

PRZEGŁĄD budowlany



96 lat

CZASOPISMO POLSKIEGO ZWIĄZKU INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW BUDOWNICTWA

NR 3/2025



WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



80-lecie
Wydziału Inżynierii Lądowej
Politechniki Krakowskiej

„Przegląd Budowlany” – czasopismo naukowo-techniczne od roku 1929 promujące polski przemysł budowlany, właścicielem jest Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa, którego celem jest transfer wiedzy z zakresu inżynierii lądowej do praktyki budowlanej w zakresie planowania inwestycji, wykonawstwa, projektowania i utrzymania obiektów budowlanych z zastosowaniem nowoczesnych materiałów i technologii informatycznych.

Czasopismo publikuje:

- oryginalne artykuły prezentujące rozwiązania problemów naukowo-technicznych ze wszystkich specjalności inżynierii lądowej i architektury,
- informacje o nowych normach i kierunkach ich zmian,
- informacje promujące nowoczesne materiały i technologie, w tym technologie informatyczne (np. BIM),
- prezentacje nowych inwestycji i zastosowań nowoczesnych technologii,
- informacje na temat działalności Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, w szczególności Zarządu Głównego PZITB i poszczególnych oddziałów, w tym informacje o planowanych i odbytych wydarzeniach,
- materiały dotyczące konferencji naukowo-technicznych,
- prezentacje prac dyplomowych oraz innych prac technicznych podejmowanych przez studentów kierunku Budownictwo.

Główne obszary tematyczne to:

- nowe technologie i materiały dla budownictwa, szczególnie rozwiązania ekologiczne,
- ocena stanu technicznego, wzmocnianie i renowacje obiektów budowlanych,
- badania służące rozwiązywaniu problemów technicznych inżynierii lądowej,
- narzędzia informatyczne służące procesowi budowlanemu,
- prawo budowlane,
- zarządzanie przedsięwzięciami budowlanymi,
- kształcenie kadr dla budownictwa,
- bezpieczeństwo pracy w budownictwie.

Artykuły problemowe są recenzowane.

Zgodnie z komunikatem Ministra Nauki

z 5 stycznia 2024 r. autor za publikację artykułu w „Przeglądzie Budowlanym” uzyskuje 40 pkt.

„Przegląd Budowlany” jest rejestrowany w bazie danych o zawartości polskich czasopism technicznych BazTech, Index Copernicus Journals Master List, Crossref, Google Scholar oraz POL-index.

Redakcja: ul. Świętokrzyska 14 A,
00–050 Warszawa

tel./faks: (22) 826–67–00

Internet: www.przegladbudowlany.pl

Wersja papierowa czasopisma

jest wersją pierwotną

Redaktor Naczelna:

mgr inż. Grażyna Furmańczyk-Ziemińska

biuro@przegladbudowlany.pl

Marketing i reklama: reklama@przegladbudowlany.pl

Redaktor językowy: mgr inż. Teresa Jędrzejewska

Wydawca: Fundacja PZITB

ul. Świętokrzyska 14 A, 00–050 Warszawa

Przewodniczący Fundacji: mgr inż. Ryszard Trykosko

Prezes Zarządu Fundacji: mgr inż. Wiktor Piwkowski



2 Spis treści

WYDARZENIA

NASZE SPRAWY – AKTUALNOŚCI

- 4 Przewodnicząca PZITB Honorowym Profesorem Politechniki Lubelskiej – Grażyna Furmańczyk-Ziemińska
- 6 Konferencja Rewitalizacja 2025 – Mariola Książek-Nowak, Paweł Nowak, Jerzy Rosłon
- 7 WPPK 2025 – Maria Świerczyńska
- 8 IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Pożarowe Obiektów Budowlanych” – Marcin Chybiński, Łukasz Polus
- 10 Forum Kobiet 2025 – kształtując ścieżki kariery w branży budowlanej – Katarzyna Nowak-Dzieszek
- 11 Rozświetlone wnętrza – FAKRO
- 12 Moc kobiet w budownictwie – kompetencje, które zmieniają przyszłość – Anna Białkowska
- 14 Fasada Roku 2025 – ruszyły zgłoszenia do konkursu – Baumit
• Startuje konkurs Innowacje BHP w budownictwie
- 16 XXXVIII Finał Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych – Wioletta Jackiewicz-Rek, Piotr Knyziak
- 18 Konferencje Naukowo-Techniczne REMO/BUDIN 2025 – Mariusz Szóstak

ARTYKUŁY PRZEGLĄDOWE

80-LECIE WYDZIAŁU INŻYNIERII LĄDOWEJ POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

- 20 Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej – Lucyna Domagała
- 22 Beton – uniwersalny materiał konstrukcyjny – Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych L-1 – Krzysztof Chudyba
- 25 W kierunku zrównoważonego rozwoju w budownictwie – Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych L-2 – Izabela Hager, Tomasz Tracz, Katarzyna Mróz, Tomasz Zdeb, Teresa Stryszevska, Mateusz Sitarz
- 29 Kształtowanie, modelowanie i weryfikacja stanu technicznego – Katedra Konstrukcji Mostowych, Metalowych i Drewnianych L-3 – Mariusz Maślak
- 33 Tradycja, innowacja, przyszłość – Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli L-4 – Katarzyna Nowak, Marcin Radoń
- 37 Rola badań w rozwoju infrastruktury drogowej i kolejowej w Polsce – Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu L-5 – Stanisław Gaca, Mariusz Kieć, Piotr Koziół, Juliusz Sołkowski
- 41 Systemy transportowe i logistyczne: od teorii do innowacyjnych rozwiązań praktycznych – Katedra Systemów Transportowych L-6 – Daniel Kubek, Aleksandra Ciastoń-Ciulkin, Mariusz Dudek
- 44 Planowanie, organizacja, realizacja – efektywne zarządzanie budową – Katedra Zarządzania w Budownictwie L-7 – Edyta Plebankiewicz, Bartłomiej Sroka, Patrycja Karcińska, Monika Górka-Stańczyk, Sebastian Biel
- 48 Tradycja, innowacja, współpraca: mechanika budowy w służbie społeczeństwa i środowiska – Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów L-8 – Tadeusz Tatara, Alicja Kowalska-Koczwara
- 52 Pasja inżynierska wsparta innowacyjnością – Katedra Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów L-9 – Janusz P. Kogut
- 56 Inżynieria obliczeniowa – Katedra Technologii Informatycznych w Inżynierii L-10 – Witold Cecot, Irena Jaworska, Jan Jaśkowiec, Jacek Magiera, Sławomir Milewski, Jerzy Pamin, Marek Słoński, Adam Wasatko
- 59 Centrum Certyfikacji Budowlanej L-11 – Realizacja projektu MEZeroE – Aneta Nowak-Michta
- 62 Laboratorium Badawcze Materiałów i Konstrukcji Budowlanych L-12 – historia i możliwości badawcze – Krystian Brasse, Stanisław Kańka
- 66 Małopolskie Centrum Budownictwa Energooszczędnego L-13 – rola w nowoczesnym budownictwie – Małgorzata Fedorczyk-Cisak, Mirosław Dechnik, Michał Ciula, Aleksandra Buda-Chowaniec
- 70 Laboratorium Inżynierii Wiatrowej L-14 – Tunele aerodynamiczne do badań środowiskowych i budowlanych – Andrzej Flaga, Łukasz Flaga

Rada Naukowa

prof. nadzw. dr hab. inż. Tomasz Z. Błaszczyński
 prof. dr hab. inż. Ewa Błazik Borowa
 dr hab. inż. Janusz Bohatkiwicz
 prof. dr hab. inż. Wiesław Buczkowski
 prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielewski
 prof. dr hab. inż. Jan Deja
 prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec
 dr hab. inż. Wojciech Drozd
 dr inż. Robert Geryło
 dr hab. inż. Tomasz Godlewski
 prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak
 prof. dr hab. inż. Stanisław Gaca
 prof. dr hab. inż. Wiesława Głodkowska
 prof. dr hab. inż. Bożena Hoła
 prof. dr hab. inż. Jacek Hulimka
 prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska
 prof. dr hab. inż. Robert Kowalski
 prof. dr hab. inż. Henryk Nowak
 dr hab. inż. Beata Nowogórska
 prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki
 dr hab. inż. Jolanta Prusiel
 prof. dr hab. inż. Elżbieta Radziszewska-Zielina
 dr hab. inż. Teresa Rucińska
 prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz
 dr hab. inż. Barbara Rymasz
 dr hab. inż. Marek Salamak
 prof. dr hab. inż. Dariusz Skorupka
 prof. dr hab. inż. Anna Sobotka
 dr hab. inż. Jacek Szer
 prof. dr hab. inż. Wiesław Trąpczyński
 dr hab. inż. Ryszard Walentyński
 prof. Wiktor Kwasza, Hniedec Institute of Building, Lwów
 prof. dr hab. inż. Bogdan Nazarewicz, Politechnika Lwowska
 prof. dr-ing. Piotr Noakowski, Technische Universität Dortmund
 prof. dr inż. Andrzej Nowak, dr h.c. Auburn University, Alabama
 prof. Hartmut Pasternak, BTU Cottbus, Niemcy
 doc. dr inż. Wojciech Roszak, Lund University, Szwecja

Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB w kadencji 2024–2028

Przewodnicząca: prof. dr hab. inż. Anna Halicka
Wiceprzewodniczący: prof. dr hab. inż. Jacek Hulimka
Wiceprzewodnicząca: dr hab. inż. Teresa Rucińska
Sekretarz: dr inż. Joanna Laskowska-Bury
 mgr inż. Włodzimierz Babczyński
 dr hab. inż. Bernadeta Dębska
 prof. dr hab. inż. Jacek Domski
 prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
 dr hab. inż. Marta Kadela
 prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda
 dr inż. Marlena Kucz
 dr hab. inż. Beata Nowogórska
 dr hab. inż. Jolanta Prusiel
 prof. dr hab. inż. Elżbieta Radziszewska-Zielina
 dr hab. inż. Elżbieta Szafranko
 dr hab. Małgorzata Ulewicz
 prof. dr hab. inż. Tadeusz Urban
 dr hab. inż. Ryszard Walentyński
 prof. dr hab. inż. Adam Wysokowski

Kolegium Redakcyjne:

dr inż. Piotr Gryspanowicz
 dr inż. Piotr Knyziak
 dr inż. Paweł A. Król
 dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek
 mgr inż. Jan Sieczkowski
 dr hab. inż. Anna Szymczak-Graczyk

Redaktor statystyczny: dr hab. inż. Barbara Ksit

Okładka: 80-lecie Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

Cena 1 egz. 44,00 zł (plus 8% VAT)

Prenumerata i sprzedaż: tel./faks: (22) 826–67–00

DTP: mediaNOVA Jacek Gacukowicz **Drukarnia:** Edit

Materiałów niezamówionych redakcja nie zwraca i zachowuje sobie prawo do skrótów, zmian tytułów i wprowadzania skrótów. Nie ponosi też odpowiedzialności za treść reklam.

ARTYKUŁY PROBLEMOWE**KONSTRUKCJE – ELEMENTY – MATERIAŁY**

- 73** Zastosowanie pianobetonu jako podłoża w ocenie nośności łączników do mocowania termoizolacji – badania wstępne – Damian Suchoń, Marta Kadela, Daniel Dudek
- 77** Analiza naprężeń w słupie OWS-7 obudowy wykopu firmy Kopras w zależności od położenia rozpory oraz od rozkładu parcia gruntu działającego na obudowę – Wiesław Buczkowski, Marek Kopras, Wojciech Fleming
- 85** Potencjał oszczędności materiału w łukach pracujących na ściskanie a forma architektoniczna. Optymalizacja zużycia materiału na etapie projektowania wstępnego konstrukcji – Milena Wiercińska

RENOWACJE

- 89** Monitoring stanu technicznego średniowiecznych fortyfikacji obronnych – Dariusz Bajno, Izabela Skrzypczak

KATASTROFY BUDOWLANE

- 94** Działania i technologie zapobiegające występowaniu katastrof budowlanych w Polsce i na świecie – Zuzanna Frąckowicz, Jacek Szer

KONTRA 2024

- 98** Kształtowanie wybranych właściwości cieplnych geopolimerów poprzez ich modyfikację metalami – Justyna Ciemnicka, Małgorzata Brych-Dobrowolska, Karol Prałat, Artur Koper, Katarzyna Ewa Buczkowska

INŻYNIERIA PRZDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH

- 102** Przebudowa i uszczelnienie wielkogabarytowego zbiornika na wodę na terenach pogórnich – studium przypadku – Elżbieta Radziszewska-Zielina, Ewelina Kania, Tomasz Szczepański

REMO 2025

- 110** Problematyka napraw, wzmocnień i wymiany elementów konstrukcyjnych stropów w budynkach istniejących. Część II – Ryszard Antonowicz, Jacek Dudkiewicz
- 114** Zabezpieczenie detalu architektonicznego obiektu zabytkowego z zastosowaniem fotogrametrii. Część II – Anna Banaś, Maciej Niedostatkiwicz
- 118** Wpływ zmiany klimatu na obiekty budowlane. Część I. Wyzwania adaptacyjne w budownictwie wobec nasilających się zjawisk ekstremalnych – Jolanta Dąbrowska, Robert Gradka, Anna Rawska-Skotniczny, Małgorzata Biniak-Pieróg
- 122** Ogrodzenia i obiekty małej architektury z opoki – aspekty konstrukcyjne, architektoniczne i użytkowe – Marcin Gorączko, Aleksandra Gorączko
- 126** Badania wilgotności. Część III. Osuszanie murów – Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz

BUDIN 2025

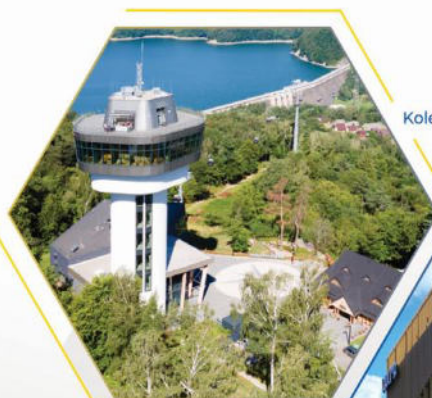
- 129** Ocena wpływu zastosowania powietrznego systemu solarnego na wybrane aspekty mikroklimatu pomieszczenia w budynku mieszkalnym – Anna Kaczmarek, Magdalena Nakielska
- 133** Laboratorium Living Lab w ramach projektu H2020 MEZeroE – Katarzyna Nowak-Dziesko
- 137** Szkło fotowoltaiczne jako element obudowy budynku. Część I. Aspekty techniczne – Łukasz Nowak, Michał Waliduda
- 140** Analiza porównawcza parametrów fizykalnych wybranych złączy budynków w zróżnicowanych standardach energetycznych – Krzysztof Pawłowski
- 144** Infrastruktura energetyczna małych elektrowni wodnych uzupełniającym rozwiązaniem na lokalną problematykę powodziową – Roman Pilch, Przemysław Konopski
- 148** Kontrola jakości drogowego podłoża konstrukcyjnego z wykorzystaniem narzędzi BIM. Część II. Etapy badań, podsumowanie prac badawczych – Elżbieta Szafranko, Magdalena Czyż, Maciej Lis

WSPOMNIENIA

- 152** Dr hab. inż. Kazimierz Kłosek (1950–2024)

ERBET[®]
GENERALNY WYKONAWCA INWESTYCJI

35 LAT
W POLSKIM BUDOWNICTWIE



Kolej Gondolowa w Solinie



Siedziba firmy WADOMA
w Podrzeczu



Amfiteatr w Krynicy - Zdroju



www.erbet.pl

Zapraszamy na płatne praktyki!

UŁÓŻ Z NAMI SWOJĄ PRZYSZŁOŚĆ



@karierabudimex | akademiabudimex.pl | praktyki@budimex.pl





O firmie:

PRIMOST POŁUDNIE Sp. z o.o. to polska firma specjalizująca się w kompleksowym wykonawstwie obiektów inżynierskich, działająca na terenie całego kraju jako generalny wykonawca lub kwalifikowany podwykonawca w branży mostowej.

Zakres usług:

Budowa, przebudowa i remonty infrastruktury mostowej
Budowa i przebudowa infrastruktury drogowej
Montaż konstrukcji stalowych
Usługi sprzętowe i transportowe
Usługi inżynierskie
Doradztwo techniczne



Dołącz do nas



Kontakt

+48 32 724 63 66

Dlaczego warto nam zaufać?

Wykwalifikowana kadra inżynierska z uprawnieniami budowlanymi
Własny sprzęt ciężki
Wyspecjalizowane brygady robocze
Ponad 95 zrealizowanych projektów
6 lat doświadczenia na rynku

www.primost-poludnie.pl

Non scholae, sed vitae discimus.



80-lecie

Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

1945 ♦ 2025

www.wil.pk.edu.pl/jubileusz



Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Lądowej

wil__pk



@wil-pk



Szanowni Państwo,

w roku 2025 Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki obchodzi Jubileusz 80-lecia swojego istnienia. Historia Wydziału nierozdzielnie związana jest z historią Politechniki Krakowskiej, sięgającą roku 1945, kiedy to rozpoczęto kształcenie w zakresie inżynierii lądowej w ramach ówczesnych struktur Akademii Górniczej w Krakowie. Rok później dekretem, z mocą obowiązującą od 1 kwietnia 1945 r., Rada Ministrów RP powołała do życia Politechnikę Krakowską, a w jej strukturach trzy założycielskie tzw. Wydziały Politechniczne: Architektury, Inżynierii i Komunikacji. Przez kolejne dekady Wydział Inżynierii, przemianowany w 1953 r. na Wydział Budownictwa Lądowego, a w 1987 r. ostatecznie na Wydział Inżynierii Lądowej, stał się jednym z głównych filarów rozwoju Politechniki Krakowskiej oraz jednym z najważniejszych ośrodków akademickich w Polsce w obszarze inżynierii lądowej oraz transportu. Pozycję tę Wydział Inżynierii Lądowej zawdzięcza bogatej tradycji oraz wciąż aktualizowanej wiedzy i doświadczeniu wielu pokoleń wybitnych naukowców i dydaktyków, tworzących swoiste szkoły naukowe w specjalistycznych obszarach, np. takich jak: konstrukcje sprężone, niezawodność konstrukcji inżynierskich, mechanika budowli, inżynieria wiatrowa czy metody obliczeniowe i technologie informatyczne w inżynierii lądowej. Przez osiem dekad



Wydział Inżynierii Lądowej wykształcił kilkadziesiąt tysięcy absolwentów, wypromował ponad pół tysiąca doktorów, prawie dwustu doktorów habilitowanych, a tytuł profesora tytularnego uzyskało kilkadziesiąt jego pracowników. Z szeregów tej ostatniej, elitarniej grupy naukowców wywodzi się aż dziesięciu rektorów Politechniki Krakowskiej – to miara silnej pozycji Wydziału na forum uczelni i znaczącego wpływu na kształtowanie jej historii.

Po reorganizacji Wydziału w 2018 r., w wyniku której zlikwidowano instytuty, jego strukturę organizacyjną tworzy piętnaście jednostek, w tym dziesięć katedr: Katedra Konstrukcji



Żelbetowych i Sprężonych (L-1), Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych (L-2), Katedra Konstrukcji Mostowych, Metalowych i Drewnianych (L-3), Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli (L-4), Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu (L-5), Katedra Systemów Transportowych i Logistycznych (L-6), Katedra Zarządzania w Budownictwie (L-7), Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów (L-8), Katedra Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów (L-9), Katedra Technologii Informatycznych w Inżynierii (L-10), oraz pięć jednostek wspomagających: Centrum Certyfikacji Budowlanej (L-11), Laboratorium Badawcze Materiałów i Konstrukcji Budowlanych (L-12), Małopolskie Centrum Budownictwa Energooszczędnego (L-13), Laboratorium Inżynierii Wiatrowej (L-14) i Laboratorium Drgań Budowli (L-15).

