowiedzią na to jest rozwój koncepcji *Multidisciplinary Digital Competence* (MDC), która obejmuje nie tylko umiejętności techniczne, lecz także kompetencje informacyjne, bezpieczeństwo cyfrowe, współpracę online, postawy wobec technologii oraz zdolność rozwiązywania problemów i refleksji (Fraillon i in., 2014; Ferrari, 2013; Carretero, Vuorikari, Punie, 2017; Eseryel i in., 2011). Roll i Ifenthaler (2020) definiują MDC jako gotowość i zdolność jednostki do odpowiedzialnego działania w cyfrowym kontekście zawodowym, społecznym i prywatnym, co stanowi warunek efektywnego i odpowiedzialnego wykorzystania technologii cyfrowego bliźniaka w Przemysle 4.0.

ROLA NAUCZYCIELA I WYZWANIA EDUKACYJNE W DOBIE ROZWOJU PRZEMYSŁU 4.0

Rozwój Przemysłu 4.0, oparty na zaawansowanych technologiach cyfrowych, automatyzacji, sztucznej inteligencji oraz integracji systemów cyberfizycznych, wywiera istotny wpływ na funkcjonowanie współczesnej szkoły oraz zmianę roli nauczyciela. Jak wskazują badania D. Siemienieckiej i B. Siemienieckiego (2019), edukacja, aby odpowiadać na potrzeby społeczeństwa i gospodarki opartej na wiedzy, musi podlegać głębokim przeobrażeniom obejmującym zarówno cele, treści, metody kształcenia, jak i kompetencje kadry pedagogicznej. Oznacza to, że w dobie edukacji na rzecz rozwoju Przemysłu 4.0, nauczyciel przestaje być wyłącznie transmisyjnym źródłem wiedzy, a coraz częściej

pełni funkcję koordynatora procesu uczenia się oraz mentora wspierającego uczniów w krytycznym przetwarzaniu informacji dostępnych w przestrzeni cyfrowej. Ponadto powszechny dostęp do informacji powoduje, że kluczowym zadaniem nauczyciela staje się organizowanie środowiska edukacyjnego sprzyjającego przekształcaniu informacji w wiedzę oraz wiedzy w praktyczne wskazówki i kompetencje użyteczne społecznie (Rak, 2020). Uczeń w takich warunkach przyjmuje rolę aktywnego uczestnika procesu dydaktycznego, współtwórcy wiedzy, realizującego interdyscyplinarne projekty rozwijające kompetencje odpowiadające potrzebom społeczeństwa, dla którego Przemysł 4.0 ma coraz większe znaczenie.

Badania w zakresie przemian w edukacji będących odpowiedzią na potrzeby Przemysłu 4.0 potwierdzają, że nowe technologie, takie jak druk 3D, robotyka edukacyjna, programowanie czy narzędzia oparte na sztucznej inteligencji, stwarzają szerokie możliwości dydaktyczne. Okazuje się jednak, że ich efektywne wykorzystanie wymaga od nauczyciela zaawansowanych kompetencji cyfrowych i metodycznych. Przykład zastosowania drukarek 3D pokazuje, że nauczyciel powinien dysponować nie tylko wiedzą techniczną dotyczącą obsługi urządzeń, lecz także umiejętnością integrowania tych narzędzi z celami kształcenia, rozwijania myślenia przestrzennego, projektowego i problemowego uczniów. Brak takich kompetencji prowadzi do powierzchownego lub pozoornego wykorzystania technologii w edukacji (Siemieniecka, 2021).

Transformacja edukacji w kierunku modelu odpowiadającego Przemysłowi 4.0 wymaga również zmian systemowych, obejmujących politykę edukacyjną, finansowanie infrastruktury cyfrowej, standaryzację kompetencji metodyczno-cyfrowych nauczycieli oraz stworzenie efektywnego systemu kształcenia ustawicznego. Szczególne znaczenie ma zapewnienie wysokiej jakości szkoleń dla nauczycieli i dyrektorów szkół, a także wsparcia doradczego umożliwiającego dostosowanie rozwiązań technologicznych do realnych potrzeb placówek edukacyjnych (Glomb, 2020). Z tego względu istotnym obszarem wyzwań pozostaje kształcenie zawodowe. Szkoły branżowe powinny w coraz większym stopniu odpowiadać na potrzeby rynku pracy rozwijającego się w dobie Przemysłu 4.0. Jest to możliwe dzięki rozwijaniu kierunków kształcenia wymagających kompetencji cyfrowych oraz dzięki współpracy z przedsiębiorstwami w zakresie praktycznej nauki zawodu. Jak zaznacza K. Glomb (2020), wymaga to pozyskania nauczycieli o odpowiednich kwalifikacjach (lub przeszkolenia własnej kadry) oraz wprowadzenia obowiązkowych, cyklicznych szkoleń branżowych realizowanych w środowisku przemysłowym.

Mając na uwadze powyższe, coraz ważniejsza okazuje się konieczność integracji sektora edukacji, a szczególnie szkół branżowych, z wymaganiami, jakie stawia postępujący rozwój Przemysłu 4.0. Rozwijająca się w jego obszarze technologia cyfrowego bliźniaka jest jednym z tych rozwiązań, które mogą być szansą dla szkół branżowych w zakresie systemów cyberfizycznych i pracy opartej na danych. Szkoły te mierzą się dzisiaj z tego rodzaju wyzwaniami. Ponadto nadal problemem pozostaje przygotowanie kadry dydaktycznej oraz uczniów do funkcjonowania w zintegrowanych, sieciowych środowiskach produkcyjnych. Wymaga to bowiem rozwijania szerokich, interdyscyplinarnych kompetencji cyfrowych, wykraczających poza tradycyjne umiejętności techniczne. Jednocześnie ograniczenia organizacyjne, finansowe i kompetencyjne, zwłaszcza w mniejszych placówkach, mogą utrudniać pełne wykorzystanie potencjału nowych technologii (w tym cyfrowego bliźniaka) w edukacji zawodowej.