Obecnie Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej jest największym w Polsce Wydziałem, zarówno pod względem liczby studentów, jak i kadry akademickiej, kształcącym na kierunkach: *budownictwo* oraz *transport i logistyka*. Łącznie na wyżej wymienionych kierunkach studiów oraz międzywydziałowym kierunku – *gospodarka przestrzenna* kształcimy ponad 2500 studentów. Zajęcia prowadzone są zarówno w języku polskim, jak i angielskim, na studiach I i II stopnia, w formie stacjonarnej i niestacjonarnej. Dodatkowo, w ramach Szkoły Doktorskiej Politechniki Krakowskiej oraz w trybie eksternistycznym, przygotowujemy ponad 60 doktorantów do pracy naukowej i badawczej oraz obrony prac doktorskich w dyscyplinie *inżynieria lądowa, geodezja i transport*. Warto podkreślić, że Wydział Inżynierii Lądowej, jako jedyny w kraju, już w pierwszych miesiącach po wybuchu wojny w Ukrainie zorganizował kształcenie w języku ukraińskim dedykowane studentom – uchodźcom. Łącznie kształcenie w tym języku na obu kierunkach, kluczowych z punktu widzenia późniejszej odbudowy Ukrainy, podjęło ponad 120 studentów.

Wysokie kwalifikacje dydaktyczne i doświadczenie zawodowe nauczycieli akademickich Wydziału, atrakcyjne, nowoczesne programy kształcenia odpowiadające aktualnym potrzebom rynku pracy, szeroka oferta specjalności, profili dyplomowania oraz przedmiotów wybieralnych znalazły swoje potwierdzenie w akredytacjach prowadzonych kierunków, udzielonych bez uwag przez Polską Komisję Akredytacyjną (PKA) oraz Komisję Akredytacyjną Uczelni Technicznych (KAUT). Szczególnie doceniono wyróżniającą się współpracę z otoczeniem społeczno-gospodarczym, nadając

Wydziałowi certyfikat doskonałości kształcenia w kategorii „Partner dla rozwoju”. Prowadzenie przez Wydział Inżynierii Lądowej szerokiej i owocnej współpracy z jednostkami otoczenia zewnętrznego jest ściśle związane z działającą przy Wydziale Radą Przedsiębiorców, skupiającą przedstawicieli czołowych firm budowlanych i przedsiębiorstw związanych z transportem, a mającą bezpośredni wpływ na kształtowanie programów prowadzonych kierunków studiów. Wdrożone nowoczesne modele kształcenia, z jednej strony oparte na najnowszych zdobyczach nauki, z drugiej strony mocno osadzone w realiach praktyki inżynierskiej, zaowocowały nie tylko najwyższymi lokatami w prestiżowych rankingach, takich jak Builder Ranking Education for The Future czy Perspektywy, ale również licznymi, zarówno indywidualnymi, jak i zespołowymi sukcesami studentów.

Kadrę badawczo-dydaktyczną Wydziału Inżynierii Lądowej stanowi ponad 200 pracowników, w tym blisko 60 samodzielnych pracowników naukowych – profesorów i doktorów habilitowanych. Ich działalność wspiera zespół około 80 pracowników, będących wysoko wykwalifikowaną kadrą inżynierską, administracyjną i techniczną. Nauczyciele akademicy zatrudnieni na Wydziale to znakomici dydaktycy, doświadczeni praktycy i eksperci, jak również cenieni w środowiskach akademickich w kraju i za granicą wysokiej klasy naukowcy. Nasza kadra nie tylko tworzy międzynarodowe, interdyscyplinarne zespoły badawcze, ale ma także realny wpływ na kształt nauki światowej i tworzenie jej nowych nurtów. Rokrocznie na listach prestiżowego światowego rankingu najczęściej cytowanych na świecie naukowców TOP 2% pojawiają się nazwiska pracowników Wydziału. Całościowym potwierdzeniem wysokiej jakości prowadzonej na Wydziale działalności naukowej w dyscyplinie *inżynieria lądowa, geodezja i transport* jest przyznanie jej w ostatniej ewaluacji kategorii A. Wśród głównych kierunków działalności badawczej i rozwojowej prowadzonej obecnie na wydziale należy wymienić: mineralne materiały i wyroby budowlane, innowacyjne technologie ich produkcji uwzględniające uwarunkowania gospodarki cyrkularnej (GOZ); budynki zeroenergetyczne, neutralne klimatycznie, zapewniające wysoką jakość środowiska wewnętrznego; nowoczesne techniki wspomagania procesu projektowania i zarządzania informacją o obiektach budowlanych (BIM) z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji oraz rzeczywistości wirtualnej (VR) i rozszerzonej (AR); modelowanie technologii i organizacji złożonych procesów budowlanych w warunkach losowych; projektowanie i wzmacnianie konstrukcji żelbetowych, sprężonych, murowych, metalowych, drewnianych, kompozytowych i zespolonych; diagnostykę i monitoring obiektów budowlanych; inżynierię parasejsmiczną, w tym badania wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach; badania wpływów środowiskowych i klimatycznych na trwałość rozwiązań inżynierskich oraz energetykę wiatrową; projektowanie i utrzymanie infrastruktury drogowej i kolejowej,

analizy bezpieczeństwa i warunków ruchu drogowego; budownictwo hydrotechniczne i geotechnikę; modelowanie i optymalizację systemów transportowych i logistycznych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii danych; zrównoważoną mobilność i integrację systemów transportowych w przestrzeni zurbanizowanej.

Bogate doświadczenia naukowo-badawcze pracowników Wydziału Inżynierii Lądowej w powyższych obszarach przyczyniają się nie tylko do umacniania prestiżu Jednostki w środowiskach akademickich, ale także do budowania jej autorytetu w otoczeniu społeczno-gospodarczym. Ścisła współpraca z podmiotami zewnętrznymi to kolejny filar, na którym swoją działalność priorytetowo opiera Wydział Inżynierii Lądowej. Aktualnie Jednostka może się poszczycić około 100 aktywnymi porozumieniami o współpracy z podmiotami zewnętrznymi i największą na Politechnice Krakowskiej liczbą realizowanych umów, projektów oraz opinii i ekspertyz.

Synergiczny i harmonijny rozwój Wydziału w trzech głównych obszarach działalności (dydaktyka, nauka, współpraca z otoczeniem społeczno-gospodarczym) nie byłby możliwy, gdyby nie nowoczesna baza naukowo-badawcza, którą nieustająco modernizujemy i rozbudowujemy. Do sztandarowych jej przykładów, będących równocześnie wizytówką nowoczesnego oblicza Wydziału w ostatnich latach, należy zaliczyć unikatowe w skali kraju i zagranicy: Małopolskie Centrum Budownictwa Energooszczędnego, Laboratorium Aerodynamiki Środowiskowej czy Laboratorium Technik Wirtualnej i Rozszerzonej Rzeczywistości BIM VR.

Dziedzictwo osiemdziesięciu lat Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej to nie tylko liczby i fakty – to przede wszystkim historia ludzi: naukowców, dydaktyków, inżynierów, studentów, doktorantów i absolwentów, którzy współtworzyli jego renomę i pozycję w kraju i za granicą. Wchodząc w kolejną dekadę działalności, Wydział z dumą patrzy w przeszłość i odważnie spogląda w przyszłość. Wypracowana przez dziesięciolecia spójna, zrównoważona i długofalowa strategia rozwoju z jednej strony oraz duża elastyczność i szybkie reagowanie na zmienne uwarunkowania społeczno-gospodarczo-prawne z drugiej strony, pozwolą podjąć nowe inicjatywy i sprostać nowym wyzwaniom, zachowując jednocześnie fundamenty, na których zbudowano siłę Wydziału: tradycję, wiedzę i etykę zawodową.

Z okazji Jubileuszu 80-lecia pragnę złożyć serdeczne wyrazy wdzięczności wszystkim, którzy byli i są częścią naszej społeczności akademickiej, oraz wszystkim partnerom gospodarczym i instytucjonalnym za współtworzenie dorobku Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Wasze zaangażowanie, wsparcie i zaufanie są źródłem motywacji do dalszego rozwoju i umacniania pozycji Wydziału.

dr hab. inż. Lucyna Domagała, prof. PK
działan Wydziału Inżynierii Lądowej
Politechniki Krakowskiej

Beton – uniwersalny materiał konstrukcyjny

– Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych L-1

Concrete – versatile structural material – Chair of Reinforced and Prestressed Concrete Structures L-1

dr hab. inż. Krzysztof Chudyba, prof. PK (ORCID: 0000-0001-8880-5222), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1414

Streszczenie: W artykule opisano pokrótce historię Katedry Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych, stanowiącej jednostkę naukowo-dydaktyczną Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Przedstawiono ponadto ogólny zakres działalności naukowo-badawczej katedry i współpracy z przemysłem oraz wybrane osiągnięcia naukowe jednostki.

Słowa kluczowe: konstrukcje żelbetowe i sprężone, historia, działalność naukowo-badawcza.

Abstract: In the paper the history of the Chair of Reinforced and Prestressed Concrete Structures, being the scientific and didactic unit of the Faculty of Civil Engineering of Cracow University of Technology, is briefly described. There are also presented the general scope of scientifically research activities and co-operation with industry of the division as well as some selected scientific achievements.

Keywords: reinforced and prestressed concrete structures, history, scientifically research activity.

1. Wprowadzenie

Historia Katedry Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych

Początki historii Katedry Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych sięgają roku 1945, kiedy to w ramach Akademii Górniczej (dziś Akademia Górniczo-Hutnicza) na Wydziale Inżynierii Lądowo-Wodnej powstała Katedra Budownictwa Ogólnego pod kierownictwem prof. Nowakowskiego. Powołanie do życia wydziałów politechnicznych na terenie miasta Krakowa było odpowiedzią na pozostanie Politechniki Lwowskiej poza granicami administracyjnymi powojennego Państwa Polskiego. Duże zmiany organizacyjne pociągnęło za sobą zarządzenie MSW z 1953 roku w sprawie zmian organizacyjnych w AGH, na mocy którego dokonano rozdzielenia Wydziału Inżynierii Lądowo-Wodnej na Wydział Budownictwa Wodnego oraz Wydział Budownictwa Lądowego, w ramach którego w roku akademickim 1953/54 utworzono Katedrę Budownictwa Żelbetowego kierowaną przez prof. B. Kopycińskiego. W nowo utworzonej katedrze funkcjonowały dwa zakłady: Zakład Budownictwa Żelbetowego oraz Zakład Prefabrykacji Elementów Budowlanych. Równocześnie w 1953 roku włączono do katedry, wydzielone ze struktur AGH, Laboratorium Badawcze, wskutek czego poszerzono dotychczasową działalność o prowadzenie badań materiałów i elementów konstrukcyjnych, które wykonywano na zlecenie przemysłu. Był to również okres intensywnej współpracy jednostki z innymi ośrodkami badawczymi, między innymi warszawskim Instytutem Techniki Budowlanej oraz z jednostkami otoczenia gospodarczego. Tak ustanowioną strukturę administracyjną utrzymano do roku 1958, kiedy to w miejsce dwóch dotychczasowych zakładów

powołano cztery nowe: Zakład Budownictwa Żelbetowego, Zakład Prefabrykacji i Betonu Sprężonego, Zakład Technologii Betonu oraz Zakład Tworzyw Sztucznych w Budownictwie. Stan ten nie trwał jednak długo, ponieważ już w 1966 roku powtórnie zredukowano liczbę zakładów działających w ramach katedry do dwóch: Zakładu Konstrukcji Żelbetowych – kierowanego przez prof. K. Piwowarskiego i Zakładu Konstrukcji Sprężonych – kierowanego prof. S. Oleszkiewicza. Był to okres intensywnego zaangażowania dydaktycznego wszystkich pracowników katedry ze względu na zniesienie limitów liczby dyplomatów, jaką musiała prowadzić dana jednostka. W konsekwencji liczba studentów dyplomowanych w Zakładzie Konstrukcji Żelbetowych była kilkakrotnie wyższa niż w latach ubiegłych, co wynikało z dużej popularności budownictwa żelbetowego w Polsce. Gruntowne zmiany przyniósł rok 1970, kiedy w wyniku wprowadzenia struktury instytutowej w Politechnice Krakowskiej w miejsce Katedry Konstrukcji Betonowych, Katedry Konstrukcji Metalowych oraz Instytutu Budownictwa utworzony został istniejący przez prawie 50 lat Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych (IMIKB). Po pierwszych 4 latach utworzono w instytucie specjalistyczne zakłady, w tym Zakład Konstrukcji Żelbetowych z prof. K. Piwowarskim na czele i Zakład Konstrukcji Sprężonych pod kierunkiem doc. Z. Parzniewskiego. Od 1982 roku kierowanie Zakładem Konstrukcji Żelbetowych przejął doc. J. Ruppert, którego następcą od roku 1992 był prof. W. Ziobroń. Znaczna liczba samodzielnych pracowników naukowych umożliwiła powołanie Katedry Konstrukcji Żelbetowych w miejsce dotychczasowego zakładu. Wraz z objęciem kierownictwa przez prof. Z. Janowskiego w roku

1998 powrócono do poprzedniego statusu jednostki, tj. Zakładu Konstrukcji Żelbetowych. Natomiast kolejnymi kierownikami Zakładu Konstrukcji Sprężonych (okresowo – Pracowni Konstrukcji Sprężonych) byli: prof. K. Dyduch, prof. A. Seruga, dr hab. R. Szydłowski.

W roku 2019, w związku z reformą struktury Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, nastąpiła likwidacja Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych. Ze struktury instytutu wydodrębniono szereg katedr. W miejsce dwóch zakładów zajmujących się konstrukcjami z betonu powołano Katedrę Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych, która funkcjonuje do dzisiaj. Kierownikiem Katedry Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych jest prof. dr hab. inż. Andrzej Winnicki. Obecnie Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych liczy 23 pracowników, w tym 7 samodzielnych pracowników nauki, 11 doktorów, 2 magistrów, 3 pracowników technicznych i administracyjnych.

2. Działalność naukowo-badawcza i współpraca z przemysłem

Działalność naukowo-badawcza Katedry L-1 prowadzona jest w zakresie konstrukcji z betonu (żelbetowych, sprężonych, prefabrykowanych) oraz konstrukcji murowych i obejmuje następujące zagadnienia:

- zastosowanie betonów wysokiej wytrzymałości i stali wysokiej wytrzymałości w konstrukcjach żelbetowych – badania doświadczalne i analizy numeryczne żelbetowych słupów z betonów wysokiej wytrzymałości, belek zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości, weryfikacja właściwości prętów zbrojeniowych w zakresie przyczepności do betonów BWW za pomocą próby pull-out;
- innowacyjne metody wzmacniania konstrukcji z betonu i konstrukcji murowych materiałami kompozytowymi zbrojonymi włókami stalowymi, węglowymi, bazaltowymi, szklanymi, PBO;
- nowatorskie rozwiązania w zakresie budownictwa prefabrykowanego, badania i analizy elementów prefabrykowanych i ich połączeń – prefabrykaty stropowe, prefabrykaty nadprożowe, kolejowe podkłady strunobetonowe i inne;
- nowoczesne metody monitorowania bezpieczeństwa konstrukcji (Structural Health Monitoring) w ujęciu pomiarów realizowanych statycznie i dynamicznie oraz współczesne techniki pomiarów różnych wielkości fizycznych na obiektach rzeczywistych i w laboratoriach, w szczególności przy wykorzystaniu ciągłych geometrycznie czujników światłowodowych DFOS;
- alternatywne metody sprężania konstrukcji z betonu, rozwiązania stref zakotwień;
- analizy konstrukcji z betonu o średniej masywności i masywnych w zakresie oceny zmian temperatury, odkształceń wymuszonych, naprężeń własnych i wymuszonych, a także analiza ryzyka zarysowania i zarysowania dojrzewającego betonu;
- eksperymentalne i numeryczne analizy konstrukcji żelbetowych i sprężonych w warunkach pożaru;
- identyfikacja właściwości mechanicznych murów w obiektach historycznych z wykorzystaniem metod nieniszczących

i małoniszczących, analizy konstrukcji historycznych w aspekcie ich stanu technicznego, metod zabezpieczenia i wzmacniania;

- zaawansowane analizy konstrukcji z betonu, zagadnienia wielopolowe, modelowanie oddziaływań środowiskowych (reakcja alkalia-kruszywo w betonie), modelowanie numeryczne nośności i odkształcalności konstrukcji z betonu – analiza efektu skali, modele teoretyczne postępu korozji elementów konstrukcyjnych wraz z ich weryfikacją.

Kierunki współpracy katedry z gospodarką dotyczą diagnostyki oraz oceny bezpieczeństwa konstrukcji istniejących obiektów budownictwa przemysłowego, użyteczności publicznej i mieszkaniowego, nowoczesnych metod wzmacniania, naprawy i modernizacji konstrukcji (w tym obiektów budownictwa mieszkaniowego wielopłytowego), diagnostyki i oceny bezpieczeństwa konstrukcji murowych (w tym także w obiektach zabytkowych), wzmacniania konstrukcji murowych, konsultacji i weryfikacji projektów budowlanych i wykonawczych skomplikowanych obiektów budownictwa przemysłowego, użyteczności publicznej i budownictwa mieszkaniowego. Ponadto katedra prowadzi wykłady, seminaria i konsultacje w zakresie metod projektowania konstrukcji żelbetowych i murowych, na tle znowelizowanych polskich norm i norm europejskich.

3. Wybrane osiągnięcia naukowe

W niniejszym punkcie zdecydowano się opisać bardziej szczegółowo dwa wybrane osiągnięcia naukowe katedry, związane z prowadzoną działalnością naukowo-badawczą jednostki, posiadające także znaczny potencjał aplikacyjny.

W ramach działań naukowo-badawczych w Katedrze Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych prowadzone są badania dotyczące zastosowania stali wysokiej wytrzymałości SAS 670/800 w konstrukcjach żelbetowych. Wykorzystanie tego typu stali pozwala na zmniejszenie przekrojów elementów konstrukcyjnych czy redukcję stopnia zbrojenia. Stal SAS 670/800, produkowana przez niemiecką hutę SAH Stahlwerk Annahütte, charakteryzuje się podwyższoną wytrzymałością i brakiem półki plastycznej. Stal ta jest spawalna, zdatna do gięcia, a uźebrowanie prętów układa się w prawoskrętny gwint, co pozwala na łączenie prętów za pomocą łączników. W kontekście polskiego budownictwa stal ta znalazła zastosowanie m.in.: w budynkach Varso Place, Warsaw HUB, Skyliner czy Muzeum Śląskim. Badania z wykorzystaniem stali SAS 670/800 prowadzone w katedrze skupiają się głównie na dwóch aspektach: przyczepności do betonu oraz stanie granicznym użyteczności belek zbrojonych tą stalą. Współpracę betonu ze stalą zbrojeniową zapewnia zjawisko przyczepności. Znajomość tego zjawiska pozwala na precyzyjne określenie przebiegu zjawiska odkształcenia i zarysowania konstrukcji żelbetowej. W ramach projektu badawczego przeprowadzono analizę wartości naprężenia przyczepności stali SAS 670/800 do betonu zwykłego i wysokiej wytrzymałości. Porównano również wartości naprężenia przyczepności w próbkach wykonanych z prętami ze stali wysokiej wytrzymałości z próbkami z prętami z stali zwykłej. Stal SAS 670/800 charakteryzuje się porównywalną

przyczepnością do betonu jak stal zwykła. Dodatkowo wartości te w próbkach z betonem zwykłym osiągnęły wartość naprężenia przyczepności porównywalną do wartości wyznaczonej za pomocą Eurokod 2, natomiast wartości dla próbek z BWW były znacznie większe niż normowe. W katedrze przeprowadzono również badania belek w rzeczywistej skali, których zbrojenie główne wykonane było z prętów ze stali SAS 670/800. Zastosowanie stali wysokiej wytrzymałości powodowało znaczny wzrost nośności belek. Szerokości rys (średnie i kwantyle 95%) belek zbrojonych stałą wysoką wytrzymałością na wysokości zbrojenia dolnego przy naprężeniu w zbrojeniu dolnym wynoszącym 400 MPa nie odbiegały od szerokości rys belek zbrojonych zwykłą stalą przy naprężeniu 300 MPa. Wymienione poziomy naprężenia zostały przyjęte jako reprezentatywne wartości odpowiadające stanowi granicznemu użytkowalności. Przy przeprowadzaniu badań zastosowano metodę korelacji obrazów cyfrowych. Oprócz badań doświadczalnych przeprowadzono analizę na podstawie modeli numerycznych 3D w środowisku ABAQUS.

Zagadnieniami naukowo-badawczymi realizowanymi w katedrze od wielu lat są analiza, projektowanie i technologie wykonawcze konstrukcji sprężonych oraz prefabrykowanych. Prowadzone prace obejmują następujące obszary badawcze:

- projektowanie i realizację ścian kołowo-symetrycznych zbiorników monolitycznych i z elementów prefabrykowanych sprężonych ciągniami z przyczepnością i bez przyczepności;
- rozwój technologii wzmacniania istniejących zbiorników i silosów żelbetowych z zastosowaniem zewnętrznych cięgień bez przyczepności;
- projektowanie cylindrycznych i prostokątnych zbiorników żelbetowych monolitycznych z uwzględnieniem efektów skrapowania ściany zbiornika w płycie fundamentowej, na rozwój odkształceń we wczesnym okresie dojrzewania betonu;
- stosowanie zabiegów konstrukcyjno-technologicznych z uwzględnieniem między innymi cięgień bez przyczepności, w celu zminimalizowania ryzyka wystąpienia pionowych rys przelotowych w okresie dojrzewania betonu; zastosowanie betonów wysokowartościowych do produkcji prefabrykowanych elementów strunobetonowych;
- zastosowanie betonów na kruszywie lekkim (Certyd) do realizacji stropów płytowo-słupowych z betonu sprężonego oraz produkcji prefabrykowanych elementów strunobetonowych;
- zastosowania drutów z pamięcią kształtu (SMA Ni-Ti) do wzmacniania żelbetowych elementów belkowych i o przekroju cylindrycznym.

Problemy te analizowane są także w ramach wieloletniej współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowo-badawczymi (Université Blaise-Pascal w Clermont-Ferrand we Francji), w szczególności w zakresie zastosowania materiałów z pamięcią kształtu do wzmacniania elementów żelbetowych, a także w rozważaniach teoretycznych i badaniach doświadczalnych możliwości zastosowania drutów SMA Ni-Ti do wzmacniania żelbetowych elementów belkowych i o przekroju cylindrycznym (rury).

Prace naukowo-badawcze prowadzone były także w ramach współpracy z grupą TC 287-CCS Rilem w zakresie zarysowania

betonu w okresie jego dojrzewania, koncentrując się na konstrukcjach typu ściana na płycie oraz czynnikach wpływających na zarysowanie.

W ramach współpracy ze środowiskiem gospodarczym Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych Politechniki Krakowskiej zajmuje się wykonywaniami badań, ekspertyz, projektów wzmocnień oraz projektów nowych zbiorników (na wodę pitną i ścieki). Wśród ważniejszych prac zleconych, realizowanych przez pracowników katedry w ostatnich latach, należy wymienić:

- projekt budowlany i wykonawczy oraz badania poprawności wykonania cylindrycznej obudowy bezpieczeństwa z betonu sprężonego stokaża amoniaku o pojemności $V = 15\,000\text{ m}^3$ na terenie Zakładów Azotowych Puławy (jest to drugi obiekt tego typu w Polsce, zrealizowany również przy udziale pracowników katedry – obudowa bezpieczeństwa pierwszego stokaża amoniaku również została zaprojektowana i zrealizowana przy udziale pracowników Politechniki Krakowskiej w latach 90. XX wieku na terenie Zakładów Azotowych w Kędzierzynie-Koźlu);
- projekt technologii wykonywania ścian sprężonych w okresie zimowym dwóch zbiorników na wodę pitną o pojemności jednostkowej $V = 15\,000\text{ m}^3$ na Górze Narodowej Wschód w Krakowie;
- badania efektywności wzmocnienia zewnętrznej ściany walcowej bioreaktora BIOMIX (o pojemności całkowitej $V = 7476\text{ m}^3$) przez sprężenie zewnętrzne na terenie Oczyszczalni Ścieków Miechowice w Bytomiu;
- zbiorniki prefabrykowane realizowane w technologii C8 w instalacji biogazowni – ocena technologii pod kątem technicznym i montażowym wraz z wyznaczeniem maksymalnej pojemności użytkowej.

W ramach realizacji tych obszarów badawczych opracowano około 100 publikacji naukowych oraz kilka monografii naukowych [1–3].

4. Podsumowanie

Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych swoją historią sięga początków istnienia Politechniki Krakowskiej. Zakres aktywności naukowo-badawczej katedry obejmuje obecnie szeroki zestaw zagadnień materiałowych i konstrukcyjnych związanych z konstrukcjami z betonu (żelbetowe, sprężone, prefabrykowane) oraz konstrukcjami murowymi. Współpraca z gospodarką – realizowana przez specjalistów/ekspertów zatrudnionych w katedrze – dotyczy diagnostyki oraz oceny bezpieczeństwa konstrukcji istniejących obiektów budowlanych, nowoczesnych metod wzmacniania, naprawy i modernizacji konstrukcji, diagnostyki i oceny bezpieczeństwa konstrukcji murowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Seruga A., Sprężone betonowe zbiorniki na ciecz o ścianie z prefabrykowanych elementów, Politechnika Krakowska, Kraków, 2015, str. 439
- [2] Zych M., Zarysowanie ścian zbiorników żelbetowych: teoria i projektowanie, Monografie Politechniki Krakowskiej, Inżynieria Lądowa, 2017, str. 333
- [3] Szydłowski R., Stropy płytowe sprężone ciągniami bez Przyczepności: Teoria, Projektowanie, Badania, Monografie Politechniki Krakowskiej, 2019, str. 264

W kierunku zrównoważonego rozwoju w budownictwie – Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych L-2

Towards sustainable development in construction – Chair of Building Materials Engineering L-2

dr inż. hab. Izabela Hager, prof. PK (ORCID: 0000-0003-2852-8934), dr inż. hab. Tomasz Tracz, prof. PK (ORCID: 0000-0001-6050-484X), dr inż. Katarzyna Mróz (ORCID: 0000-0001-5306-2035), dr inż. hab. Tomasz Zdeb, prof. PK (ORCID: 0000-0002-0822-7934), dr inż. hab. Teresa Stryszewska, prof. PK (ORCID: 0000-0003-1984-4425), dr inż. Mateusz Sitarz (ORCID: 0000-0001-6219-3256), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1415

Streszczenie: Artykuł opisuje działalność Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych (KIMB) Politechniki Krakowskiej, podkreślając jej wkład w rozwój zrównoważonego budownictwa.

Słowa kluczowe: Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, zrównoważone budownictwo.

Abstract: The paper describes the activities of the Chair of Building Materials Engineering (KIMB) at Cracow University of Technology, highlighting its contribution to the development of sustainable construction.

Keywords: Chair of Building Materials Engineering, sustainable construction.

1. Wprowadzenie

Historia jednostki

Początki historii katedry należy łączyć z powstaniem w roku 1953, na ówczesnym Wydziale Budownictwa Lądowego, Katedry Budownictwa Ogólnego. Następnie, w ramach tej katedry w roku 1958 utworzony został Zakład Materiałów Budowlanych, którego kierownictwo powierzono, wtedy doktorowi, prof. Zbigniewowi Pieniążkowi. Stan taki trwał do roku 1964, kiedy to na wydziale powołano do życia Instytut Budownictwa. W roku 1970, w wyniku wprowadzenia w uczelni struktury instytutowej został on przekształcony w Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych. W roku 1974 w instytucie utworzono specjalistyczne zakłady, w tym między innymi Zakład Materiałów Budowlanych (kierowany do roku 1975 przez prof. Władysława Muszyńskiego, a później, do roku 1992, przez prof. Zygmunta Jamrożego). W ramach zakładu funkcjonował nieformalny podział na zespoły naukowo-dydaktyczne kierowane przez prof. Zygmunta Jamrożego, prof. Tadeusza Broniewskiego i prof. Tadeusza Domina. W roku 1992 zakład został przekształcony w Katedrę Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli, którą do roku 1999 kierował prof. Zygmunt Jamroży. Od roku 1999 katedrą kierował prof. Jacek Śliwiński. Po połączeniu z Zakładem Technologii Betonu w roku 2007 nazwa katedry została zmieniona na Katedrę Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli. Od grudnia 2016 r. katedrą kieruje dr hab. inż. Izabela Hager, prof. PK, a od września 2017 roku jednostka L-2 nosi obecną nazwę Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych.

2. Działalność naukowo-badawcza i współpraca z przemysłem

Pod względem liczebności pracowników i potencjału katedra jest jedną z większych jednostek organizacyjnych Wydziału Inżynierii Lądowej. Zespół katedry składa się obecnie z 20 zatrudnionych pracowników i jednego wolontariusza. Struktura kadry obejmuje sześciu doktorów habilitowanych, dziewięciu doktorów, czterech pracowników technicznych i administracyjnych.

Obecnie katedra prowadzi następujące formy działalności:

- obszerną tematycznie działalność naukowo-badawczą w zakresie inżynierii nowoczesnych, zrównoważonych kompozytów z matrycą mineralną, w tym ich trwałości w różnych warunkach eksploatacji, z której wynika bogata działalność publikacyjna;
- działalność naukowo-badawczą finansowaną zarówno ze środków wewnętrznych, jak i w coraz większym stopniu ze środków pozyskiwanych z zewnątrz w wyniku konkursów krajowych NCN, NAWA, NCBR i zagranicznych UE ERA-NET, ERA-MIN itp.;
- działalność naukowo-badawczą realizowaną we współpracy międzynarodowej z naukowymi ośrodkami badawczymi i uczelniami wyższymi;
- działalność dotyczącą współpracy z podmiotami gospodarki narodowej i stowarzyszeniami producenckimi w zakresie szeroko pojętego materiałoznawstwa budowlanego;
- działalność na rzecz rozwoju i popularyzacji nauki poprzez organizowanie i udział w konferencjach, seminariach

i warsztatach krajowych i międzynarodowych ciesząc się ugruntowaną pozycją w środowisku;

- działalność związaną z innymi formami, między innymi działalnością innowacyjno-patentową.

Działalność naukowo-badawcza stanowi silną podstawę prowadzonej obszernej działalności dydaktycznej, w tym przede wszystkim w zakresie ważnych w kształceniu inżyniera budownictwa przedmiotów dotyczących szeroko pojętego materiałoznawstwa budowlanego.

3. Zakres tematyczny prowadzonych badań naukowych

Naukowe zainteresowania zespołu katedry, zgodnie z jej nazwą, dotyczą zagadnień związanych z inżynierią materiałów budowlanych. Szczególnie rozwijana jest tematyka technologii, właściwości oraz trwałości materiałów mineralnych.

W zakresie tworzyw cementowych prowadzone są badania: betonów zwykłych i betonów nowej generacji (wysokowartościowe i ultrawysokowartościowe, samozagęszczalne, kruszywowe betony lekkie, fibrobetony, betony tekstylne, gruntobetony). Badania te dotyczą zarówno aspektów technologicznych (projektowanie składu, ocena właściwości technicznych, etc.), jak i trwałości w różnych warunkach eksploatacji, od cyklicznego zamrażania i rozmrażania po badania wpływu wysokiej temperatury.

Z tematów podejmowanych przez pracowników katedry w ostatnich latach należy także wymienić szeroko zakrojone badania nad możliwością zagospodarowania odpadów budowlanych i przemysłowych w tym osadów ściekowych, popiołów z utylizacji wysokotemperaturowej, odpadów kopalnianych itp. Badania dotyczące tej tematyki stanowią ważny filar działalności naukowej jako istotnego elementu gospodarki obiegu zamkniętego (GOZ). W zakresie badań dotyczących tworzyw geopolimerowych analizowane są problemy związane z wpływem ich składu na właściwości mieszanki oraz właściwości użytkowe i trwałość materiału stwardniałego. Równie intensywnie rozwijany kierunkiem badawczym są spienione materiały geopolimerowe które dzięki lekkiej i porowatej strukturze mogą skutecznie redukować straty ciepła, przyczyniając się do zwiększenia efektywności energetycznej wytwarzanych materiałów. Charakteryzując działalność naukową zespołu katedry, należy podkreślić, że we wszystkich prowadzonych w katedrze badaniach duży nacisk kładzie się na aspekty zrównoważonego budownictwa i gospodarki obiegu zamkniętego.

W wielu dziedzinach pracownicy katedry są cenionymi ekspertami, co pomaga w nawiązaniu współpracy z licznymi partnerami przemysłowymi. Współpraca ta często przybiera formę wspólnych projektów badawczych, które kończą się osiągnięciami wdrażanymi w skali inżynierskiej. Pracownicy katedry są członkami: Komitetu Inżynierii Lądowej

i Wodnej PAN, Sekcji Inżynierii Materiałów Budowlanych KILIW PAN, Komisji Budownictwa Oddziału PAN w Krakowie, grup roboczych PKN, Stowarzyszenia Producentów Betonu Towarowego, Stowarzyszenia Producentów Cementu, PZITB itd.

Efektom obszernej działalności naukowo-badawczej pracowników Katedry KIMB, połączonej ze ścisłą współpracą z otoczeniem przemysłowym, są znaczące osiągnięcia w zakresie patentowania innowacyjnych wynalazków. W ostatnich 10 latach pracownicy katedry są twórcami lub współtwórcami łącznie 7 patentów, które dotyczą opracowania zaawansowanych kompozytów cementowych, takich jak beton z proszków reaktywnych czy gruntobeton, a także tematyki związanej z zagospodarowaniem odpadów przemysłowych w zaprawach i betonach.

4. Misja, wizja i główne cele strategiczne katedry

Misja Katedry IMB sprowadza się do dwóch głównych elementów: realizacji innowacyjnych przedsięwzięć naukowo-badawczych związanych z inżynierią materiałów budowlanych i zrównoważonym budownictwem, oraz zapewnienia wysokiej jakości kształcenia akademickiego opartego na badaniach naukowych i wykorzystywaniu nowoczesnej infrastruktury badawczej Wydziału Inżynierii Lądowej PK.

Wizja Katedry IMB to silny zespół badawczy realizujący działalność naukową, w tym związaną z potrzebami otoczenia społeczno-gospodarczego, kraju i regionu. To współpracująca ze sobą grupa pracowników, doktorantów i studentów uczestnicząca w działalności dydaktycznej i badawczej wydziału, mocno rozwijająca współpracę z renomowanymi krajowymi i zagranicznymi ośrodkami badawczymi. Ważnym elementem działań katedry jest współpraca ze studentami Politechniki Krakowskiej i studentami z zagranicy (IUT Saint Nazaire, Universite de Nantes, CESI Rouen itd.) realizującymi staże w PK, którzy aktywnie uczestniczą w realizacji badań naukowych publikując wspólnie z pracownikami KIMB.

W celu rozwijania tej działalności w katedrze uruchomiono Koło Naukowe Footprint. Działalność koła w ostatnich 4 latach skoncentrowała się na realizacji kompleksowych projektów typu PBL (Project-Based Learning) dotyczących budowy kajaków z betonu. Tym samym nawiązano do działalności katedry w latach 80. i odnowiono tradycję uczestnictwa studentów PK w prestiżowych zawodach sportowych organizowanych w Holandii i Niemczech. Na tę działalność pozyskano środki z MNiSW Koła Naukowe Tworzą Innowacje SKN/SP/569443/2023, REG region uczący się – POWR oraz ze środków uzyskanych w ramach konkursów FutureLab PK. Sukcesy studentów zespołu PKanoe odbiły się dużym echem w mediach krajowych po zwycięstwach w Delft, Holandia w 2023 r. i w Brandenburgii, Niemczech 2024 roku. W 2025 r. Katedra IMB będzie organizatorem



Rys. 1. Wydarzenia organizowane przez Katedrę Inżynierii Materiałów Budowlanych z okazji Jubileuszu 80-lecia Politechniki Krakowskiej

międzynarodowych zawodów Kraków Concrete Canoe Challenge, które odbędą się pod Patronatem Rektora PK jako jedno z wydarzeń uświetniających Jubileusz 80-lecia Politechniki Krakowskiej (rys. 1).

5. Główne cele strategiczne Katedry IMB w perspektywie kolejnego 10-lecia

- Nauka: ukierunkowanie zainteresowań naukowych młodych pracowników nauki; stworzenie przyjaznych warunków pracy sprzyjających rozwojowi naukowemu pracowników i doktorantów; angażowanie studentów w działalność badawczo-naukową; zwiększenie aktywności publikacyjnej w renomowanych czasopismach międzynarodowych i wzrost rozpoznawalności działalności naukowej katedry na arenie międzynarodowej (projekty, publikacje zespołowe), intensyfikacja badań nad materiałami o obniżonym śladzie węglowym i strategii gospodarki obiegu zamkniętego w budownictwie (GOZ).
- Działalność grantowa: angażowanie pracowników w realizację projektów i badań B+R i motywowanie pracowników o występowanie z wnioskami grantowymi, w szczególności samodzielnych pracowników nauki; wspólne aplikowanie o finansowanie badań z partnerami zagranicznymi; wspieranie młodych pracowników nauki w przedsięwzięciach grantowych; pozyskanie lub udział w projektach UE w ramach trwających naborów.
- Kształcenie: dążenie do podniesienia jakości kształcenia poprzez rozwój naukowych i zawodowych kompetencji pracowników (współpraca naukowa, kursy językowe, szkolenia, mobilność) i dbałość o ciągły rozwój dydaktycznej bazy laboratoryjnej; rozwijanie partnerstw z firmami budowlanymi i producentami materiałów w celu dostosowywania programów kształcenia do potrzeb rynku.
- Internacjonalizacja działalności naukowo-badawczej: dalszy rozwój współpracy z zagranicznymi ośrodkami badawczymi; zwiększenie mobilności pracowników i doktorantów; udział we wspólnych seminariach i konferencjach o zasięgu międzynarodowym; udział w pracach Komitetów

Technicznych RILEM, w akcjach COST i badaniach między-laboratoryjnych; organizacja wydarzeń międzynarodowych: konferencji, seminariów, spotkań plenarnych (MATBUD – International Scientific-Technical Conference on Material Problems in Civil Engineering, KCCC – Kraków Concrete Canoe Challenge, IWCF: International RILEM Workshop on Concrete Behaviour due to Fire Exposure); pozyskanie środków na ich realizację (NAWA); realizowanie prac doktorskich promowanych wspólnie z partnerami zagranicznymi.