SZKOŁY BRANŻOWE A TRANSFORMACJA CYFROWA – WYZWANIA I ROZWIĄZANIA DLA EDUKACJI W KONTEKŚCIE TECHNOLOGII DT

Dynamiczny rozwój technologii Przemysłu 4.0, w tym cyfrowych bliźniaków, stawia przed szkołami branżowymi istotne wyzwania systemowe, organizacyjne i dydaktyczne. Jak podkreśla Heyse (2018), epoka cyfrowa wymusza zasadnicze zmiany zarówno w polityce oświatowej, jak i w praktykach nauczania. W szczególny sposób dotyczy to szkół branżowych i technicznych, których podstawowym zadaniem jest przygotowanie uczniów do funkcjonowania w realnym środowisku pracy, coraz silniej zdominowanym przez technologie cyfrowe i cyberfizyczne systemy produkcyjne. Koniecznym okazało się zatem wdrażanie na poziomie poszczególnych krajów takich rozwiązań, które przybliżą uczniów do dynamicznie zmieniającej się rzeczywistości Przemysłu 4.0, zaznajamiając ich tym samym ze stosowanymi technologiami. I tak np. począwszy od 2017 r., niemieckie szkoły branżowe w Badenii-Wirtembergii zostały objęte programem Learning Factories 4.0 (LF 4.0) wspieranym przez Ministerstwo Gospodarki oraz Ministerstwo Edukacji (Scheid, 2018). Przedsięwzięcie to miało na celu stworzenie warunków dydaktycznych umożliwiających uczniom nabywanie kompetencji odpowiadających wymaganiom Przemysłu 4.0, w tym umiejętności pracy z rozwiązaniami zbliżonymi do cyfrowych bliźniaków. Od tego czasu Learning Factories 4.0 są sukcesywnie instalowane w szkołach zawodowych, a w kolejnych latach liczba placówek wyposażonych w tego typu nowoczesną infrastrukturę rokrocznie wzrastała. Niemieckie doświadczenia potwierdziły, że jednym z kluczowych wyzwań dla szkół branżowych jest jednak wysoki poziom złożoności technologicznej Learning Factories 4.0, który bezpośrednio przekłada się na trudności dydaktyczne. LF 4.0 nie mają jednolitej struktury technicznej, ponieważ ich konfiguracja jest dostosowywana do profilu danej szkoły oraz do oferowanych kierunków kształcenia. W rezultacie niektóre placówki koncentrują się na zagadnieniach automatyki i sterowania, inne na integracji z systemami informatycznymi, a jeszcze inne na procesach wytwórczych (Scheid, 2018). Taka heterogeniczność utrudnia standaryzację programów nauczania oraz porównywanie efektów kształcenia, co stanowi istotną barierę w systemowym wdrażaniu kompetencji związanych z cyfrowymi bliźniakami. Kolejnym wyzwaniem jest struktura samych Learning Factories 4.0, które zazwyczaj obejmują dwa komplementarne, lecz różniące się poziomem złożoności komponenty. Pierwszym z nich jest modułowe laboratorium podstawowe, umożliwiające nauczanie fundamentów technicznych w zakresie automatyki, elektrotechniki, mechatroniki lub robotyki. Laboratoria te pozwalają uczniom na bezpośrednią interakcję z technologią, jednak ich główną funkcją jest przygotowanie do pracy z bardziej zaawansowanymi systemami (Scheid, 2018). Drugim, bardziej złożonym elementem jest całościowa inteligentna fabryka, oparta na cyberfizycznym systemie produkcyjnym (CPS), integrującym fizyczne procesy wytwórcze z oprogramowaniem sterującym, systemami MES oraz ERP. Tego typu środowiska dydaktyczne w istocie modelują funkcjonowanie nowoczesnych zakładów produkcyjnych, w tym produkcję jednostkową (*batch size one*) oraz skutki sieciowej organizacji procesów (Scheid, 2018). Z perspektywy szkół branżowych wdrażanie takich rozwiązań rodzi istotne wyzwania kadrowe i metodyczne. Nauczyciele muszą dysponować nie tylko wiedzą techniczną z zakresu automatyki, robotyki czy IT, lecz także kompetencjami umożliwiającymi projektowanie sytuacji dydaktycznych opartych na symulacji, integracji danych i myśleniu systemowym – czyli kluczowych elementach podejścia charakterystycznego dla technologii cyfrowego bliźniaka. Tymczasem, jak

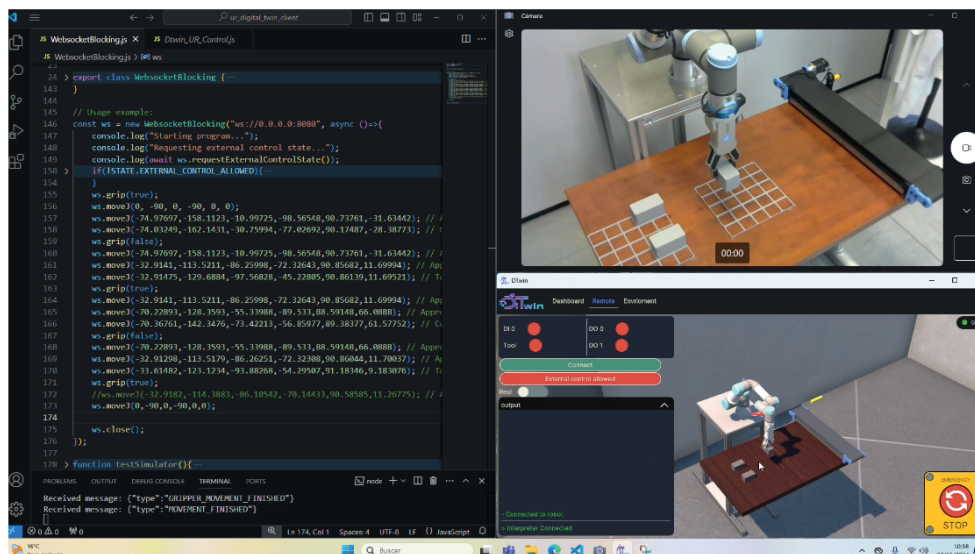
zauważa Scheid (2018), literatura przedmiotu dotycząca Learning Factories 4.0 rzadko koncentruje się na rozwoju kompetencji uczniów szkół zawodowych, a empiryczne badania dokumentujące rzeczywiste korzyści dydaktyczne wynikające z wykorzystania LF 4.0 są nadal nieliczne.

W konsekwencji szkoły branżowe stają przed wyzwaniem nie tylko inwestycyjnym, lecz także konceptualnym: konieczne staje się opracowanie spójnych modeli dydaktycznych i rozwiązań z zakresu *instructional design*, które pozwolą efektywnie wykorzystywać infrastrukturę Learning Factories 4.0 do kształcenia kompetencji związanych z Przemysłem 4.0 i technologią cyfrowych bliźniaków. Brak takich modeli grozi sprowadzeniem zaawansowanych technologicznie środowisk edukacyjnych do roli kosztownych laboratoriów demonstracyjnych, których potencjał edukacyjny nie jest w pełni wykorzystywany.

Odpowiedzią na rosnące potrzeby wdrażania technologii cyfrowego bliźniaka w edukacji zawodowej są inicjatywy realizowane w międzynarodowych konsorcjach, które umożliwiają opracowanie narzędzi, metod i praktyk wspierających integrację nauki na poziomie ponadkrajowym. Jednym z takich przedsięwzięć jest projekt DiTwin – Digital Twin for VET Schools, dwuletni projekt partnerski w sektorze kształcenia zawodowego (KA220-VET) finansowany w ramach programu Erasmus+. Projekt realizowano w okresie styczeń 2024 – styczeń 2026 przez międzynarodowe konsorcjum instytucji edukacyjnych, badawczych i organizacji wspierających innowacje. W jego skład wchodzi: Learnable – społeczność ekspertów rozwijających innowacyjne i inkluzywne metodologie edukacyjne w Europie; ETN Training Vision Ireland – doświadczony organizator programów stażowych i edukacyjnych w obszarze kształcenia zawodowego; Uniwersytet w Maladze wraz z Instytutem IMECH i laboratorium robotyki medycznej – zaplecze badawcze w zakresie mechatroniki, systemów cyberfizycznych i cyfrowych bliźniaków; Málaga TechPark – jeden z kluczowych europejskich ekosystemów innowacji technologicznych; Innovation Frontiers IKE – firma specjalizująca się w edtech, grywalizacji i badaniach edukacyjnych; Digital Smart – włoski dostawca VET oferujący zaawansowane szkolenia dla Przemysłu 4.0; Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie – renomowana uczelnia wyższa prowadząca badania i kształcenie na poziomie akademickim i współpracująca z licznymi szkołami branżowymi w Polsce. Głównym celem projektu jest zwiększenie skuteczności programów kształcenia zawodowego przez rozwój kompetencji wymaganych w erze Przemysłu 4.0 oraz wypełnienie luk w wyposażeniu szkół w zaawansowane narzędzia i maszyny dzięki wykorzystaniu technologii cyfrowych bliźniaków. Technologia DT umożliwia realizację praktycznych zajęć opartych na doświadczeniu, zgodnych z najnowszymi trendami przemysłowymi, co wspiera adaptację programów VET do aktualnych potrzeb rynku pracy. Projekt pozwala szkołom, które nie mają dostępu do zaawansowanych laboratoriów i urządzeń, wdrażać praktyczne formy nauki umożliwiające osiągnięcie kompetencji wymaganych w Przemysle 4.0. Ponadto inicjatywa przyczynia się do podnoszenia cyfrowych kompetencji nauczycieli, umożliwiając im prowadzenie zajęć opartych na cyfrowych bliźniakach i wspierając rozwój umiejętności cyfrowych uczniów (rycina 2).