Dzięki uzyskaniu w drodze konkursu finansowania projektu Akademickie Partnerstwa Międzynarodowe „EMMAT E-mobilność oraz zrównoważone materiały i technologie” (PPI/APM/2018/1/00027) znacząco rozwinęła się współpraca pracowników KIMB z zagranicznymi ośrodkami badawczymi i uczelniami wyższymi o podobnym profilu działalności naukowej dotyczącej nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych spełniających wymagania zrównoważonego rozwoju. Aktywność na tym polu zaowocowała złożeniem kilkudziesięciu wniosków i uzyskaniem projektów badawczych. Wśród nich wymienić należy: projekt „SMART-G Smart geopolymers”, ERA-MIN 2 oraz projektów M-ERA. NET 3 Call 2021: „GEOSUMAT – Materials for circular economy – industrial waste based geopolymers composites with hybrid reinforcement”, „MAR-WRECK – Development of geopolymer composites as a material for protection the hazardous wrecks against corrosion” oraz „3D-FOAM Foamed geopolymer made by additive manufacturing for construction technology applications”, realizowanych w międzynarodowych zespołach wspólnie z partnerami z przemysłu. Pracownicy katedry są także aktywnie włączani w realizację projektu MEZeroE Open Innovation Digital Platform for Zero Energy Building Ecosystem is live and online w ramach Horyzont 2020.

Obecnie KIMB prowadzi wspólne badania i wymianę pracowników z wymienionymi dalej ośrodkami naukowymi: Nantes University, GeM Laboratory, Saint Nazaire, Francja, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraina (projekt NAWA Stars CUT – UA

UMOWA NR BNI-UE-2023-8), University of Beira Interior, Portugalia, Czech Technical University in Prague, Centre Scientifique et Technique du Batiment, Francja, UiT – The Arctic University of Norway, Dept. of Civil Engineering, National Ilan University, Taiwan, InnoRenew Centre of Excellence, Słowenia, Slovenian Nation Building and Civil Engineering Institute.

Udział w projekcie NAWA PROM międzynarodowa wymiana stypendialna doktorantów i kadry akademickiej – zapewnił młodym pracownikom nauki udział w szkołach letnich, wizytach studyjnych szkoleniach i konferencjach. Efektami bezpośrednimi z prowadzonej współpracy międzynarodowej jest znaczące zwiększenie mobilności pracowników, organizacja kilkunastu międzynarodowych spotkań seminaryjnych; realizowane wspólnie prace badawcze dotyczące nowoczesnych materiałów dla zrównoważonego budownictwa. Istotnym efektem współpracy są też wspólne publikacje z partnerami zagranicznymi, w tym monografie „Energy Efficient Building Materials and Product” (Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej), a także opracowanie i złożenie kilkudziesięciu wniosków o finansowanie badań dotyczących współpracy międzynarodowej (H2020, NAWA, NCN, NCBiR).

Od lat forum wymiany z jednostkami z zagranicy w zakresie inżynierii materiałów budowlanych i zrównoważonego rozwoju jest cyklicznie organizowana konferencja MATBUD, w której udział biorą jednostki badawcze z kraju i zagranicy od lat współpracujące z KIMB. W 2020 roku konferencja organizowana była dzięki współfinansowaniu Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (NAWA) w ramach projektu Akademickie Partnerstwa Strategiczne APM (PPI/APM/2018/1/00027/U/001). Jubileuszowa 10. edycja konferencji w 2023 roku uzyskała wsparcie w ramach Programu Welcome to Poland, „MATBUD’2023 – Rozwijanie międzynarodowej współpracy naukowej w zakresie inżynierii materiałów budowlanych” (BPI/WTP/2021/1).

W ramach członkostwa w międzynarodowych grupach eksperckich pod patronatem RILEM (TC 227-HPB, TC 256 – SPF, RILEM TC-IMC; TC 283-CAM) pracownicy katedry aktywnie uczestniczą w pracach Komitetów Technicznych. Praca na rzecz komitetów technicznych pozwala członkom na pozostawanie rozpoznawalnym w swojej dziedzinie na arenie międzynarodowej, a także daje możliwość uczestnictwa w międzylaboratoryjnych badaniach i analizach porównawczych. W ostatnim czasie na łamach czasopisma „Springer Materials and Structures” ukazały się Rekomendacje RILEM dotyczące przeprowadzania badań w kierunku oceny podatności betonu na odpryskiwanie w pożarze. Praca powstała jako efekt działań komitetu RILEM TC 256-SPF: w ramach prac Work Grup 3.2 – Screening tests (w zespole współpracowali ze sobą eksperci z Politechniki Krakowskiej i z czołowych jednostek europejskich zajmujących się odpornością ogniową konstrukcji betonowych: CSTB, Lund University, Research Institutes

of Sweden (RISE), CERIB, University of Sheffield, University of Bordeaux, Newcastle University, Politecnico di Milano, Univ.of Edinburgh i inni. W roku 2025 w ramach wydarzeń organizowanych z okazji Jubileuszu 80-lecia Politechniki Krakowskiej odbędzie się konferencja pod patronatem RILEM: IWCF 8th International Workshop on Concrete Behavior due to Fire Exposure, odbywająca się cyklicznie przez różne ośrodki naukowo-badawcze w Europie.

IMB prowadzi także ożywioną współpracę z otoczeniem przemysłowym. Współpraca ta dotyczy przede wszystkim realizacji projektów B+R oraz ocen technicznych materiałów i wyrobów budowlanych. W ostatnim okresie zespół zaangażowany był w realizację badań w ramach pięciu projektów NCBR, a kolejne są w trakcie oceny. Spośród partnerów wymienić należy (alfabetycznie): ATLAS; AARSLEFF BIZ; Centrum Technologiczne BETOTECH; BRUK-BET, CEMEX Polska; CEMENT OŻARÓW S.A., Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad; Heidelberg Materials; Holcim Polska S.A.; KAPRIN; Master Builders Solutions; MC – Bauchemie; REMEI Polska; SOLEY; TRACK TEC S.A., WMK, Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie Zarząd Dróg Wojewódzkich w Krakowie i inne.

6. Podsumowanie

Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Krakowskiej jest dynamiczną jednostką badawczo-dydaktyczną, prowadzącą zaawansowane prace nad nowoczesnymi, przyjaznymi środowisku materiałami dla zrównoważonego budownictwa.

Działalność naukowa katedry koncentruje się na innowacyjnych technologiach kompozytów mineralnych oraz wykorzystaniu surowców wtórnych, zgodnie z ideą gospodarki obiegu zamkniętego. Jednostka od lat rozwija współpracę z renomowanymi ośrodkami zagranicznymi, realizując projekty w ramach programów UE (ERA-MIN, ERA-NET) oraz w ramach programów krajowych NAWA, NCN, NCBR również we współpracy z partnerami przemysłowymi. Efektem tych działań są liczne publikacje, monografie i patenty, potwierdzające skuteczne łączenie badań podstawowych z zastosowaniami praktycznymi.

Wysoka jakość prowadzonych badań naukowych znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w dydaktyce oraz w aktywnym angażowaniu studentów i doktorantów w projekty badawczo-rozwojowe. Jednostka kontynuując dorobek wybitnych profesorów Zygmunta Jamrożego i Jacka Śliwińskiego, stanowi ważne ogniwo krajowego i międzynarodowego środowiska naukowego w dziedzinie inżynierii materiałów budowlanych.

Kształtowanie, modelowanie i weryfikacja stanu technicznego – Katedra Konstrukcji Mostowych, Metalowych i Drewnianych L-3

Shaping, modelling and verification of technical condition – Chair of Bridge, Metal and Timber Structures L-3

prof. dr hab. inż. Mariusz Maślak (ORCID: 0000-0003-3592-429X), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1416

Streszczenie: Katedra prezentowana w artykule ma charakter typowo konstrukcyjny. Prowadzone w niej prace badawcze dotyczą nie tylko projektowania i kształtowania nowych obiektów inżynierskich, ale również weryfikacji stanu technicznego obiektów już istniejących. Przedmiotem zainteresowania pracowników są przede wszystkim budowle o ustroju nośnym wykonanym ze stali, drewna lub ewentualnie materiałów drewnopochodnych. Mogą to być również konstrukcje zespolone, z elementami typu stal-beton, drewno-beton, a także, w przypadku fasad, panele aluminiowo-szklane. Badane są również obiekty mostowe, zarówno te konstruowane ze stali lub drewna, jak i te wykonane z betonu sprężonego, a także te budowane w technologii prefabrykacji. Proponowane do praktycznego stosowania są opracowywane w katedrze nowoczesne procedury obliczeniowe, weryfikowane numerycznie, z parametrami kalibrowanymi z wykorzystaniem wnioskowania probabilistycznego.

Słowa kluczowe: obiekty mostowe, konstrukcje metalowe, konstrukcje drewniane, konstrukcje zespolone, bezpieczeństwo pożarowe, podejście probabilistyczne.

Abstract: The chair presented in this article is of a typically structural nature. The research work carried out in it concerns not only the design and shaping of new engineering structures but also the verification of the technical condition of existing buildings. The employees are primarily interested in structures with a load-bearing structure made of steel, wood or possibly wood-based materials. These can be also composite structures, with elements such as steel-concrete, wood-concrete, and, in the case of facades, aluminum-glass panels. Bridge structures are also examined, both those constructed of steel or wood, and also those made of prestressed concrete as well as those built using prefabrication technology. Modern calculation procedures developed in this chair are proposed for practical use, verified numerically, with parameters calibrated using probabilistic inference.

Keywords: bridges, metal structures, timber structures, composite structures, fire safety, probability-based approach.

1. Wprowadzenie

Odrobina historii

Na historię katedry składają się trzy niezależne historie, ta dotycząca budowli mostowych, ta dotycząca konstrukcji metalowych i ta dotycząca obiektów wykonanych z drewna lub materiałów drewnopochodnych.

Katedra Budowy Mostów była jedną z 16 katedr Wydziału Inżynierii Lądowej i Wodnej, nowo tworzonego przy Akademii Górniczej w Krakowie dekretem erekcyjnym wydziałów politechnicznych z dnia 19.11.1946 roku (z mocą obowiązującą od 1.04.1945 roku). Po pełnym usamodzielnieniu się Politechniki Krakowskiej, co nastąpiło w roku akademickim 1953/54, przy formalnym rozdzieleniu dotychczasowego wydziału na Wydział Budownictwa Lądowego

i Wydział Budownictwa Wodnego, katedra funkcjonowała nieprzerwanie w strukturach pierwszego z nich. Wśród znanych inżynierów mostowych kierujących nią w kolejnych latach należy wymienić prof. Stanisława Andruszewicza i prof. Juliusza Korelewskiego. W 1970 roku katedra została przekształcona w Zakład Budowy Mostów i Tuneli. Weszła bowiem w skład Instytutu Dróg, Kolei i Mostów. W 1982 roku przeniesiono ją do Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych. W 1993 roku zespołowi przywrócono rangę katedry. Począwszy od połowy lat osiemdziesiątych kierowali nią najpierw prof. Kazimierz Flaga, a następnie prof. Kazimierz Furtak.

Historia Katedry Konstrukcji Metalowych rozpoczyna się dopiero w 1953 roku. Jako Katedra Budownictwa Stałego, kierowana przez doc. Franciszka Wojnarowskiego,

była częścią Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych. W 1970 roku jej kierownictwo objął prof. Janusz Murzewski. W latach 1989–2004 w strukturach instytutu funkcjonowały równolegle: Katedra Podstaw Projektowania Konstrukcji Metalowych i Teorii Niezawodności, kierowana przez prof. Murzewskiego, oraz Katedra Konstrukcji Stalowych i Spawalnictwa, kierowana przez prof. Zbigniewa Menderę. Od 2001 roku kierownictwo pierwszego z tych zespołów zostało powierzone prof. Marianowi Gwoździowi. Po połączeniu obu katedr w jedną Katedrę Konstrukcji Metalowych, co miało miejsce w 2004 roku, całym zespołem kierował prof. Gwoździ.

Tradycje budownictwa drewnianego wywodzą się z pionierskich prac doc. Danuty Mischke, publikowanych już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Były one następnie twórczo rozwijane przez zespół Zakładu Budownictwa Ogólnego, kierowany przez prof. Antoniego Stachowicza i stanowiący część byłego Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych.

W 2019 roku, po likwidacji na Wydziale Inżynierii Lądowej struktury instytutowej, została utworzona wspólna Katedra Konstrukcji Mostowych, Metalowych i Drewnianych, kierowana do dzisiaj przez prof. Mariusza Maślaka.

2. Główne prace badawcze prowadzone w katedrze

Znakiem rozpoznawczym prac naukowych kojarzonych z katedrą jest weryfikacja poziomu bezpieczeństwa gwarantowanego użytkownikowi różnego typu obiektów inżynierskich, wykonanych z różnych materiałów, przy założeniu jakościowo zróżnicowanych, ale potencjalnie możliwych scenariuszy ich użytkowania. Chodzi przede wszystkim o identyfikację scenariuszy krytycznych, to znaczy takich, które dla danego obiektu generują największe ryzyko zawodu. Jest to na ogół ryzyko prognozowane, ale kalibrowane na podstawie danych uzyskanych po inwentaryzacji przeprowadzonej in situ, w odniesieniu do konstrukcji już użytkowanych lub ewentualnie po formalnej analizie założonych a priori procedur i obciążeń normowych, jeśli dotyczy konstrukcji nowo projektowanych. Narzędziami badawczymi w tego typu rozważaniach są zwykle algorytmy wnioskowania probabilistycznego. Uwzględniają bowiem nie tylko losowość cech materiałowych, ale również niepewność zastosowanego w praktyce modelu obliczeniowego. Pozwalają przy tym na uzasadnioną statystycznie specyfikację wartości reprezentatywnych prognozowanych poziomów losowych obciążeń oddziałujących na analizowaną konstrukcję, a dzięki temu także na racjonalne ustalenie najbardziej niekorzystnego ze względu na weryfikowany poziom bezpieczeństwa, a zatem obliczeniowo miarodajnego, efektu ich reprezentatywnej kombinacji. Wynikiem tego rodzaju analiz, oczekiwanych przez projektantów, jest zwykle kalibracja odpowiednich, częściowych współczynników bezpieczeństwa,

kojarzonych z ilościowo zróżnicowanymi wymogami, warunkowanymi poziomem możliwego do zaakceptowania prawdopodobieństwa zawodu.

Spośród rozważanych w prowadzonych przez nas badaniach potencjalnie możliwych scenariuszy użytkowania danego obiektu na szczególną uwagę zasługują te, które wiążą się z odniesionymi do niego sytuacjami projektowymi o charakterze wyjątkowym, interpretowanymi z reguły jako zdarzenia statystycznie rzadkie. Z tego względu skupiamy się w szczególności na analizie prognozowanego dla danej konstrukcji oddziaływania pożarowego. Efektem tego rodzaju dociekań ma być, w intencji autorów badania, specyfikacja, miarodajna na tyle na ile to możliwe, realnej odporności ogniowej analizowanego obiektu, a więc czasu, przez który będzie on w stanie w określonych warunkach zachować zdolność bezpiecznego przenoszenia przyłożonych do niego obciążeń, zarówno tych zewnętrznych, jak i tych generowanych ewentualnym krępowaniem możliwości swobodnej realizacji odkształceń termicznych.

Analiza, o której mowa powyżej będzie wiarygodna pod warunkiem odpowiednio precyzyjnego rozpoznania relacji zachodzącej pomiędzy właściwościami danego materiału a oddziałującą na niego temperaturą. Chodzi głównie o stopień redukcji w warunkach pożaru nie tylko wytrzymałości tego materiału ale również sztywności wykonanych z niego elementów. W prowadzonych badaniach podkreślamy jednak, że niemniej istotne w tego rodzaju analizach jest ustalenie charakteru zmian indukowanych w materiale wskutek oddziałującego na niego epizodu pożarowego, a następnie pozostających w nim w sposób trwały po jego pełnym wystudzeniu. Wiedza tego rodzaju ma na ogół znaczenie kluczowe, zwłaszcza wtedy, gdy ocenie podlega ewentualna możliwość ponownego użycia badanego materiału po pożarze, w szczególności w elementach nośnych przewidzianych do przyszłej pracy pod obciążeniem. Szczególnie niebezpieczne wydaje się w tym względzie zagrożenie popożarową kruchością, co jak dotąd jest dość słabo dostrzegane przez inżynierów.

Kolejnym polem prac naukowych prowadzonych w katedrze jest analiza pracy elementów stalowych o przekrojach cienkościennych, w szczególności tych kwalifikowanych do klasy 4. Chodzi tu głównie o badanie zginanych blachownic stalowych ze smukłym środkiem, zwłaszcza pod kątem oceny ich odporności na zjawiska globalnej i lokalnej niestateczności, w tym przede wszystkim na zwichrzenie. Odpowiednie formuły normowe rekomendowane do stosowania w tym względzie nie są jak dotąd, jak się wydaje, kalibrowane w sposób dostatecznie wiarygodny. W badaniu obiektów mostowych prowadzonym w katedrze analizom poddaje się odpowiedź konstrukcji o zróżnicowanym schemacie statycznym i rozmaitych wariantach obciążenia na różnego rodzaju oddziaływania dynamiczne. W szczególności chodzi o wymuszenia generowane przez człowieka podczas chodu i biegu. Obiektami poddawany

weryfikacji są różnego typu kładki dla pieszych. Wynikiem tych badań, w zamierzeniu ich autora, ma być próba zdefiniowania wymogów akceptowalnego komfortu użytkownika tego rodzaju konstrukcji.

Inną grupą badań prowadzonych w katedrze, odniesioną także do obiektów mostowych, są te mające na celu rozeznanie ewentualnej możliwości wykorzystania przy ich kształtowaniu różnego rodzaju materiałów pochodzących z recyklingu, w tym w szczególności granulatów polimerowych produkowanych na bazie przetworzonego PET.

W dziedzinie konstrukcji drewnianych, a także tych wykonywanych z zastosowaniem materiałów drewnopochodnych, prowadzone są w zespole badania zachowania się w różnych warunkach innowacyjnych złączy podatnych skonstruowanych na tej bazie. Potencjalne pole ich zastosowań wydaje się bardzo szerokie. Mogą one być użyteczne na przykład przy rewitalizacji konstrukcji już istniejących albo też w obiektach o charakterze tymczasowym.