Jednym z kluczowych rezultatów projektu są opracowane ramy kompetencji (*Competence Framework*) odnoszące się do 11 profili zawodowych niezbędnych w Przemysle 4.0. Są nimi m.in.: technik druku 3D, technik CNC, projektant CAD/CAM, specjalista ds. automatyzacji, analityk danych czy technik IoT i robotyki (DiTwin, 2025). Profile te zostały opracowane na podstawie wiedzy, umiejętności i kompetencji uczniów kończących poziom 4. i 5. EQF, z uwzględnieniem standardowych programów nauczania w krajach partnerskich (Włochy, Hiszpania, Irlandia, Grecja, Polska). Dokument stanowi zatem

Rycina 2. Przykładowe zastosowanie technologii cyfrowego bliźniaka – praca ramienia robota



Źródło: DiTwin (2025)

wsparcie dla szkół branżowych i nauczycieli w rozwijaniu kompetencji zgodnych z wymaganiami Przemysłu 4.0, ułatwiając integrację programów nauczania z aktualnymi potrzebami rynku pracy oraz wspierając proces przejścia uczniów z edukacji do zatrudnienia.

W ramach projektu stworzono także platformę DiTwin dla nauczycieli, oferującą moduły szkoleniowe umożliwiające praktyczne testowanie technologii cyfrowego bliźniaka. Moduły obejmują m.in. obsługę druku 3D, podstawy automatyzacji i sterowania procesami przemysłowymi, a także programowanie i obsługę robotów przemysłowych. Nauczyciele mogą uczestniczyć w zajęciach demonstracyjnych, rejestrując się online i korzystając z systemu zdalnego dostępu do laboratoriów, co umożliwia naukę i testowanie systemów w czasie rzeczywistym¹.

Kolejnym istotnym rezultatem projektu jest podręcznik DiTwin (*DiTwin Handbook*), zawierający kompleksowe materiały edukacyjne: wprowadzenie do technologii cyfrowych bliźniaków, znaczenie DT w edukacji zawodowej, strategię pedagogiczną, szczegółowe instrukcje dotyczące modułów DiTwin, studia przypadków oraz perspektywy rozwoju zawodowego w obszarze cyfrowych bliźniaków. Podręcznik ma kluczowe znaczenie dla szkół branżowych, zapewniając nauczycielom i uczniom możliwość systematycznego zapoznawania się z technologią DT krok po kroku i efektywnego wdrażania jej w procesie dydaktycznym.

Projekt DiTwin stanowi więc przykład nowoczesnej, międzynarodowej inicjatywy wspierającej rozwój kompetencji cyfrowych w edukacji zawodowej oraz integrację technologii cyfrowego bliźniaka w praktyce szkolnej, przyczyniając się do zwiększenia gotowości uczniów do pracy w środowisku Przemysłu 4.0.

¹ Szczegółowe informacje dotyczące możliwości testowania przygotowanych narzędzi znajdują się na stronie https://www.ditwin.eu/ditwin-platform_pl/.

DT W EDUKACJI ZAWODOWEJ – KONIECZNE ZMIANY W PROCESIE NAUCZANIA?

Technologia DT, definiowana jako wirtualna replika fizycznych systemów, urządzeń lub procesów, znajduje coraz szersze zastosowanie w kształceniu zawodowym. W szkołach branżowych integracja DT umożliwia tworzenie immersyjnych środowisk edukacyjnych, w których uczniowie mogą eksperymentować z maszynami, instalacjami pilotażowymi czy laboratoriami w całkowicie wirtualnych warunkach. Takie rozwiązania pozwalają na eliminację ryzyka operacyjnego oraz kosztów związanych z wykorzystaniem rzeczywistego sprzętu, jednocześnie umożliwiają one obserwację natychmiastowych konsekwencji podejmowanych decyzji. W kontekście nauczania problemowego uczniowie mają możliwość diagnozować usterki, modyfikować parametry procesów i weryfikować skutki swoich działań. Przyczynia się to do efektywnego zamknięcia cyklu teoria–praktyka, co skutecznie może oddziaływać na zwiększenie motywacji do nauki.

W kontekście kształcenia zawodowego integracja DT oznacza zatem znaczącą transformację tradycyjnego, teoretycznego nauczania w kierunku nauki immersyjnej, interaktywnej i doświadczeniowej (Experiential Learning). Uczniowie mogą aktywnie uczestniczyć w symulacjach odwzorowujących rzeczywiste scenariusze przemysłowe, wchodząc w interakcje z wirtualnymi maszynami, procesami produkcyjnymi czy instalacjami. Takie podejście zwiększa motywację i odpowiedzialność, a także wspiera współpracę równoległą i umożliwia dynamiczną ocenę postępów. Inne mechanizmy dydaktyczne obejmują naukę opartą na badaniach (Inquiry-Based Learning), które polegają na analizie wirtualnie stworzonego problemu i dążeniu do jego rozwiązania poprzez krytyczne myślenie i eksperymentalne rozumowanie. Realizacja zajęć dydaktycznych z wykorzystaniem długoterminowych projektów opartych na DT pozwala na projektowanie, testowanie i optymalizację rozwiązań. W takiej konfiguracji określony problem do rozwiązania nie kończy się wraz z zakończeniem lekcji dydaktycznej, ale pozwala on nauczycielowi na stopniowe zwiększanie poziomu złożoności zadań i poddanie ich analizie systemu w celu uzyskania informacji zwrotnej w czasie rzeczywistym (Scaffolding & Adaptive Learning).

Istotna w edukacji VET wykorzystującej technologię DT jest postawa otwartości na zmiany w sektorze przemysłu, elastyczność i personalizacji nauczania, gdyż treści szkoleniowe powinny być dostosowane do poziomu umiejętności i celów zawodowych uczniów, umożliwiając tworzenie zindywidualizowanych ścieżek nauki oraz włączanie modułów interdyscyplinarnych. Ponadto DT sprzyja rozwojowi kompetencji zarówno technicznych, jak i cyfrowych, obejmujących obsługę paneli HMI, nawigację w środowiskach 3D, analizę danych oraz pracę w zespołach cyfrowych. Rozwój tych umiejętności przygotowuje uczniów do pracy w nowoczesnych, zautomatyzowanych środowiskach cyberfizycznych, jednocześnie rozwijając kompetencje miękkie, takie jak krytyczne myślenie, rozwiązywanie problemów czy efektywna komunikacja. Poza tym uczenie kontekstowe i proceduralne poprzez DT umożliwia na kolejnych etapach uczenia się (studia wyższe) praktyczne zrozumienie skomplikowanych systemów przemysłowych, obserwowanie konsekwencji modyfikacji i błędów oraz zdobywanie wiedzy systemowej. Na przykład student mechatroniki programujący wirtualne ramię robota w interakcji z linią montażową może zdobywać doświadczenie bez ryzyka fizycznego. Jednocześnie DT umożliwia ćwiczenie diagnostyki, konserwacji predykcyjnej, reagowania w sytuacjach awaryjnych i kontroli parametrów procesów, co wspiera utrwalanie umiejętności przed

wejściem na rynek pracy. Ocena umiejętności w czasie rzeczywistym jest kolejną istotną funkcją DT. Technologie te umożliwiają przeprowadzanie oceny kształtującej i sumującej w środowisku wirtualnym, dostarczając obiektywnych danych dotyczących kompetencji technicznych i operacyjnych uczniów. W połączeniu z adaptacyjnym nauczaniem i informacją zwrotną w czasie rzeczywistym DT umożliwiają personalizację procesu nauki i stopniowe wprowadzanie złożoności.

Badania pilotażowe (listopad 2025 – styczeń 2026) przeprowadzone w szkołach branżowych w krajach partnerskich projektu DiTwin potwierdzają, że w każdym z krajów istnieją jeszcze bariery systemowe utrudniające implementację DT w edukacji. Bariery te obejmują: (1) sztywne programy nauczania VET, gdzie zbyt mało czasu i przestrzeni poświęca się na integrację zaawansowanych technologii, co znacznie ogranicza ich praktyczne wdrożenie; (2) niewystarczający poziom współpracy (lub jej brak) między sektorem edukacji a przemysłem – na skutek tego szkoły m.in. nie mają dostępu do aktualnych trendów rozwoju przedsiębiorstw lokalnych, przez co uczniowie nie znają realiów zastosowań technologii, o której uczą się w szkołach; (3) ograniczenia infrastrukturalne i generowanie znacznych kosztów w zakresie wsparcia technicznego, potrzebnego oprogramowania i narzędzi potrzebnych do efektywnego prowadzenia zajęć dydaktycznych; (4) luki kompetencyjne personelu dydaktycznego, na które wskazano w części poświęconej roli nauczyciela w edukacji z zastosowaniem DT.

Ponadto na podstawie wywiadów przeprowadzonych wśród nauczycieli szkół branżowych, gdzie prowadzony był pilotaż wśród uczniów², można uznać, że jednym z głównych wyzwań w kształceniu zawodowym jest luka kompetencyjna między umiejętnościami absolwentów a wymaganiami rynku³. Wyniki badania pilotażowego, zebrane opinie nauczycieli i uczniów biorących udział w zajęciach testowych pozwalają na stwierdzenie, że DT stanowi skuteczne narzędzie do jej niwelowania, umożliwiając realistyczne odwzorowanie środowiska pracy, maszyn i procesów w wirtualnym kontekście. Uczniowie mogą w ten sposób zdobywać doświadczenie praktyczne, rozwijać kompetencje techniczne i cyfrowe oraz uczestniczyć w interdyscyplinarnych projektach problemowych. W rezultacie zajęcia dydaktyczne stają się bardziej zgodne z aktualnymi praktykami przemysłowymi, a absolwenci są lepiej przygotowani do wejścia na rynek pracy. Poza tym DT wspierają rozwój zaawansowanych kompetencji technicznych, w tym obsługi narzędzi cyfrowych, interpretacji danych IoT, operowania wirtualnymi instalacjami i podejmowania decyzji operacyjnych. Jednocześnie sprzyjają rozwijaniu umiejętności miękkich, takich jak współpraca zespołowa, rozwiązywanie problemów czy myślenie krytyczne, co jest niezbędne w złożonych środowiskach przemysłowych.

Rozwiązania wypracowane przez Zespół DiTwin wskazują na obszary i metody skutecznego wdrożenia DT w edukacji zawodowej, które wymagają bliskiej współpracy między szkołami a przedsiębiorstwami. W tym celu wypracowano dwie główne strategie działań, pozwalające na wdrożenie tej technologii do edukacji zawodowej. Są nimi:

² W Polsce były to następujące szkoły: Zespół Szkół Mechanicznych nr 2 w Krakowie, Zespół Szkół im. Emila Godlewskiego w Piotrkowicach Małych, Technikum Nr 13 działające w Zespole Szkół Geodezyjno-Technicznych w Łodzi, Centrum Kształcenia Zawodowego i Ustawicznego nr 2 w Przemyśle.

³ Podobne luki kompetencyjne określono w badaniach prowadzonych w latach 2023–2025 przez Zespół Badań Edukacji w Zakresie Przedsiębiorczości UKEN w Krakowie. Wyniki badań zostały opublikowane w formie monografii: *Kształtowanie kompetencji przedsiębiorczych w Polsce jako odpowiedź na potrzeby współczesnego rynku pracy* (2025).