3. Przyznane granty, prowadzone doktoraty i współpraca międzynarodowa

Opisane powyżej badania finansowane są głównie ze środków pozyskanych z różnego rodzaju funduszy grantowych i projektów międzynarodowych, w tym w szczególności:

- Grantu 2024/53/B/ST11/01331 – „Badania popożarowej podatności na kruche pękanie stalowych spawanych złączy doczołowych”, przyznanego przez NCN w ramach konkursu OPUS 27 na lata 2024–2028, kierownik – prof. Mariusz Maślak;
 - Grantu LIDER14/0270/2023 – „Łańcuch kompozytowy nieprzewodzący ładunku elektrycznego wraz z systemem kotwienia”, przyznanego przez NCN w ramach konkursu LIDER 14 na lata 2024–2027, kierownik – dr inż. Krzysztof Ostrowski;
 - Grantu 2023/51/D/ST8/01795 – „Eksperymentalna ocena wpływu perforacji profili kompozytowych na nośność elementów betonowych”, przyznanego przez NCN w ramach projektu SONATA 19, kierownik – dr inż. Krzysztof Ostrowski;
 - Grantu 2021/43/I/ST8/00554, przyznanego przez NCN dla programu DIAMONDS (DIAGnostics and Mechanical tests Of aged adhesive layers used in joiNts of wooDen structureS) w ramach konkursu OPUS Weave. Czas trwania projektu 48 miesięcy począwszy od lipca 2022 roku. Partnerami projektu po stronie polskiej są PK i AGH w Krakowie, natomiast po stronie słoweńskiej InnoRenew CoE, a także Slovenian National Building and Civil Engineering Institute;
 - Projektu Cost Action CA20139, program HELEN (Holistic design of taller timber buildings).
- Kolejne wnioski są aktualnie w trakcie oceny. Dotyczy to następujących tematów:
- „Eksperymentalne i numeryczne badania odporności ogniowej giętych na zimno perforowanych profili stalowych”

– złożony do NCN w programie SONTA 20 przez dr. inż. Piotra Woźniczka;

- „Applying coordination science to enhance emergency management systems and response space” – COST Action Proposal OC-2024-1-28076. Jednym z wnioskodawców jest mgr inż. Klaudia Śliwa – Wieczorek.

Wyniki prowadzonych badań stanowią wsad merytoryczny w wyszczególnionych poniżej przewodach i postępowaniach doktorskich, w tym zakończonych, takich jak:

- Małgorzata Snela – „Szacowanie temperatury krytycznej stalowych ram przechyłowych w pożarze rozwiniętym z uwzględnieniem zmieniającej się podatności węzłów”, obrona 2016 rok, promotor: prof. M. Maślak;
- Anna Tkaczyk – „Nośność graniczna stalowych ustrojów ramowych w pożarze rozwiniętym – oszacowanie metodą kinematyczną”, obrona 2017 rok, promotor: prof. M. Maślak;
- Piotr Woźniczka – „Strategie bezpieczeństwa pożarowego wybranych szkieletów stalowych hal wielkogabarytowych”, obrona 2019 rok, promotor: prof. M. Maślak;
- Janusz Siudut – „Prognoza trwałości skorodowanego pasa płaszcza stalowego zbiornika na paliwa płynne”, obrona 2021 rok, promotor: prof. M. Maślak;
- Paulina Zajdel – „Popożarowa degradacja wybranych stali stosowanych w budownictwie w świetle wyników eksperymentalnych uzyskanych w zinstrumentalizowanej próbie udarności Charpy’ego” – promotor: prof. M. Maślak, obrona 2024 rok, a także prowadzonych obecnie w Szkole Doktorskiej PK, takich jak:
- Dawid Rusin (Aluprof S.A.) – „Innowacyjna metoda ciągłego pomiaru odkształceń ściany osłonowej aluminiowo-szklanej oraz opracowanie doświadczalno-numerycznej metody analizy stanu naprężeń w konstrukcji”, doktorat wdrożeniowy DWD/6/0524/2022, promotor prof. J. Juraszek (Uniwersytet Bielsko-Bialski), promotor pomocniczy dr inż. P. Woźniczka;
- Marcin Klimek – „Analiza popożarowej degradacji właściwości mechanicznych, zmian strukturalnych oraz podatności na kruche pękanie doczołowych złączy spawanych w świetle wyników badań eksperymentalnych”, promotor: prof. M. Maślak, promotor pomocniczy: dr inż. K. Pańcikiewicz (AGH Kraków);
- Oliwia Sikora – „Ocena wpływu perforacji rur z kompozytów FRP na nośność elementów betonowych”, promotor prof. K. Furtak, promotor pomocniczy: dr inż. K. Ostrowski;
- Marcin Piechaczek – „Technologia wytwarzania kruszywa z odpadów z dodatkiem pasty PET do zastosowania w konstrukcjach mostowych”, promotor prof. K. Furtak, promotor pomocniczy: dr inż. K. Ostrowski;
- Mariusz Spyrowski – „Ocena efektów progowych przy wykorzystaniu kompozytowego materiału z odpadów polimerowych w mostach zintegrowanych”, promotor prof. K. Furtak, promotor pomocniczy: dr inż. K. Ostrowski.

W ramach powyższych doktoratów opracowano dwa zgłoszenia patentowe, w tym:

- P.446594 – „Element zbrojeniowy elementów słupowych”, twórcy zgłoszenia: dr inż. K. Ostrowski, mgr inż. O. Sikora, mgr inż. M. Piechaczek;
- P.446595 – „Sposób wykonywania zespolonych, żelbetowo-kompozytowych elementów słupowych” twórcy zgłoszenia: dr inż. K. Ostrowski, mgr inż. O. Sikora, mgr inż. M. Piechaczek.
- Pracownicy katedry biorą udział w pracach międzynarodowych zespołów naukowych i normalizacyjnych, w tym przykładowo:

- Komitet Techniczny CEN TC 250/SC3: „Evolution Group Eurocode 3, Part 1-2” – M. Maślak, P. Woźniczka;
- Komitet Techniczny TC3 „Fire safety” przy ECCS (European Convention for Constructional Steel) – M. Maślak, P. Woźniczka;
- IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) – M. Maślak, dr inż. M. Pańtak.

Katedra współpracuje naukowo z profesorami: Luon Minh Chinh (Hanoi, Wietnam), Doncho Partowem (Sofia, Bułgaria), Hartmutem Pasternakiem (Cottbus, Niemcy), Martinem Mensingerem (Monachium, Niemcy).

4. Studenckie koła naukowe

W katedrze prężnie działają trzy studenckie koła naukowe, w tym w szczególności:

- Studenckie Koło Naukowe „Metalowcy” – opiekun: dr inż. Paulina Zajdel,
- Studenckie Koło Naukowe „Korniki” – opiekun: mgr inż. Klaudia Śliwa-Wieczorek,
- Studenckie Koło Naukowe Konstrukcji Mostowych – opiekun: dr inż. Mariusz Hebda.

Działalność każdego z tych kół ma zasięg co najmniej ogólnokrajowy, a w niektórych przypadkach nawet międzynarodowy.

Koło Naukowe Konstrukcji Metalowych



Rys. 1 Studenckie Koła Naukowe działające przy Katedrze L-3

Studenci będący ich członkami mogą pochwalić się wieloma prestiżowymi nagrodami zdobywanymi na konferencjach organizowanych przez różne uczelnie.

5. Oferta dla przemysłu

Pracownicy katedry mają w większości uprawnienia do prowadzenia działalności eksperckiej w pełnym zakresie. Mogą zatem opracowywać wszelkiego rodzaju projekty, ekspertyzy, a także opinie i orzeczenia naukowo-techniczne, zarówno w odniesieniu do diagnostyki obiektów już istniejących, jak i do weryfikacji konstrukcji przewidzianych do wykonania.

6. Podsumowanie

Program przedmiotów realizowanych w katedrze, zarówno tych dotyczących wznoszenia i użytkowania obiektów mostowych, jak i tych odniesionych do kształtowania konstrukcji stalowych i drewnianych, został opracowany w taki sposób, aby zapewnić słuchaczowi dostęp do szerokiej gamy nowoczesnych modeli obliczeniowych umożliwiających mu wiarygodną, na tyle na ile to możliwe, weryfikację stanu bezpieczeństwa gwarantowanego użytkownikowi różnego typu konstrukcji inżynierskich, o różnym przeznaczeniu, przewidzianych do pracy w zróżnicowanych, ale potencjalnie możliwych dla tych konstrukcji sytuacjach i scenariuszach projektowych. Chodzi nie tylko o to, aby nauczyć go w miarę bieglego i merytorycznie krytycznego poruszania się w coraz bardziej rozrastającym się formalnie gąszczu przepisów i rekomendacji normowych. Podstawowym celem kadry dydaktycznej wydaje się być bowiem najpierw rozbudzenie zainteresowania, a następnie, o ile to się uda, determinowany tym zainteresowaniem i odrobinę wspomagany przez nas trening wyobraźni. Mamy nadzieję, że owocem tego treningu będą w wielu przypadkach samodzielnie zaprojektowane i ukształtowane obiekty inżynierskie, o innowacyjnym charakterze, niekoniecznie typowe, a czasem być może nawet nieoczywiste w zastosowanych rozwiązaniach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Machowski A., Maślak M., Pazdanowski M. Local strength properties of steel bars as random functions, *Construction and Building Materials* 300, 2021, str. 124021
- [2] Song H., Ahmad A., Farooq F., Ostrowski K. A., Maślak M., Czarnecki S., Aslam F. Predicting the compressive strength of concrete with fly ash admixture using machine learning algorithms, *Construction and Building Materials* 308, 2021, str. 125021
- [3] Pańcikiewicz K., Maślak M., Pazdanowski M., Stankiewicz M., Zajdel P., Changes in the microstructure of selected structural alloy steel grades identified after their simulated exposure to fire temperature, *Case Studies in Construction Materials* 18, 2023, str. e01923
- [4] Woźniczka P., Critical temperature of laterally unrestrained steel plate girders with slender section, *Engineering Structures* 291, 2023, str. 116242,
- [5] Woźniczka P., Fire resistance and stability of non-uniformly heated steel plate girders with slender section, *Thin-Walled Structures* 203, 2024, str. 112234

Tradycja, innowacja, przyszłość – Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli L-4

Tradition, innovation, future – Chair of Building Design and Building Physics L-4

dr inż. Katarzyna Nowak (ORCID: 0000-0003-4902-4751), dr inż. Marcin Radoń (ORCID: 0000-0003-4439-0058), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1417

Streszczenie: W pierwszej części artykułu przedstawiono historię Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli wraz z jej rozwojem i zmianami. Część druga dotyczy szerokiej działalności naukowej pracowników katedry, zajmujących się m.in. problematyką budownictwa energooszczędnego, transportu ciepła przez przegrody budowlane, szczelnością powietrzną budynków i wykorzystaniem w budownictwie materiałów fazowo-zmiennych (PCM). Pracownicy katedry zajmują się także zagadnieniami akustycznymi, analizą budynków wielkopłytowych oraz zastosowaniem fotogrametrii i skaningu laserowego w dokumentowaniu i rekonstruowaniu obiektów zabytkowych. W tej części przedstawiono przykłady współpracy katedry z innymi ośrodkami naukowymi oraz firmami budowlanymi. W ostatniej części artykułu opisano osiągnięcia naukowe katedry na przykładzie wybranych dwóch prac doktorskich oraz opisano nowatorskie rozwiązanie Aktywnej Izolacji Termicznej (ATI).

Słowa kluczowe: fizyka budowli, materiały fazowo-zmienne, energooszczędność, fotogrametria.

Abstract: In the first part of the article the history of the Chair of Building Design and Building Physics, along with its development and changes, is presented. The second part concerns the broad scientific activity of the chair's employees, dealing with, among others, the issues of energy-efficient construction, heat transfer through building partitions, air tightness of buildings and the use of phase-change materials (PCM) in construction. The chair's staff also deals with acoustic issues, analysis of large-panel buildings and the use of photogrammetry and laser scanning in documenting and reconstructing historical objects. This part presents examples of cooperation between the chair and other research centers and construction companies. The last part of the article describes the scientific achievements of the chair using the example of two selected doctoral theses and describes the innovative solution of Active Thermal Insulation (ATI).

Keywords: building physics, phase-change materials, energy-efficiency, photogrammetry.

1. Wprowadzenie

Historia i rozwój Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli

Początki katedry sięgają 1945 roku, kiedy to w ramach Wydziału Inżynierii Lądowej i Wodnej utworzono Katedrę Budownictwa Ogólnego. Stało się to na podstawie rozporządzenia Ministra Oświaty z dnia 31.03.1947 r., z mocą działania od 01.04.1945 r. Kierownikiem katedry został prof. Wacław Nowakowski. Po przekształceniu w 1953 roku Wydziału Inżynierii Lądowej i Wodnej w dwa oddzielne wydziały, Katedra Budownictwa Ogólnego weszła w skład Wydziału Budownictwa Lądowego. Po prof. Nowakowskim kierownikami katedry byli kolejno: prof. Edward Komarnicki (1955–1956), prof. Stanisław Mielnicki (1956–1968) oraz doc. Józef Gładki (1968–1970). Do 1970 roku w Katedrze Budownictwa Ogólnego 9 osób uzyskało stopnie naukowe doktora nauk technicznych oraz 3 osoby stopień naukowy doktora habilitowanego (E. Moj – 1965 r., Z. Pieniążek – 1966 r., J. Gładki – 1967 r.).

W 1970 roku, po przejściu uczelni na strukturę instytutową, Katedra Budownictwa Ogólnego została podzielona

między Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, do którego został włączony Zespół Budownictwa Przemysłowego i Zakład Materiałów Budowlanych oraz Instytut Technologii i Organizacji Budownictwa, który przejął Zakład Budownictwa Ogólnego i Zakład Fizyki Budowli. Kierownikiem Zakładu Budownictwa Ogólnego był prof. dr hab. inż. arch. Eryk Moj (w latach 1970–1990), a kierownikiem Zakładu Fizyki Budowli prof. dr hab. inż. Zbigniew Pieniążek (w latach 1979–1992). W latach 1976–1991 stopnie naukowe doktora nauk technicznych uzyskało w katedrze 7 osób [1].

Uchwałą Rady Wydziału Budownictwa Lądowego z 27.11.1991 r. został powołany Zakład Budownictwa Ogólnego i Przemysłowego w Instytucie Materiałów i Konstrukcji Budowlanych. 24.06.2009 r. na mocy uchwały Rady Wydziału Inżynierii Lądowej nastąpiła zmiana nazwy na Zakład Budownictwa i Fizyki Budowli. W 2020 roku, po zmianie struktury wydziału i likwidacji instytutów, nastąpiła kolejna zmiana nazwy na Katedrę Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli. Kierownikami katedry/zakładu byli kolejno: prof. dr hab. inż. Antoni Stachowicz (27.11.1991 r. – 31.08.2006 r.), dr hab.

inż. Wiesław Ligęza, prof. PK (01.09.2006–31.12.2009), dr hab. inż. Tomasz Kisilewicz, prof. PK (od 01.01.2010 r. do 2021 r.), dr inż. Katarzyna Nowak (od 2021 r.). Od 1991 roku stopnie naukowe doktora nauk technicznych uzyskało w katedrze 19 osób, a stopnie naukowe doktora habilitowanego 3 osoby (W. Ligęza – 2001 r., T. Kisilewicz – 2009 r., A. Kłosak – 2020 r.).

2. Działalność naukowa i współpraca z przemysłem Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli

Obszar badawczy pracowników Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli jest bardzo szeroki i zróżnicowany. Pracownicy katedry zawsze propagowali ideę racjonalnego i oszczędnego budownictwa, ze szczególnym akcentem na ochronę energii. Dużo uwagi poświęca się diagnostyce termicznej budynków, zarówno w skali niewielkich próbek, jak i całych przegród w komorze klimatycznej, a także rozbudowanym badaniom budynków in-situ. Szczególne miejsce zajmują badania termowizyjne. Oprócz badań doświadczalnych realizowane są komputerowe symulacje termiczne elementów, przegród i całych budynków.

Bierne pozyskiwanie energii słonecznej wiąże się z zagadnieniami dynamicznego transportu ciepła przez przegrody budowlane. Szczególny aspekt właściwości dynamicznych budynków to bierna ochrona przed przegrzewaniem przy użyciu masy termicznej budynku, stanowiąca alternatywę dla mechanicznego chłodzenia. Z tym wiąże się analizy symulacyjne oraz badania komfortu cieplnego we wnętrzach budynków mieszkalnych oraz użyteczności publicznej. W katedrze prowadzone są również badania szczelności powietrznej budynków i jej wpływu na zapotrzebowanie energetyczne budynków. Naturalną kontynuacją badań związanych z komfortem cieplnym są prace związane z wykorzystaniem w budownictwie materiałów fazowo-zmiennych. W pracy doktorskiej A. Zastawnej-Rumin [2] zostały sprecyzowane zasady właściwego doboru materiałów fazowo-zmiennych oraz ich stosowania w budynkach niskoenergetycznych w polskich warunkach klimatycznych. Opierając się na szczegółowej analizie wyników badań doświadczalnych przegród budowlanych oraz obliczeń symulacyjnych, przedstawiono zasady praktycznego wykorzystania materiałów fazowo-zmiennych, jak również zaproponowano uproszczony algorytm doboru PCM.

Katedra współpracuje z University of Porto i Ryerson University w Toronto w projekcie „E-mobilność oraz zrównoważone materiały i technologie”, Program Akademickie Partnerstwa Międzynarodowe finansowany przez NAWA. W ramach NAWA katedra współpracuje również z Velammal College of Engineering and Technology w Madurai Tamil Nadu (Indie). Celem współpracy jest projekt, badania oraz zastosowanie lekkich betonowych paneli ściennych zawierających materiał fazowo-zmienny (PCM).

W katedrze prowadzone są prace obejmujące zagadnienia z architektury oraz szeroko rozumianego budownictwa ogólnego. Do nich należy analiza budynków wielkopłytowych pod kątem wpływu ukrytych wad wykonawczych na bezpieczeństwo eksploatacyjne budynków oraz ocena stanu technicznego i stopnia zużycia takich budynków wraz z możliwościami ich modernizacji. Pracownicy brali udział w projekcie dotyczącym rewitalizacji osiedla Ruczaj-Zaborze (porozumienie JM rektora PK i prezydenta Gminy Miejskiej Kraków). Prace badawcze dotyczą także projektowania i analizy sposobu funkcjonowania oraz uszkodzeń stropodachów, izolowanych termicznie dachów i tarasów, a także trwałości, bezpieczeństwa użytkowania i izolacyjności termicznej fasad budynków, w tym szczególnie wentylowanych fasad kamiennych. Katedra współpracuje z firmą DOHAL przy opracowaniu ulepszonej technologii montażu fasad wentylowanych, mocowanych do budynków nowych i istniejących oraz z firmą KROE sp. z o.o. w zakresie opracowania innowacyjnych mocowań punktowych do montażu płyt elewacyjnych z betonu GRC.

Dr Aleksander Byrdy jest autorem patentu kotew izolacyjnych [3]. Istotą rozwiązania jest zastosowanie kompozytowej kotwy stalowo-tworzywowej, stanowiącej zamiennik stosowanych powszechnie zamocowań metalowych okładzin elewacji wentylowanych. Opatentowane zakotwienie składa się z części zewnętrznej ze stali nierdzewnej połączonej z częścią wewnętrzną z tworzywa o wysokiej wytrzymałości i niskiej przewodności cieplnej. Takie rozwiązanie może znacznie zredukować straty ciepłe w budynku, obniżyć grubość termoizolacji i w konsekwencji pozwoli zwiększyć powierzchnię użytkową w budynkach.

Pracownicy katedry współpracują z firmą Eurostyl sp. z o.o. w ramach opracowania innowacyjnego drewniano-aluminiowego okna EVD SASH o polepszonej trwałości, odporności na korozję biologiczną oraz z przedsiębiorstwem Balkon Plus sp. z o.o. przy opracowaniu technologii produkcji prefabrykowanych balkonów oraz logii przeznaczonych dla budynków wielorodzinnych. Współpraca z firmą SURMA SYSTEMS sp. z o.o. obejmuje opracowanie nowoczesnej technologii produkcji pergol przy zastosowaniu tworzyw sztucznych z recyklingu oraz automatycznie sterowanych lameli fotowoltaicznych.