Strategia integracji DT w systemach VET i współpracy z przemysłem, która obejmuje pięć kluczowych obszarów: (1) współprojektowanie programów nauczania z uwzględnieniem aktualnych potrzeb rynku i technologii DT, IoT oraz AI; (2) tworzenie laboratoriów i środowisk symulacyjnych, dostępnych zarówno dla uczniów, jak i dla partnerów przemysłowych; (3) programy nauki w miejscu pracy, takie jak staże, praktyki i system dualny, wspierające rozwój kompetencji technicznych i miękkich; (4) budowanie lokalnych sieci i partnerstw strategicznych, umożliwiających wymianę doświadczeń i dostępu do nowoczesnych technologii; (5) wykorzystanie platform cyfrowych do zarządzania projektami edukacyjnymi, monitorowania postępów i organizacji współpracy między uczniami a sektorem przemysłu (w szczególności Przemysłu 4.0).

Pedagogiczne strategie nauczania z DT, w których obszarze zidentyfikowano siedem zagadnień: (1) uczenie doświadczeniowe oparte na cyklu Kolba; (2) uczenie przez dociekanie i projekty, sprzyjające krytycznemu myśleniu i interdyscyplinarnej współpracy; (3) uczenie problemowe, umożliwiające rozwiązywanie realistycznych problemów w środowisku DT; (4) *scaffolding* i nauka adaptacyjna, stopniowe wprowadzanie złożoności i dodatkowych danych analitycznych; (5) uczenie refleksyjne i współpraca grupowa, w tym dzienniki refleksji, *peer review* i minihackathony; (6) grywalizacja i integracja z odwróconą klasą, wykorzystanie wyzwań, odznak, materiałów przygotowawczych i analiz przed zajęciami i po zajęciach; (7) ocena i informacja zwrotna w czasie rzeczywistym.

Ocenia się, że realizacja założeń tych strategii daje szansę na efektywne wdrożenie technologii DT do szkół branżowych w Polsce, co jest szczególnie ważne w związku z rozwojem kompetencji stojących u podstaw nowych zawodów, jakimi są: inżynier DT, specjalista IoT, inżynier AI/ML, ekspert ds. cyberbezpieczeństwa czy deweloper symulacji. Wymagane kompetencje obejmują umiejętności zarówno techniczne (programowanie, modelowanie systemów, analiza danych, chmura, AI/ML, IoT, cyberbezpieczeństwo), jak i miękkie (krytyczne myślenie, współpraca, inicjatywa, elastyczność i gotowość do uczenia się). Szkoły branżowe powinny również promować ciągłe kształcenie poprzez certyfikacje, kursy online oraz współpracę z przemysłem, co w przyszłości pozwoli absolwentom na pewniejsze wejście na rynek pracy.

WNIOSKI

Integracja DT w edukacji zawodowej nie jest jedynie trendem, lecz koniecznością wynikającą z wymagań rynku pracy i rozwoju Przemysłu 4.0. DT umożliwiają immersyjne, praktyczne i bezpieczne nauczanie, rozwijają kompetencje techniczne i cyfrowe, a także umiejętności miękkie, które są niezbędne w nowoczesnych środowiskach pracy. Współpraca między szkołami a przemysłem, laboratoria, platformy cyfrowe oraz metody pedagogiczne oparte na doświadczeniu, projektach i problemach pozwalają na skuteczne przygotowanie uczniów do wyzwań przyszłości, zwiększając ich zatrudnialność i gotowość do pracy w cyfrowych, złożonych systemach.

DT są zatem nie tylko wirtualnymi kopiami systemów przemysłowych, lecz także narzędziem umożliwiającym tworzenie innowacyjnego, adaptacyjnego i zrównoważonego ekosystemu edukacyjnego. Ich rosnące zastosowanie otwiera perspektywę w obszarach sztucznej inteligencji, zdalnych operacji, zrównoważonego rozwoju oraz inteligentnych fabryk, oferując zarówno studentom, jak i instytucjom edukacyjnym nowe możliwości kształcenia i rozwoju zawodowego. Przeprowadzone analizy wskazują

na duże możliwości wdrożenia technologii DT do szkół branżowych, a przygotowane w ramach projektu DiTwin narzędzia i techniki wdrożenia mogą w znaczny sposób ułatwić ten proces.

Literatura

References

- Allen, B.D. (2021). *Digital Twins and Living Models at NASA*. Pozyskano z: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210023699/downloads/ASME%20Digital%20Twin%20Summit%20Keynote_final.pdf (dostęp: 10.11.2025).
- Bauernhansl, T., Hartleif, S., Felix, T. (2018). The digital shadow of production – a concept for the effective and efficient information supply in dynamic industrial environments. *Procedia CIRP*, 72, 69–74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.188>.
- Carretero, S., Vuorikari, R., Punie, Y. (2017). *The digital competence framework for citizens with eight proficiency levels and examples of use*. European Union. doi: <https://doi.org/10.2760/38842>
- de Kerckhove, D. (2021). The personal digital twin, ethical considerations. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2207), 1–12. Pozyskano z: <https://www.jstor.org/stable/27100810> (dostęp: 10.11.2025).
- DiTwin. (2025). <https://www.ditwin.eu/home-ditwin-polski/> (dostęp w okresie 20.03.2025 – 30.12.2025).
- Eseryel, D., Ge, X., Ifenthaler, D., Law, V. (2011). Dynamic modeling as a cognitive regulation scaffold for developing complex problem-solving skills in an educational massively multiplayer online game environment. *Journal of Educational Computing Research*, 45(3), 265–286. doi: <https://doi.org/10.2190/EC.45.3.a>
- Ferrari, A. (2013). DIGCOMP: A Framework For Developing and Understanding Digital Competence in Europe. W: Y. Punie, B.N. Brečko (red.), *Borrador. INTEF*. European Union. doi: <https://doi.org/10.2788/52966>
- Fraillon, J., Ainley, J., Schulz, W., Friedman, T., Gebhardt, E. (2014). *Preparing for Life in a Digital Age*. Heidelberg: Springer Science + Business Media. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14222-7>
- Fuller, A., Zhong, F., Day, C., Barlow, C. (2019). Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*. Piscataway, NJ: IEEE. Pozyskano z: <https://arxiv.org/abs/1911.01276> (dostęp: 29.12.2025).
- GAO. (2023). Digital Twins – Virtual Models of People and Objects, *Science & Tech Spotlight*. Pozyskano z: <https://www.gao.gov/products/gao-23-106453> (dostęp: 10.11.2025).
- Gebhardt, J., Grimm, A., Neugebauer, L.M. (2015). Developments 4.0 – Prospects on future requirements and impacts on work and vocational education. *Journal of Technical Education*, 3(2), 117–133.
- Grieves, M. (2015). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. Pozyskano z: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication (dostęp: 27.12.2025).
- Grzesik, W. (2023). Cyfrowy bliźniak w procesach wytwórczych. Część I. Stan zagadnienia, architektura i zastosowania. *Mechanik*, 1. Pozyskano z: https://www.mechanik.media.pl/pliki/do_pobrania/artykuly/23/2023_01_s0008.pdf (dostęp: 22.12.2025).
- Hazeleger, W., Aerts, J.P.M., Bauer, P. i in. (2024). Digital twins of the Earth with and for humans. *Commun Earth Environ*, 5, 463. doi: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01626-x>
- Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S., Kohl, H. (2016). Holistic approach for human resource management in industry 4.0. *Procedia CIRP*, 54, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.102>
- Heyse, V. (2018). Mittelstand 4.0 im Spannungsfeld des digitalen Wandels. W: V. Heyse, J. Erpenbeck, S. Ortmann, S. Coester (red.), *Mittelstand 4.0: Eine digitale Herausforderung*. Münster: Waxmann, 9–15.
- IBM. (2025). *What is a digital twin?* Pozyskano z: <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin> (dostęp: 15.12.2025).

- Ifenthaler, D. (2018). How we learn at the digital workplace. W: D.Ifenthaler (red.), *Digital Workplace Learning – Bridging formal and informal learning with digital technologies*, 3–8). New York – Berlin – Heidelberg: Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46215-8>
- Jones, D., Snider, Ch., Nassehi, Y., Yon, J., Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29A, 36–52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjens, J., Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51/11, 1016–1022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Kumar, S., Patil, S., Bongale, A., Kotecha, K., Bongale, M. (2020). Demystifying artificial intelligence based digital twins in manufacturing – a bibliometric analysis of trends and techniques. *Library Philosophy and Practice* (e-journal), Library University of Nebraska. Pozyskano z: <https://www.researchgate.net/publication/346057367> (dostęp: 12.11.2025).
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56, 1–2, 508–517. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Le Moigne, J., Smith, B., Little, M., Morris, R., Rogers, L., Ranson, J., Oz, N. (2024). *Technology for Earth System Digital Twins*. NASA Earth Science Technology Office (ESTO). Pozyskano z: <https://destination-earth.eu/wp-content/uploads/2024/05/Technology-for-Earth-System-Digital-Twins-.pdf> (dostęp: 15.11.2025).
- Lu, Y., Liu C., Wang, K.I., Huang, H., Xu, X. (2019). Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- O’Sullivan, J. (2020). A case-study in the introduction of a digital- -twin in a large-scale manufacturing facility. *Cork Open Research Archive (CORK)*. Pozyskano z: <http://hdl.handle.net/10468/11867> (dostęp: 13.11.2025).
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58B, 3–21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- Raza, M., Kumar, P., Hung, D., Davis, W., Nguyen, H., Trestian, R. (2020). *A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing*. Conference paper. doi: <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080395>
- Roll, M.J.J., Ifenthaler, D. (2020a). The Impact of Learning Factories on Multidisciplinary Digital Competencies. W: E. Wuttke, J. Seifried, H. Niegemann (red.), *Vocational Education and Training in the Age of Digitization: Challenges and Opportunities*, 1. Verlag Barbara Budrich, 23–38. doi: <https://doi.org/10.2307/j.ctv18dvv1c.5>
- Roll, M., Ifenthaler, D. (2020b). Lernortübergreifende Kompetenzentwicklung in der Industrie 4.0: Die Entwicklung digitaler Handlungskompetenz in der dualen Berufsausbildung aus der Ausbilderperspektive. *Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik*, 29, 185–209.
- Schäffer, U., Weber, J. (2018). Digitalisierung Ante Portas. *Controlling*, 30, 4–11.
- Scheid, R. (2018). Learning factories in vocational schools: Challenges for designing and implementing learning factories at vocational schools. W: D. Ifenthaler (red.), *Digital workplace learning: Bridging formal and informal learning with digital technologies*. New York: Springer, 271–289.
- Singh, S., Weeber, M., Birke, K.-P. (2021). Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and simulation. *Procedia CIRP*, 99, 567–572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.078>
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution – Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution?. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1512–1532. doi: <https://doi.org/10.3926/jiem.1470>
- Spöttl, G., Gorldt, C., Windelband, L., Grantz, T., Richter, T. (2016). Industrie 4.0: Auswirkungen auf Aus- und Weiterbildung in der M+E Industrie. *bayme – Bayerischer Unternehmensverband Metall und Elektro e.V.*
- Thames, L., Schaefer, D. (2017). *Cybersecurity for industry 4.0*. New York: Springer.