W katedrze analizowane są także zagadnienia akustyczne: ocena wpływu kształtu na komfort akustyczny sal koncertowych oraz prognozowanie właściwości akustycznych wnętrz muzycznych oraz przeznaczonych dla mowy z wykorzystaniem symulacji komputerowych oraz modeli tych wnętrz. Badania obejmują wpływ kształtu powierzchni wykończeniowych na rozproszenie dźwięku, wpływ stopnia rozproszenia dźwięku na czas pogłosu, wpływ ukształtowania sceny i jej otoczenia na wzajemną słyszalność pomiędzy muzykami itp. Dzięki współpracy z projektantami tych obiektów oraz generalnymi wykonawcami wyniki prognoz są porównywane do późniejszych pomiarów

w zrealizowanych już wnętrzach. Prof. A. Kłosak od wielu lat współpracuje z zakładem akustyki uniwersytetu technicznego DTU w Lyngby pod Kopenhagą. Pracownicy katedry uczestniczyli w projekcie NCBiR „Innowacyjna okładzina oparta na metamateriałach zwiększająca dźwiękoizolacyjność przegród poprzez redukcję pasm rezonansowych” oraz w projekcie „Wykonanie badań oraz analiza wpływu stopnia perforacji i sposobu montażu płyt gipsowo-kartonowych na pochłanianie dźwięku”.

W katedrze pracownicy zajmują się także zastosowaniem fotogrametrii i skaningu laserowego w dokumentowaniu, rekonstruowaniu i zabezpieczaniu relikwów dziedzictwa narodowego, w tym obiektów UNESCO. Wymienione narzędzia wykorzystuje się w diagnostyce konstrukcji budynków do ich monitorowania, oceny bezpieczeństwa oraz oceny żywotności oraz w badaniach związanych z destrukcją termiczną i wilgotnością obiektów.

Przy współpracy z Uniwersytetem Jagiellońskim dr Ł. Łukaszewski uczestniczy w pracach badawczych nad Wzgórzem Zamkowym w Cieszynie oraz w badaniach Grodu Piastowskiego w Gieczu. Wraz z UJ prowadzone są prace badawcze na Zamku Królewskim na Wawelu – Kolekcje Lapidarium. Dr Ł. Łukaszewski brał także udział w Projekcie Dziedzictwa „Wiślica pradziejowa. Śladami najdawniejszych cywilizacji i kultur dziejów chrześcijaństwa europejskiego i budowy państwa pierwszych Piastów na ziemiach Polski Południowej”.

W ramach projektu „Konkurs TRL+” Inkubator Innowacyjności pracownicy katedry uczestniczyli

Rys. 1. Zdjęcie termowizyjne pracowników Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli

w projektach badawczych „Opracowanie technologii formowania materiału termoizolacyjnego na bazie odpadowych wiórków drewnianych” oraz „Opracowanie technologii zahamowania wzrostu mikroorganizmu stanowiącego podstawę materiału termoizolacyjnego na bazie wiórków drewnianych”.

3. Osiągnięcia naukowe Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli i ich wpływ na rozwój budownictwa

Przykładem rozprawy doktorskiej realizowanej przez pracownika Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli jest praca dr. K. Neringa, dotycząca wpływu drgań i hałasu

na mieszkańców budynku [4]. W rozprawie zwrócono uwagę na jednoczesne oddziaływanie drgań i hałasu na komfort mieszkańców budynków. Dotychczasowe normy często rozdzielnie traktują hałas i drgania, nie uwzględniając w pełni ich synergicznego wpływu na ludzi. Celem pracy było opracowanie metody kompleksowej oceny klimatu wibroakustycznego w pomieszczeniach oraz analiza możliwości przewidywania hałasu na podstawie poziomu drgań. W tym celu przeprowadzono pomiary in situ w różnych lokalizacjach i warunkach, m.in. dla przejazdów tramwajów, pociągów i uderzeń od maszyn. Równolegle wykonano modelowanie komputerowe, zarówno uproszczone (m.in. metodą Kurzweila), jak i zaawansowane (MES), które posłużyły do wsparcia interpretacji pomiarów i kalibracji modeli predykcyjnych.

Na podstawie wyników badań autor zaproponował nowy wskaźnik oceny – całkowity poziom uciążliwości (ψ_{tot}), który uwzględnia zarówno hałas (ψ_n), jak i drgania (ψ_v) oraz ich wzajemne oddziaływanie. Analiza wykazała, że łączna ocena tych bodźców daje pełniejszy obraz komfortu użytkowników, ponieważ w wielu przypadkach wartości hałasu i drgań z osobna mieściły się w normach, natomiast ich suma przekraczała dopuszczalne progi komfortu.

Drugim przykładem pracy doktorskiej realizowanej w katedrze jest wyróżniona praca dr. M. Kołaczewskiego „Optymalizacja topologii konstrukcji tarczowych ze względu

na minimum przemieszczenia” [5]. Minimalizacja maksymalnego przemieszczenia konstrukcji będącej continuum materialnym stanowi dotychczas nierozwiązany problem. Główna uwaga w światowej literaturze dotyczącej optymalizacji topologii skupiona jest na zagadnieniu minimalizacji podatności, czyli maksymalizacji globalnej sztywności konstrukcji. Z punktu widzenia projektantów konstrukcji, funkcja celu w postaci minimum

maksymalnego przemieszczenia często jednak stanowi bardziej pożądane założenie.

W pracy autor przeprowadził analizę na bazie konstrukcji powierzchniowych w płaskim stanie naprężenia (tarcze), jednak poruszane problemy są uniwersalne i dotyczą również konstrukcji brylowych. W ramach pracy opracowano autorską metodę MWD (Method of Weighted Displacements), pozwalającą na uzyskanie topologii konstrukcji charakteryzującej się korzystniejszym wynikiem maksymalnego przemieszczenia niż przy standardowym podejściu w postaci minimalizacji podatności. W pracy znajdują



się przykłady porównawczych optymalizacji przy różnych założeniach, na bazie tarcz o zróżnicowanych schematach statycznych. Porównano wyniki uzyskane przy trzech funkcjach celu, jakimi są: minimalizacja podatności, minimalizacja maksymalnego przemieszczenia w sposób bezpośredni oraz minimalizacja maksymalnego przemieszczenia przy pomocy autorskiej metody MWD. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o autorski program w środowisku MATLAB. Obliczenia prowadzono na bazie MES, stosując jeden z najbardziej uznanych sposobów optymalizacji topologii – metodę SIMP. W pracy analizowano zagadnienie niezależności rozwiązania od gęstości siatki elementów skończonych oraz problem wpływu topologii początkowej na wynik optymalizacji. Przedstawiono przykład zastosowania optymalizacji topologii w innowacyjnym projekcie kotwy z tworzywa sztucznego, opracowanej w zespole katedry. Porównano wyniki optymalizacji otrzymane w pracy z wynikami literaturowymi, wykazując większą skuteczność proponowanej w pracy metody MWD.

Innowacyjnym rozwiązaniem, mogącym mieć wpływ na rozwój budownictwa, jest Aktywna Izolacja Termiczna (ATI), którą zajmuje się w swoich pracach prof. T. Kisilewicz. Projektanci budynków niskoenergetycznych kierują się zasadami minimalizacji strat ciepła i maksymalizacji zysków energetycznych. Najczęściej obie części bilansu energetycznego budynków są sztucznie rozdzielane, co może skutkować niską sprawnością finalnego produktu. Aktywna Izolacja Termiczna (ATI) łączy w jednym systemie redukcję strat ciepła i efektywne wykorzystanie darmowej energii odnawialnej. Zasada jej działania polega na wytworzeniu w zewnętrznej powłoce budynku płaszczyzny o temperaturze znacznie wyższej od temperatury otoczenia zewnętrznego i jednocześnie niższej od temperatury w pomieszczeniu. W takich warunkach gradient temperatury powodujący przepływ ciepła z wnętrza budynku ulega zmniejszeniu, co powoduje obniżenie strat ciepła z pomieszczenia.

W praktyce aktywna izolacja przybiera postać węzownicy z tworzywa sztucznego, zatopionej np. w kilkucentymetrowej warstwie dobrze przewodzącego betonu. Ciepłe medium krąży w węzownicy w sposób wymuszony, przenosząc do ściany energię zmagazynowaną w trakcie lata np. w izolowanym wymienniku gruntowym. O ile magazynowanie energii w gruncie jest od dawna przedmiotem badań, o tyle bezpośrednie użycie niskotemperaturowego źródła energii w przegrodzie budynku jest spotykane bardzo rzadko. Znakomitym i trudnym do wyczerpania źródłem energii dla aktywnej izolacji może być woda powrotna odprowadzana do gruntu w instalacji geotermalnej lub woda kopalniana. Kluczowym efektem energetycznym i ekonomicznym ATI jest to, że system ten bezpośrednio wykorzystuje odnawialne źródła ciepła o niskiej energii,

które są praktycznie bezużyteczne bez dodatkowej konwersji (np. przy użyciu pompy ciepła i związanych z tym nakładów energii i kosztów). Niewielka ilość energii nieodnawialnej jest potrzebna tylko do uruchomienia pompy obiegowej w węzownikach.

Bardzo obszerne wyniki pomiarów terenowych, do których mają dostęp pracownicy katedry, zostały zebrane w doświadczalnym budynku położonym na Węgrzech. Projektant tego obiektu, T. Barkanyi, wykazał, że zastosowanie ATI może zmniejszyć straty ciepła przez nieprzezroczystą obudowę budynku nawet o 60% w sezonie grzewczym. Badania zrealizowane w Polsce potwierdzają możliwość uzyskania podobnych efektów. Aktualnie prowadzone są prace symulacyjne zmierzające do wskazania korzystnego doboru materiałów i układu warstw w przegrodzie z ATI oraz badania w komorze klimatycznej do oceny wpływu warunków przepływu medium na sprawność jej działania. Prace badawcze mają na celu przygotowanie procedur i rozwiązań, które mogą być wykorzystane w powszechnej praktyce projektowej.

4. Podsumowanie

Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli prowadzi interdyscyplinarne badania obejmujące kluczowe obszary współczesnego budownictwa, takie jak ochrona cieplna, akustyka budowlana oraz rozwój nowoczesnych materiałów i technologii. Wśród innowacyjnych rozwiązań będących przedmiotem badań zespołu katedry znajdują się m.in. kotwy izolacyjne, koncepcja Aktywnej Izolacji Termicznej (ATI), a także badania nad zastosowaniem materiałów fazowo-zmiennych (PCM) w konstrukcjach budowlanych. Zespół katedry aktywnie rozwija także metody diagnostyczne i dokumentacyjne, wykorzystując nowoczesne narzędzia takie jak fotogrametria i skaning laserowy w ochronie dziedzictwa architektonicznego. Prowadzone są również analizy konstrukcyjne budynków wielkopłytowych. Katedra współpracuje z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi oraz przemysłem, co przekłada się na wdrożenia praktyczne i rozwój nowatorskich technologii.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki – 1945/1995 pod redakcją prof. W. Muszyńskiego, Kraków, 1995
- [2] Zastawna-Rumin A., Analiza efektywności stosowania materiałów fazowo-zmiennych w przegrodach polskich budynków niskoenergetycznych, praca doktorska 2018, Politechnika Krakowska
- [3] Kotwie izolacyjne do mocowania okładzin elewacyjnych budynków, patent, Aleksander Byrdy, Mariusz Majka, Krzysztof Pielichowski, Politechnika Krakowska, nr patentu 243713 oraz 243714
- [4] Nering K., Analiza wpływu drgań i hałasu na mieszkańców budynku, praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2020
- [5] Kołaczkowski M. Optymalizacja topologii konstrukcji tarczowych ze względu na minimum przemieszczenia, praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2021

Rola badań w rozwoju infrastruktury drogowej i kolejowej w Polsce – Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu L-5

The role of research in the development of road and rail infrastructure in Poland
– Chair of Roads, Railways and Traffic Engineering L-5

prof. dr hab. inż. Stanisław Gaca (ORCID: 0000-0002-1757-6984), dr hab. inż. Mariusz Kieć, prof. PK (ORCID: 0000-0001-9193-7269), dr hab. Piotr Kozioł, prof. PK (ORCID: 0000-0001-9685-1923), dr hab. inż. Juliusz Sołkowski, prof. PK (ORCID: 0000-0001-5393-5334), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1418

Streszczenie: W artykule przedstawiono krótko zarys historii i rozwoju Katedry Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu Politechniki Krakowskiej od początku jej powstania w 1945 roku. Główna część artykułu prezentuje działalność naukowo-badawczą i współpracę z przemysłem realizowaną w ostatnich 10 latach z uwzględnieniem infrastruktury drogowej i kolejowej. Przedstawiono również najważniejsze osiągnięcie naukowe i praktyczne, jakim jest stworzenie bazy do rozwoju nowych przepisów i rekomendacji projektowania infrastruktury drogowej oraz zarządzania ruchem.

Słowa kluczowe: Infrastruktura drogowa, infrastruktura kolejowa, inżynieria ruchu, bezpieczeństwo ruchu, nawierzchnia.

Abstract: The article briefly outlines the history and development of the Chair of Roads, Railways and Traffic Engineering, Krakow University of Technology, since its establishment in 1945. The main part of the article presents the scientific and research activities and collaborations with industry that have been carried out in the last 10 years, considering road and rail infrastructure. It also presents the most important scientific and practical achievement, which is the creation of a base for the development of new regulations and recommendations for the design of road infrastructure and traffic management.

Keywords: Road infrastructure, railway infrastructure, traffic engineering, traffic safety, pavement.

1. Wprowadzenie

Budowa, rozwój i eksploatacja sprawnej, bezpiecznej i przyjaznej środowisku infrastruktury transportowej jest jednym z ważniejszych, wyzwań nauki i techniki. Infrastruktura charakteryzuje się wysokimi kosztami realizacji, trwałością oraz dużą ingerencją w otaczającą przestrzeń, dlatego powinna odpowiadać zarówno obecnym, jak i przyszłym oczekiwaniom społecznym i technologicznym, stając się czynnikiem rozwoju społeczno-gospodarczego regionów i kraju jako całości. W te oczekiwania wpisuje się działalność naukowo-badawcza, ekspercka i dydaktyczna Katedry Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu (KDKiR), gdzie od wielu lat rozwijana jest wiedza w zakresie planowania, projektowania i eksploatacji infrastruktury drogowej i kolejowej oraz oceny jej wpływu na otoczenie.

W ostatnich latach szczególny nacisk kładzie się na bardziej efektywne wykorzystywanie istniejącej infrastruktury, m.in. poprzez: wykorzystanie nowych technologii w zakresie zbierania i analizy danych oraz prowadzenia badań, wdrażanie inteligentnych systemów transportowych. Przyczynia się do redukcji kosztów, poprawy bezpieczeństwa, efektywnej

eksploatacji infrastruktury oraz ograniczenia negatywnego wpływu transportu na środowisko.

Współczesne podejście do projektowania infrastruktury drogowej i kolejowej łączy doświadczenia przeszłości z proaktywnym kreowaniem przyszłości z uwzględnieniem rozwoju technologicznego. Coraz większą rolę odgrywa planowanie zorientowane na przewidywanie kierunków rozwoju społeczno-gospodarczego, automatyzację transportu, wykorzystanie nowych technologii, metod sztucznej inteligencji, trwałość konstrukcji, a także integrację dróg z przestrzenią publiczną i środowiskiem. W artykule przedstawiono zakres działalności KDKiR Politechniki Krakowskiej wraz najważniejszymi osiągnięciami z ostatnich lat.

2. Historia i rozwój Katedry Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu

Historia Katedry Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu rozpoczyna się w roku 1945, kiedy to powołano Wydział Architektury, Inżynierii i Komunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie jako załączka Politechniki Krakowskiej. Częścią tego wydziału były Katedra Budowy Dróg i Katedra Budowy

Kolei. Początki działalności obydwóch katedr związane były głównie z działalnością dydaktyczną. Wraz z rozwojem kadry i zaplecza badawczego rozwijana była także działalność badawcza związana głównie z potrzebami budownictwa drogowego i kolejowego. W kolejnych latach zmieniała się struktura organizacyjna PK i jej wydziałów, i tak w ramach powstałego w 1953 roku Wydziału Budownictwa Lądowego działało 10 katedr, wśród których była Katedra Budowy Dróg i Ulic oraz Katedra Budowy Dróg Żelaznych. Katedry te w kolejnych latach wypracowywały swoje profile zawodowe i badawcze, przechodząc przez różne zmiany organizacyjne, w tym zmiany nazw. Istotnymi wydarzeniami było poszerzenie z końcem lat 60. ubiegłego wieku kształcenia i badań naukowych o problematykę inżynierii ruchu, a od lat 80. także o zagadnienia ochrony środowiska w budownictwie drogowym i kolejowym oraz problematykę bezpieczeństwa ruchu drogowego (brd). W całym okresie swojej działalności wspomniane katedry prowadziły intensywną współpracę z jednostkami gospodarki narodowej i administracji, a także z zagranicznymi ośrodkami naukowo-badawczymi. W roku 2019 nastąpiło połączenie Katedry Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu z Katedrą Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego w jedną Katedrę Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu, która kontynuuje dotychczasowe nurty badań związanych z geometrycznym kształtowaniem elementów dróg samochodowych i kolejowych, technologią ich budowy, inżynierią ruchu drogowego i kolejowego, ochroną środowiska w budownictwie drogowym i kolejowym oraz bezpieczeństwem ruchu drogowego.

3. Działalność naukowo-badawcza i współpraca z otoczeniem przemysłowym

Główne obszary badawcze realizowane w KDKiR prowadzone są od wielu lat w sposób kompleksowy i obejmują prace związane z rozwojem metod i/lub badań:

- projektowania geometrycznego infrastruktury drogowej (odcinków dróg, skrzyżowań, węzłów, infrastruktury dla ruchu pieszego i rowerowego);
- ocen i analiz brd, w tym rozwoju metod oceny brd na podstawie miar pośrednich, ze szczególnym uwzględnieniem niechronionych użytkowników dróg oraz nowych technologii i metod badawczych;
- ocen warunków ruchu oraz badań przepustowości odcinków dróg i skrzyżowań drogowych z uwzględnieniem pieszych i autonomiczności, realizowanych ze wsparciem metod mikrosymulacyjnych;
- metod wykonywania ocen oddziaływania dróg na środowisko oraz oceny wpływu infrastruktury drogowej i kolejowej na otoczenie infrastruktury transportowej;
- technologii materiałów i nawierzchni drogowych z uwzględnieniem materiałów odpadowych;
- mechaniki układów warstwowych nawierzchni bitumicznych;

- nieniszczących ocen i analiz materiałów budowlanych oraz konstrukcji nawierzchni, w tym bezkontaktowe metody pomiaru deformacji materiałów i konstrukcji budowlanych;
- diagnostyki oraz funkcjonowania dróg szynowych (kolejowych i tramwajowych);
- oddziaływań dynamicznych i termicznych, które występują przy eksploatacji infrastruktury szynowej, w tym elementów sprężystych stosowanych w nawierzchniach szynowych (poliuretany) z punktu widzenia ich przydatności do praktycznego stosowania;
- zarządzania infrastrukturą transportową (*Asset Management*).

Zakres prac badawczych wpisuje się w bieżące i przyszłe potrzeby drogownictwa i kolejnictwa, czego efektem jest ścisła współpraca z: instytucjami centralnymi przy opracowywaniu wytycznych, metod obliczeniowych, instrukcji i zaleceń projektowych oraz eksploatacyjnych w zakresie infrastruktury drogowej i kolejowej; administracją lokalną przy wykonywaniu analiz i opracowywaniu programów poprawy sprawności sieci drogowej i kolejowej; lokalnymi zarządcami i biurami projektów przy wykonywaniu badań empirycznych, ekspertyz i projektowaniu nowych lub modernizowanych elementów infrastruktury drogowej i kolejowej, a także w zakresie zarządzania ruchem.