- Tomczyk, T., van der Valk, H. (2022). Digital Twin Paradigm Shift. *The Journey of the Digital Twin Definition*. Pozyskano z: [https:// www.researchgate.net/publication/360195802](https://www.researchgate.net/publication/360195802) (dostęp: 18.11.2025).
- Van Zutphen, T. (2018) The Digital Twin, Ethical Issues and Mechanical Morality. *T-Systems Customer Magazine*, 3.
- Vogel-Heuser, B., Bayrak, G., Frank, U. (2012). *Forschungsfragen in „Produktionsautomatisierung der Zukunft“*. Diskussionspapier Für Die Acatech Projektgruppe „ProCPS – Production CPS”. München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Voigt, K.-I., Müller, J.M., Veile, Johannes, W., Becker, W. (2018). Industrie 4.0 – Risiken für kleine und mittlere Unternehmen. In W. Becker, B. Eierle, A. Fliaster, B. Ivens, A. Leischnig, A. Pflaum, E. Sucky (red.), *Geschäftsmodelle in der digitalen Welt*. Wiesbaden: Springer Gabler, 517–534.
- Wang, J., Ye L., Gao, R.X., Li, C., Zhang, L. (2019): Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 57, 12, 3920–3934. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1552032>
- Wilbers, K. (2017). Industrie 4.0 und Wirtschaft 4.0: Eine Chance für die kaufmännische Berufsbildung. W: K. Wilbers (red.), *Industrie 4.0: Herausforderungen für die kaufmännische Bildung*, 9–52. Berlin: epubli GmbH. doi: https://doi.org/10.1007/-978-3-658-04883-9_4
- Yang, D., Karimi, H., Kaynak, O., Yin, S. (2021). Developments of digital twin technologies in industrial, smart city and healthcare sectors: a survey. *Complex Engineering Systems*, 1, 3. doi: <https://doi.org/10.20517/ces.2021.06>.

Autorka składa podziękowania partnerom projektu DiTwin: Learnable, ETN Training Vision Ireland, Uniwersytetowi w Maladze (wraz z Instytutem IMECH i Laboratorium Robotyki Medycznej), Málaga TechPark, Innovation Frontiers IKE, Digital Smart oraz Uniwersytetowi Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie za owocną współpracę przy realizacji projektu finansowanego przez Unię Europejską (nr 2023-1-IT01-KA220-VET-000154611).

Monika Noviello, dr, Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, Instytut Dziennikarstwa i Stosunków Międzynarodowych, Katedra Studiów Włoskich i Śródziemnomorskich. Geograf i doktor nauk o Ziemi w dyscyplinie geografia społeczno-ekonomiczna i gospodarka przestrzenna. Od 2016 r. jest członkiem Polskiego Towarzystwa Geopolitycznego, a od 2018 r. pracuje jako nauczyciel akademicki na Uniwersytecie Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie. Od 2023 r. pełni funkcję zastępcy redaktora naczelnego „Przeglądu Geopolitycznego”, a od 2024 r. należy do Stowarzyszenia Geografów Włoskich (A. Ge.I.). Współpracuje z Uniwersytetem Suor Orsola Benincasa w Neapolu oraz Uniwersytetem Sapienza w Rzymie. Jej zainteresowania badawcze obejmują klasyczną geografię regionalną, społeczności włoskie w kontekście współczesnego zróżnicowania regionalnego, problemy społeczno-gospodarcze Włoch, geopolitykę XX i XXI w. oraz gospodarkę przestrzenną, ze szczególnym uwzględnieniem konfliktów przestrzennych.

Monika Noviello, PhD, University of the National Education Commission, Krakow, Institute of Journalism and International Relations, Department of Italian and Mediterranean Studies. A geographer and who holds a PhD in Earth Sciences in the field of socio-economic geography and spatial management. Since 2016, she has been a member of the Polish Geopolitical Society, and since 2018, she has been an academic lecturer at the Commission of National Education University in Kraków. Since 2023, she has served as Deputy Editor-in-Chief of the Przegląd Geopolityczny (Geopolitical Review), and since 2024, she has been a member of the Italian Geographers' Association (A. Ge.I.). She also collaborates with the Suor Orsola Benincasa University in Naples and Sapienza University in Rome. Her research interests include classical regional geography, Italian communities in the context of contemporary regional diversity, socio-economic issues in Italy, 20th- and 21st-century geopolitics, and spatial management, with a particular focus on spatial conflicts.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8570-8840>

Adres / Address:

Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie

Instytut Dziennikarstwa i Stosunków Międzynarodowych
Katedra Studiów Włoskich i Śródziemnomorskich
ul. Podchorążych 2
30-084, Kraków, Polska
e-mail: monika.noviello@uken.krakow.pl