Obecne priorytety badawcze w KDKiR stanowią odpowiedź na zapotrzebowanie środowiska drogowego i kolejowego w Polsce, jak też wpisanie się w identyfikowane zagraniczne trendy badawcze w zakresie następujących zagadnień:

- utrzymania i zarządzania siecią drogową w sposób kompleksowy, ze szczególnym uwzględnieniem stanu istniejącej infrastruktury drogowej, zmienności ruchu, stanu bezpieczeństwa ruchu i oddziaływania ruchu na środowisko;
- diagnostyki kolejowej, utrzymania bieżącego i predyktoryjnego, wraz z istotnymi w kontekście obronności i bezpieczeństwa problemami zabezpieczenia infrastruktury krytycznej oraz jej obsługi cybernetycznej, rozpoznaniem poziomów bezpieczeństwa funkcjonujących systemów transportowych oraz zapewnieniem właściwego funkcjonowania transportu kolejowego;
- rozwoju nowych technologii wykorzystywanych do identyfikacji stanu utrzymania infrastruktury, opartych na obserwacji i pomiarach prowadzonych z użyciem bezzałogowych systemów powietrznych, jako wsparcie dla „asset management”;
- oceny efektywności funkcjonowania infrastruktury drogowej z wykorzystaniem nowych źródeł danych, narzędzi sztucznej inteligencji i danych masowych;
- rozwoju metod analiz warunków ruchu i zmian zachowań komunikacyjnych, wyboru środków transportu oraz wpływu autonomiczności i nowych technologii w ruchu na funkcjonowanie i projektowanie infrastruktury drogowej;
- analizy termo-mechanicznej materiałów, w tym geosyntetyków oraz elementów konstrukcji budowlanych i konstrukcji nawierzchni dróg;

- mechaniki toru bezстыkowego;
- niekonwencjonalnego wykorzystania dróg szynowych.

4. Współpraca krajowa i międzynarodowa w zakresie badań

KDKiR od wielu lat aktywnie bierze udział w wielu inicjatywach i programach związanych z prowadzeniem badań, które obejmują m.in.: inicjowanie i realizację grantów NCBiR, udział w projektach międzynarodowych, realizację prac badawczo-wdrożeniowych finansowanych przez administrację drogową (GDDKiA), kolejową (PKP PLK SA) oraz samorządową, udział w konferencjach naukowych w kraju i za granicą oraz udział w konferencjach naukowo-technicznych; organizację lub współorganizację konferencji naukowych w polach prowadzonych badań. Wyżej wymienione prace realizowane są przy współpracy z innymi wyższymi uczelniami zarówno krajowymi, jak i zagranicznymi.

W ostatnich latach zacieśniono współpracę z ośrodkami krajowymi (Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Instytut Kolejnictwa, Politechnika Gdańska, Warszawska, Wrocławska, Rzeszowska, Białostocka, Lubelska) oraz zagranicznymi uniwersytetami i instytucjami naukowymi z Niemiec, Włoch, Węgier, Czech, Słowacji, Portugalii i Norwegii w zakresie wspólnej realizacji programów badawczych i działań związanych z pozyskiwaniem grantów.

Rozwój współpracy międzynarodowej pracowników katedry obejmuje ich udział w pracach międzynarodowych organizacji i stowarzyszeń drogowych, takich jak FGSV i PIARC.

5. Współpraca z otoczeniem gospodarczym

W zakresie współpracy z otoczeniem gospodarczym w katedrze każdego roku realizowanych jest kilkadziesiąt prac o charakterze wdrożeniowym, eksperckim i opiniotwórczym, a także badawczo-rozwojowym. Zagadnienia poruszane w tych pracach dotyczą: analiz brd, badań ruchu drogowego, oceny funkcjonowania infrastruktury drogowej wraz z zaleceniami ich usprawnień, rozwoju modeli ruchu z ich zastosowaniem do ocen sprawności, kosztów i brd, projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych, projektowania i optymalizacji składów mieszanek mineralno-asfaltowych, oceny wpływu infrastruktury transportowej na środowisko, obiektów mostowych i interakcji z torem bezстыkowym, przejazdów kolejowo-drogowych, obliczeń wytrzymałości toru oraz nośności podłoża kolejowego przy modernizacjach linii kolejowych, a także własności materiałów sprężystych (np. poliuretany) wykorzystywanych w konstrukcji toru kolejowego.

Katedra posiada własne laboratoria (inżynierii ruchu drogowego, materiałów i nawierzchni drogowych, inżynierii ruchu kolejowego), w których realizuje badania ruchu, środowiskowe oraz badania własności mechanicznych materiałów drogowych i kolejowych.

Katedra prowadzi kształcenie ustawiczne, na które składają się: studia podyplomowe w zakresie inżynierii ruchu drogowego, projektowania dróg samochodowych oraz dróg szynowych; kursy audytu brd oraz szkolenia w zakresie drogownictwa i kolejnictwa realizowane zarówno w sposób cykliczny, jak i na zamówienie zainteresowanych instytucji.

6. Udział w grantach i programach badawczych

KDKiR aktywnie uczestniczyła i uczestniczy w wielu projektach badawczych i rozwojowych, finansowanych ze środków na naukę oraz przez instytucje państwowe i samorządowe, przyczyniając się do rozwoju drogownictwa i kolejnictwa w Polsce, do których można zaliczyć projekty realizowane w latach 2016–2024 dla Ministerstwa Infrastruktury (MI):

- Badania skuteczności środków zarządzania prędkością, Wytyczne zarządzania prędkością na drogach samorządowych;
- Analiza jakości technicznej projektów drogowych współfinansowanych z funduszy Unii Europejskiej wraz z rekomendacjami optymalizacji i szczegółowymi warunkami technicznymi projektowania, realizacji, eksploatacji i utrzymania dróg publicznych.

Projekty Narodowego Centrum Badań i Rozwoju:

- Nowoczesne metody obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu dla dróg poza aglomeracjami miejskimi, w tym dla dróg szybkiego ruchu (RID);
 - Ochrona przed hałasem drogowym (RID);
 - Efektywność przekroju 2+1 pasowego ze szczególnym uwzględnieniem różnych rozwiązań rozdzielających kierunki ruchu (RID);
 - Oznakowanie eksperymentalne dróg w aspekcie zachowań uczestników ruchu (RID);
 - PROBRD – PROaktywny system wsparcia zarządzania Bezpieczeństwem Ruchu Drogowego, w oparciu o dane pozyskane przez bezzałogowe statki latające, POIR;
 - System automatycznego ważenia pojazdów w ruchu WIM-PL, Gospostrateg IX;
 - VIBRONOI – Nowe rozwiązanie podkładki podpodkładowej i tłumika szynowego do ochrony otoczenia drogi szynowej przed drganiami i hałasem (POIR) oraz finansowanego z funduszy norweskich projektu SMART – Sustainable Maintenance and Rehabilitation of Railway Track.
- Obecnie w KDKiR realizowane są projekty badawcze programów FENG oraz RID2:
- Ciągły geometrycznie światłowodowy czujnik temperatury, odkształceń i kształtu;
 - Opracowanie systemu zasilania modeli transportowych zbiorami danych z sieci komórkowej;
 - Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania.

Rys. 1. Struktura wymagań technicznych w drogownictwie [1]



7. Najważniejsze osiągnięcie naukowe i ich wpływ na rozwój drogownictwa

Do najważniejszych osiągnięć badawczych KDKiR można zaliczyć stworzenie bazy do rozwoju nowych przepisów i rekomendacji projektowania infrastruktury drogowej oraz zarządzania ruchem, w tym:

- identyfikację wpływu różnych charakterystyk geometrycznych i organizacji ruchu na bezpieczeństwo ruchu wraz z ilościowym opisem tego bezpieczeństwa wskazujących na konieczność zmian dotychczasowych zasad i zaleceń projektowania infrastruktury;
- rozwój metod oceny i narzędzi zarządzania prędkością, które przyczyniają się do zmiany zachowań kierujących i w efekcie do obniżenia kosztów wypadków;
- ocenę wpływu wprowadzenia oznakowania eksperymentalnego, jako nisko kosztowego środka poprawy bezpieczeństwa i warunków ruchu drogowego;
- rozwój metod szacowania przepustowości dróg i skrzyżowań, w tym wprowadzenie ujęcia niezawodnościowego do metod oceny ruchu, wynikającego z występowania losowych zakłóceń w ruchu, wpływających na sprawność funkcjonowania infrastruktury;
- kompleksowe podejście do ochrony otoczenia dróg przed hałasem poprzez łączenie rozwiązań urbanistycznych, konstrukcji nawierzchni, wysokościowego kształtowania dróg, lokalizacji i rozmieszczenia zabudowy, zarządzania ruchem i fizycznych przegród.

Osiągnięciem praktycznym jest wypracowanie we współpracy z autorami z innych jednostek badawczych grupy dokumentów przeznaczonych do właściwego planowania, projektowania i eksploatacji infrastruktury drogowej oraz zarządzania ruchem. Są to:

- wzorce i standardy zastępujące dotychczasowe dokumenty projektowania i zalecane przez MI do stosowania przy projektowaniu i eksploatacji dróg publicznych [1];
- wytyczne wdrażania zarządzania prędkością jako środka poprawy brd na drogach samorządowych – rekomendowane do stosowania przez Krajową Radę BRD;
- wytyczne wdrażania oznakowania eksperymentalnego

regulujące zasady dopuszczenia do pilotażowych wdrożeń oraz monitorowania ich wpływu na brd i warunki ruchu;

- wytyczne obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu dróg jednojezdniowych.

Wzorce i standardy [1] są elementem nowej struktury przepisów (rys. 1) zorientowanych na budowę bardziej sprawnej, bezpiecznej i innowacyjnej infrastruktury drogowej, przy równoczesnej racjonalizacji kosztów. Opracowanie [1] podaje rozwiązania bardziej dostosowane do aktualnych potrzeb i zmieniających się oczekiwań społeczno-gospodarczych. Zmiana struktury przepisów ułatwia lepsze dostosowanie do specyfiki lokalnych uwarunkowań oraz wdrażanie rozwiązań innowacyjnych obecnie i w przyszłości.

8. Podsumowanie

Działalność naukowo-badawcza, ekspercka i dydaktyczna KDKiR, od lat obejmuje zagadnienia związane z budową, rozwojem i eksploatacją sprawnej, bezpiecznej i przyjaznej środowisku infrastruktury drogowej i kolejowej oraz oceny jej wpływu na otoczenie. Realizowane badania, prace eksperckie i działalność dydaktyczna związane z funkcjonowaniem infrastruktury transportowej odpowiadają zarówno obecnym, jak i przyszłym oczekiwaniom społecznym i technologicznym, głównie przez wykorzystanie nowych technologii w zakresie zbierania i analizy danych oraz prowadzenia badań. W rozwoju kierunków badawczych KDKiR coraz większą rolę odgrywa planowanie zorientowane na przewidywanie kierunków rozwoju społeczno-gospodarczego, automatyzację transportu, wykorzystanie nowych technologii, metod sztucznej inteligencji, trwałość konstrukcji, a także integrację infrastruktury transportowej z przestrzenią publiczną i środowiskiem. Najważniejszym efektem prac prowadzonych w KDKiR w ostatnich latach było stworzenie bazy do rozwoju nowych przepisów i rekomendacji projektowania infrastruktury drogowej oraz zarządzania ruchem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] www.gov.pl/web/infrastruktura/wr-d (data dostępu: 22.04.2025)

Systemy transportowe i logistyczne: od teorii do innowacyjnych rozwiązań praktycznych

– Katedra Systemów Transportowych L-6

Transportation and logistics systems: from theory to innovative practical solutions
– Chair of Transportation Systems L-6

dr inż. Daniel Kubek (ORCID: 0000-0002-6239-7256), dr inż. Aleksandra Ciastoń-Ciulkin (ORCID: 0000-0003-0259-1265), dr inż. Mariusz Dudek (ORCID: 0000-0003-4213-7673), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1419

Streszczenie: Celem publikacji jest przedstawienie rozwoju Katedry Systemów Transportowych, jej interdyscyplinarnego charakteru oraz roli w kształtowaniu nowoczesnych rozwiązań transportowych i logistycznych łączących teorię z praktyką. Opisano genezę jednostki, zakres współpracy z administracją i przemysłem, a także działania na rzecz zrównoważonego transportu i logistyki. W dalszej części zaprezentowano najważniejsze osiągnięcia naukowe katedry – w tym obrony doktoratów, a także uczestnictwo w międzynarodowych projektach badawczych. Artykuł kończy podsumowanie wpływu jednostki na rozwój wiedzy oraz wdrażanie innowacyjnych rozwiązań w praktyce transportowej i logistycznej, wskazując jednocześnie na znaczenie kształcenia i aktywizacji studentów.

Słowa kluczowe: systemy transportowe, zrównoważona mobilność, logistyka miejska, modelowanie i symulacja.

Abstract: The aim of this publication is to present the development of the Department of Transport Systems, its interdisciplinary nature, and its role in shaping modern transport and logistics solutions that integrate theory with practice. The article outlines the unit's origins, its collaboration with public authorities and industry, as well as its efforts to support sustainable transport and logistics. It also highlights the Department's key scientific achievements, including defended doctoral dissertations and participation in international research projects. The publication concludes with a summary of the Department's impact on knowledge advancement and the implementation of innovative solutions in transport and logistics practice, while emphasizing the importance of education and student engagement.

Keywords: transportation systems, sustainable mobility, city logistics, modelling and simulation.

1. Wprowadzenie

Historia i rozwój jednostki

Katedra Systemów Transportowych (KST) została utworzona 1 września 2017 roku w ramach Instytutu Inżynierii Drogowej, Kolejowej i Transportu, w wyniku połączenia Zakładu Systemów Komunikacyjnych i Zakładu Transportu. Pierwszym kierownikiem katedry był prof. dr hab. inż. Andrzej Szarata. Od 1 października 2019 roku katedra funkcjonuje jako samodzielna jednostka Wydziału Inżynierii Lądowej. Zakład Systemów Komunikacyjnych powstał w 1991 roku, wyodrębniony z Katedry Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu. Jego powołanie wynikało z potrzeby systemowego podejścia do planowania transportu i komunikacji zbiorowej, wychodzących poza tradycyjne obszary inżynierii drogowej. W centrum jego działalności znalazły się zagadnienia zrównoważonego transportu oraz integracji z planowaniem przestrzennym. Zakład Transportu, którego początki sięgają 1975 roku, wywodzi się z Instytutu Organizacji i Techniki Transportu Kolejowego. Od 2013 roku funkcjonował

w ramach Instytutu Zarządzania w Budownictwie i Transporcie. Skupiał się na problematyce logistyki oraz transportu zbiorowego, zarówno w skali zakładów, jak i aglomeracji miejskich, obejmując kwestie sterowania, zarządzania i strategicznego planowania systemów transportowych.

2. Działalność naukowo-badawcza i współpraca z przemysłem

W ostatnich latach Katedra Systemów Transportowych zrealizowała szereg kluczowych opracowań oraz projektów badawczo-rozwojowych wspierających rozwój systemów transportowych w Polsce i za granicą. Pracownicy KST brali udział w ponad 30 działaniach, których celem była współpraca badawczo-naukowa lub współpraca z przemysłem. Działania te obejmowały zarówno współpracę z jednostkami samorządowymi, jak i udział w prestiżowych międzynarodowych projektach badawczych. Już w 2015 roku, na zlecenie Wydziału Gospodarki Komunalnej Urzędu Miasta Krakowa, opracowano Aktualizację Polityki Transportowej dla

Miasta Krakowa. Dokument ten, będący wynikiem szczegółowej diagnozy stanu systemu transportowego oraz analizy realizacji wcześniejszych założeń, wyznaczał nowe cele i środki rozwoju miejskiego transportu na lata 2016–2025, a następnie został przyjęty uchwałą Rady Miasta Krakowa [1]. W kolejnym roku, pod kierownictwem prof. Starowicza, przygotowano metodologię i założenia do Planu Systemu Transportowego Warszawy, która stała się podstawą prac nad spójnym, wieloletnim planem rozwoju transportu stolicy. Rok później, w 2017 roku, na zlecenie Urzędu Miasta Stołecznego Warszawy wykonano Plan Mobilności dla pracowników Urzędu Dzielnicy Targówek wraz z poradnikiem metodologicznym. Plan zakładał ograniczenie podróży samochodowych do pracy o około 20%, natomiast opracowany poradnik został wydany przez Biuro Drogownictwa i Komunikacji w 2018 roku. W 2019 roku katedra przygotowała „Studium obsługi transportowej regionu Podtatrza” [2], a w 2020 roku „Studium obsługi transportowej Kotliny Kłodzkiej”. Oba opracowania obejmowały analizę dostępności transportowej, organizacji ruchu turystycznego oraz wykluczenia transportowego, wskazując konieczne działania infrastrukturalne i zarządcze. Wyniki prac stały się podstawą dalszych działań legislacyjnych i strategicznych na szczeblu regionalnym. W 2020 roku opracowano także Strategię Rozwoju Elektromobilności dla Miasta Ustroń na lata 2020–2035, obejmującą projekt układu linii transportu zbiorowego o napędzie elektrycznym oraz rozmieszczenie infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych, co znacząco wspiera rozwój zrównoważonej mobilności w regionie [3].

Równolegle rozwijano także zaawansowane analizy systemów transportowych w Krakowie. W 2021 roku powstała „Analiza kierunków rozwoju układu transportowego Krakowa”, uwzględniająca transport zbiorowy, kolej aglomeracyjną oraz infrastrukturę drogową i rowerową. W tym samym roku zrealizowano również projekt, którego celem było opracowanie metodyk wyznaczania wskaźników związanych z rzeczywistym czasem przejazdu w sieci drogowej, poziomem bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz zużyciem energii elektrycznej i paliw płynnych dla wdrożonego Inteligentnego Systemu Transportowego w Tychach. Opracowane metodyki oparto na kompleksowym przeglądzie literatury i metod badawczych z uwzględnieniem dostępnych danych oraz lokalnych uwarunkowań [4].

W 2022 roku katedra uczestniczyła w pracach nad aktualizacją „Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Krakowa”, wykonując kompleksowe analizy systemu transportowego. W tym samym roku przeprowadzono również analizy ruchowe dla rozbudowującego się osiedla Kliny, opracowując innowacyjny model partycypacji deweloperów w realizacji inwestycji drogowych [5]. Kolejny rok 2023 przyniósł ważne przedsięwzięcia. Zespół katedry przygotował Kompleksowe Badania Ruchu w Krakowie i na ich podstawie opracował nowy Model Ruchu Aglomeracji Krakowskiej.

Działania pracowników KST to nie tylko transport rozumiany jako infrastruktura i ruch drogowy. Zrealizowano także badania emisji mikroplastiku pochodzącego z oznakowania poziomego dróg oraz analizy oznakowania drogowego wykrywalnego przez

urządzenia LIDAR, we współpracy z firmą SWARCO. Badania te, realizowane przez zespół dr. inż. Antona Pashkevicha, mają istotne znaczenie dla rozwoju infrastruktury drogowej dostosowanej do potrzeb autonomicznych pojazdów. W tym samym roku zakończono projekt badawczy SKK Hive Analysis, finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, którego celem była optymalizacja procesów logistycznych w oparciu o Internet rzeczy i sztuczną inteligencję. Opracowane algorytmy umożliwiają zmniejszenie przebiegu pojazdów realizujących dostawy, co bezpośrednio przekłada się na redukcję emisji zanieczyszczeń.

Katedra aktywnie angażuje się także w realizację projektów badawczo-rozwojowych o charakterze międzynarodowym. W latach 2018–2021 uczestniczyła w projekcie CityChangerCargoBike (Horyzont 2020), który promował wdrożenie rowerów towarowych w miastach europejskich [6]. Katedra pełniła rolę partnera naukowego odpowiedzialnego za ewaluację efektów projektu, co zaowocowało obroną rozpraw doktorskich oraz licznymi publikacjami naukowymi. W latach 2019–2021 współrealizowano projekt TranStat, mający na celu modernizację systemu statystyk transportowych poprzez wykorzystanie danych strumieniowych z systemu e-TOLL oraz wdrożenie nowoczesnych wskaźników transportowych. W latach 2017–2020 Katedra brała udział w projekcie GEECCO – Gender Equality in Engineering through Communication and Commitment, w ramach którego prowadzono między innymi badania dotyczące uwzględniania aspektu równości płci w projektowaniu systemów transportowych. Pracami przewodniczyła profesor Lidia Żakowska.

Integralną częścią działalności katedry jest również aktywizacja studentów poprzez działalność Koła Naukowego „Transit”. Studenci uczestniczyli w licznych warsztatach projektowych, których rezultatem były m.in. śmiałe koncepcje przekształcenia Alei Trzech Wieszców w Krakowie, opracowanie projektu Centrum Komunikacyjnego w Hrubieszowie, koncepcja systemu transportowego dla Zakopanego oraz analizy wpływu oddania północnej i wschodniej obwodnicy Krakowa na funkcjonowanie układu drogowo-ulicznego miasta i okolicznych miejscowości.

3. Najważniejsze osiągnięcia naukowe i ich wpływ na rozwój transportu i logistyki

Pracownicy KST aktywnie uczestniczą w międzynarodowych projektach badawczych oraz podejmują w swoich działaniach naukowych aktualne zagadnienia dotyczące rozwoju systemów transportowych. W ostatnich latach powstało wiele innowacyjnych prac doktorskich, podejmujących różnorodne aspekty współczesnego transportu. Ostatnia dekada w zakresie rozwoju naukowego katedry, to obrona ośmiu prac doktorskich, jedno nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz trzy tytuły profesorskie nadane przez prezydenta RP.

W 2015 roku z wyróżnieniem została obroniona praca doktorska, w której dokonano przeglądu i oceny skuteczności instrumentów zarządzania mobilnością stosowanych za granicą oraz wskazano ich przydatność w kształtowaniu polityki transportowej miast w Polsce [7]. Opracowanie miało charakter

wdrożeniowy i wyznaczyło kierunki rozwoju narzędzi wspierających zrównoważony transport.

W 2016 roku powstała praca z zakresu logistyki, w której zaproponowano wielokryterialny model trasowania pojazdów z uwzględnieniem elastycznych okien czasowych, przepływów wstecznych i niepewności parametrów ruchu [8]. Wyniki badań symulacyjnych, przeprowadzonych na przykładzie rzeczywistego ruchu w Krakowie, potwierdziły efektywność podejścia robust w porównaniu z modelami deterministycznymi i stochastycznymi. Również z zakresu logistyki, w 2017 roku obroniono pracę, zawierającą autorską metodę łączenia predykcji popytu (sieci neuronowe, analiza spektralna) z rozumowaniem rozmytym (optymalizacja algorytmem genetycznym). Badania symulacyjne wykazały wysoką skuteczność metody w dynamicznie zmieniających się warunkach funkcjonowania łańcuchów dostaw [9].

W 2018 roku Sabina Puławska-Obiedowska obroniła z wyróżnieniem pracę pt. Modelowanie dostępności miejskiego transportu zbiorowego, będącą skutkiem uczestnictwa w międzynarodowych projektach COST Action TU1002 i TU1209. Praca koncentrowała się na analizie dostępności transportowej oraz wykorzystaniu modeli dostępności w procesie decyzyjnym dotyczącym rozwoju transportu publicznego i lokalizacji usług [10]. W 2021 roku obroniona została rozprawa dotycząca wpływu niedoboru miejsc parkingowych w strefach płatnego parkowania na ruch poszukiwawczy [11]. W pracy przeprowadzono pierwsze w Polsce badania lokalne tego zjawiska oraz opracowano metodykę integrującą dane o ruchu i parkowaniu, służącą poprawie efektywności zarządzania strefami płatnego parkowania. Również w 2021 roku obroniono pracę doktorską łączącą zagadnienia transportu i inżynierii danych [12]. W badaniach wykorzystano dane z systemu Wavelo funkcjonującego w Krakowie, a opracowane modele regresji określały wpływ atrakcyjności otoczenia tras na długość i czas podróży oraz przewidywały lokalizację postojów.

W zakresie transportu publicznego w 2022 roku obroniono pracę dotyczącą optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego [13]. Opracowano w niej modele wspomagania decyzji uwzględniające rzeczywisty popyt, zużycie energii, emisję spalin oraz oczekiwania organizatora transportu. Modele zostały zweryfikowane na przykładzie systemu transportowego Krakowa. A w 2023 roku obroniona została praca nt. parametryzacji sieci drogowej w modelach makroskopowych z uwzględnieniem stref ruchu uspokojonego [14]. W pracy zawarta jest metoda estymacji funkcji oporu odcinka polegająca na rejestracji i parametryzacji zachowań kierowców za pomocą wideodetekcji przy użyciu bezzałogowego statku powietrznego.

Nadany w 2024 roku stopień doktora habilitowanego otrzymał dr inż. Jacek Chmielewski, który w swojej pracy naukowej skupia się nad opracowaniem nowoczesnych metod opisu procesów transportowych, uwzględniających m.in. automatyzację procesu rejonizacji przestrzennej, parametryzację sieci transportowych oraz integrację dużych zbiorów danych (Big Data). W toku swojej pracy naukowej zaproponował także funkcjonalny podział modeli transportowych na modele operacyjne przeznaczone dla zarządców infrastruktury i wspierające codzienne

decyzje operacyjne oraz modele planistyczne wykorzystywane przez urbanistów i planistów do długoterminowego prognozowania i kształtowania polityk transportowych.

Ostatnia dekada to również nadanie stopni profesorskich dla: dr. hab. inż. Wiesława Starowicza, dr. hab. inż. Andrzeja Szaraty oraz dr. hab. inż. Lidii Żakowskiej.

4. Podsumowanie

Działalność Katedry Systemów Transportowych ukierunkowana jest na badania i rozwój nowatorskich rozwiązań wdrażanych w systemach transportowych i logistycznych. Zespół katedry bierze udział w międzynarodowych i krajowych projektach badawczych i rozwojowych, a efekty zainteresowania się innowacyjnymi rozwiązaniami dla transportu i logistyki są widoczne nie tylko w programie nauczania i szeregu publikacjach naukowych, ale również w udziale w opracowaniach dla podmiotów zewnętrznych, które cenią sobie opiniotwórcze, profesjonalne i eksperckie podejście zespołu KST do praktycznych zagadnień transportowych i logistycznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Starowicz W. z zespołem, Aktualizacja polityki transportowej dla miasta Krakowa przyjętej uchwałą Rady Miasta Krakowa w 2007 roku wraz z badaniami nad metodyką tworzenia i oceny polityki, Kraków, 2015
- [2] Szarata A. z zespołem, Studium obsługi transportowej regionu Podtatrza, zamawiający: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Oddział w Krakowie, Kraków, 2019
- [3] Bauer M. z zespołem, Strategia Rozwoju Elektromobilności dla Miasta Ustroń na lata 2020- 2035 w oparciu o strukturę i plan dokumentu rekomendowany przez NFOŚiGW wraz z analizą elementów z zakresu Smart City w ramach programu priorytetowego Ochrona atmosfery 3.4. GEPARD II – transport niskoemisyjny, Kraków, 2020
- [4] Kubek D. z zespołem, Metodyka wyznaczania i obliczania wskaźników efektywności funkcjonowania Inteligentnego Systemu Zarządzania i Sterownia Ruchem w Tychach, Kraków, 2021
- [5] Dudek M., Chmielewski J., Szarata A., Opracowanie kompleksowej analizy wpływu planowanych inwestycji niedrogowych na istniejący i planowany układ drogowy osiedla Kliny, zamawiający: Gmina Miejska Kraków, Kraków, 2022
- [6] Naumov V. z zespołem, Simulating a macro-system of cargo deliveries by road transport based on big data volumes: A case study of Poland, Energies 15(14) 022, <https://doi.org/10.3390/en15145111>
- [7] Nosal K., Wpływ wybranych instrumentów zarządzania mobilnością na podział zadań przewozowych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2015
- [8] Kubek D., Optymalizacja typu robust tras przewozu ładunków na obszarach miejskich, praca doktorska, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2016
- [9] Więcek P., Zastosowanie narzędzi sztucznej inteligencji w sterowaniu zapasami towarów w warunkach niepewności, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2017
- [10] Puławska-Obiedowska S., Modelowanie dostępności miejskiego transportu zbiorowego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2018
- [11] Duda-Wiertel U., Wpływ niedoboru miejsc parkingowych w strefie płatnego parkowania na natężenie ruchu samochodowego powodowanego poszukiwaniem wolnego miejsca parkingowego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2021
- [12] Banet K., Modelowanie wpływu otoczenia trasy na parametry podróży rowerami miejskimi, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2021
- [13] Aleksandrowicz J., Modele optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2022
- [14] Paszkowski J., Parametryzacja sieci drogowej w modelach makrosymulacyjnych z uwzględnieniem stref ruchu uspokojonego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2023

Planowanie, organizacja, realizacja – efektywne zarządzanie budową – Katedra Zarządzania w Budownictwie L-7

Planning, organization, execution – effective construction management
– Chair of Construction Management L-7

prof. dr hab. inż. Edyta Plebankiewicz (ORCID: 0000-0003-0892-5027), dr inż. Bartłomiej Sroka (ORCID: 0000-0001-8845-2789), dr inż. Patrycja Karcińska (ORCID: 0000-0002-2217-5587), dr inż. Monika Górka-Stańczyk (ORCID: 0000-0002-5985-2078), dr inż. Sebastian Biel (ORCID: 0000-0001-8434-3809), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1420

Streszczenie: Katedra Zarządzania w Budownictwie (L-7) jest jednostką Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, której historia sięga początków powstania uczelni. Struktura katedry ewoluowała wraz z rozwojem wydziału, a tematyka badawcza zawsze była związana z aktualnymi w danym okresie problemami szeroko rozumianego zarządzania w budownictwie. Tematyka omówionych w artykule, najnowszych rozpraw doktorskich powstałych w ramach działalności naukowo-badawczej katedry, wyznacza nowatorskie trendy w zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi, istotnie przyczyniając się do rozwoju inżynierii lądowej. Poza walorem naukowo-badawczym należy także wskazać na charakter aplikacyjny i wdrożeniowy opracowanych w katedrze rozwiązań.

Słowa kluczowe: planowanie, realizacja, zarządzanie, Katedra L-7.

Abstract: The Chair of Construction Management (L-7) is a unit of the Faculty of Civil Engineering at the Cracow University of Technology, whose history dates back to the early days of the university. The structure of the Chair has evolved with the development of the Faculty and the research topics have always been related to the problems of construction management, broadly understood, which were current at the time. The topics discussed in the article, the most recent PhD dissertations produced as part of the scientific and research activities of the Chair, set innovative trends in the management of construction projects, significantly contributing to the development of civil engineering. In addition to the scientific and research value, it is also important to point out the application and implementation nature of the solutions developed at the Chair.

Keywords: planning, execution, management, Chair L-7.

1. Wprowadzenie

Katedra Zarządzania w Budownictwie (L-7) jest jedną z jednostek Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. W artykule krótko przedstawiono historię i rozwój jednostki, a także omówiono najnowsze osiągnięcia pracowników katedry.

Historia i rozwój jednostki

Historia Katedry L-7 sięga roku 1954, kiedy to utworzona została Katedra Organizacji i Mechanizacji Budowy, a jej kierownikiem został prof. zw. mgr inż. Jan Wątorski. W roku 1970 z połączenia części Katedry Budownictwa Ogólnego oraz Katedry Organizacji i Mechanizacji Budowy powstał Instytut Technologii i Organizacji Budownictwa. Instytut kierowany był kolejno w latach 1970–1976 przez prof. Jana

Wątorskiego, w latach 1976–1982 przez prof. zw. dr. hab. inż. Zbigniewa Błochowiaka, a następnie w latach 1982–1999 przez prof. zw. dr. hab. inż. Bogdana Cyunela. W roku 1973 powołano w instytucie 4 Zakłady: Technologii Produkcji Budowlanej, Zarządzania i Ekonomiki Budownictwa, Budownictwa Ogólnego oraz Fizyki Budowli.

W roku 1991 nastąpiła reorganizacja instytutu polegająca na powołaniu odrębnego Zakładu Zarządzania w Budownictwie oraz przeniesieniu do Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych – Zakładu Budownictwa Ogólnego i zespołu Fizyki Budowli. W roku 1999 funkcje dyrektora Instytutu Zarządzania w Budownictwie objął dr hab. inż. Andrzej Kosecki prof. PK. W roku 2000 po objęciu stanowiska dyrektora instytutu przez dr. hab. inż. Janusza Biernackiego prof. PK nastąpiła kolejna reorganizacja struktur oraz zmiana nazwy na Instytut Zarządzania w Budownictwie i Transporcie.

W latach 2009–2013, po odłączeniu jednostek związanych transportem, na Wydziale Inżynierii Lądowej funkcjonował Samodzielny Zakład Technologii i Organizacji Budownictwa. W roku 2013 powtórnie przywrócono Instytut Zarządzania w Budownictwie i Transporcie, a jego dyrektorem została dr hab. inż. Edyta Plebankiewicz.

W roku 2017 nastąpiła kolejna reorganizacja Instytutu L3. Spełniając oczekiwania rynku pracy oraz przedsiębiorstw budowlanych w zakresie wykształcenia absolwentów specjalności TOB (Technologia i Organizacja Budownictwa), została utworzona nowa struktura. Został powołany Instytut Zarządzania w Budownictwie, w skład którego weszły Zakład Technologii i Organizacji Budownictwa (L-31) oraz Katedra Zarządzania i Ekonomiki w Budownictwie (L-32).

W 2020 roku zmieniono strukturę organizacyjną Wydziału Inżynierii Lądowej i wydzielono w niej piętnaście jednostek. W ramach reorganizacji dokonano przekształcenia Instytutu Zarządzania w Budownictwie na Katedrę Zarządzania w Budownictwie L-7. Od roku 2013 do dzisiaj (2025 rok) instytutem, a potem katedrą kierują prof. dr hab. inż. Edyta Plebankiewicz i pełniąca funkcję zastępcy dyrektora, a po zmianach zastępcy kierownika – dr inż. Renata Kozik, prof. PK. Obecnie w skład katedry wchodzi 19 pracowników badawczo-dydaktycznych i dydaktycznych, w tym 3 profesorów tytularnych, 6 profesorów uczelni oraz 7 adiunktów.

2. Działalność naukowo-badawcza i współpraca z przemysłem

Pracownicy Katedry L-7 aktywnie uczestniczą w realizacji krajowych, jak i międzynarodowych projektów badawczych. Do najważniejszych można zaliczyć:

- MEZeroE – H2020-NMBP-TO-IND-2018-2020/H2020-NMBP-TO-IND-2020-two stage „MEZEROE – Measuring Envelope products and systems contributing to next generation of healthy nearly Zero Energy Buildings”;
- CA20139 – Holistic design of taller timber buildings (HELEN). Członkami grupy roboczej WG4 (Sustainability and Durability) w okresie od października 2021 do października 2025 r. są pracownicy Katedry L-7. Grupa robocza odpowiada za zagadnienia związane ze zrównoważonym rozwojem i trwałością w zakresie projektowania wysokich budynków drewnianych;
- „Innowacyjny, zintegrowany system zarządzania inwestycją w zakresie obiektów liniowych z modulem kontrolno-pomiarowym zgodny z metodologią BIM” – NCBR, projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Inteligentny Rozwój;
- „Narzędzia wspierające budowę i utrzymanie sieci elektroenergetycznych z zastosowaniem technik MR/WR”, NCBR, projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Inteligentny Rozwój;

- „System automatycznego ważenia pojazdów w ruchu” – WIM-PL, NCBR, projekt realizowany w ramach programu Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków – GOSPOSTRATEG;
- „Laboratorium Młodego Inżyniera”, NCBR, projekt realizowany w ramach programu POWER przez Politechnikę Krakowską, w latach 2019-2021, mający charakter popularyzacji nauki.

Katedra prowadzi intensywną współpracę naukową zarówno z ośrodkami krajowymi, jak i zagranicznymi. Szczególnie należy tu wskazać współpracę z uczelniami w Brnie, Koszycach i Wilnie. Potwierdzeniem może być umowa „Agreement on Academic Cooperation” zawarta w maju 2021 r. pomiędzy Instytutem Technologii, Ekonomiki i Zarządzania Wydziału Inżynierii Lądowej Uniwersytetu Technicznego w Koszycach a Katedrą Zarządzania w Budownictwie Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. W roku 2021 został zainicjowany przez Katedrę L-7 cykl spotkań pn. International workshops „Innovation potential of modern methods of construction vs. sustainability” – Koszyce 2021, Muszyna 2023, Koszyce 2024.

Efektom współpracy z naukowcami z zagranicznych ośrodków są liczne wspólne publikacje m.in. w zakresie analiz kosztowych i zastosowania metod sztucznej inteligencji w tym obszarze dla budownictwa infrastrukturalnego, w zakresie zastosowań BIM i narzędzi cyfrowych inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Katedra zaangażowana jest w liczne prace na rzecz otoczenia gospodarczego. Potwierdzeniem tego może być zakończenie tylko w roku 2024 – 14 tego typu umów i 7 kolejnych w toku. Pracownicy katedry wykonują także prace badawczo-rozwojowe na zlecenie Urzędu Miasta Krakowa. W ramach opracowania zrealizowanego na zlecenie Cenatorium Sp. z o.o. z siedzibą w Warszawie pracownicy opracowali w 2023 r. metodykę wyznaczania wartości estymowanego wskaźnika EP wraz z instrukcją wyznaczania zmiennych parametrów cząstkowych.

Działalność Katedry L-7 wpisuje się również w problematykę bezpieczeństwa pracy w budownictwie. Od roku 2022 Katedra Zarządzania w Budownictwie Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej wraz z katedrami z Politechniki Warszawskiej oraz Wrocławskiej, czynnie uczestniczy w organizacji, cyklicznych już, konferencji na temat zarządzania bezpieczeństwem pracy w budownictwie.

3. Najważniejsze osiągnięcia naukowe i ich wpływ na rozwój budownictwa

Najnowsze rozprawy doktorskie, które powstały w ramach działalności naukowo-badawczej Katedry Zarządzania w Budownictwie dotyczą zagadnień związanych z inżynierią przedsięwzięć budowlanych. Przedsięwzięcie budowlane to złożony i wieloetapowy proces, ukierunkowany na realizację inwestycji zgodnie z założonym harmonogramem, budżetem oraz wymaganymi standardami jakości.

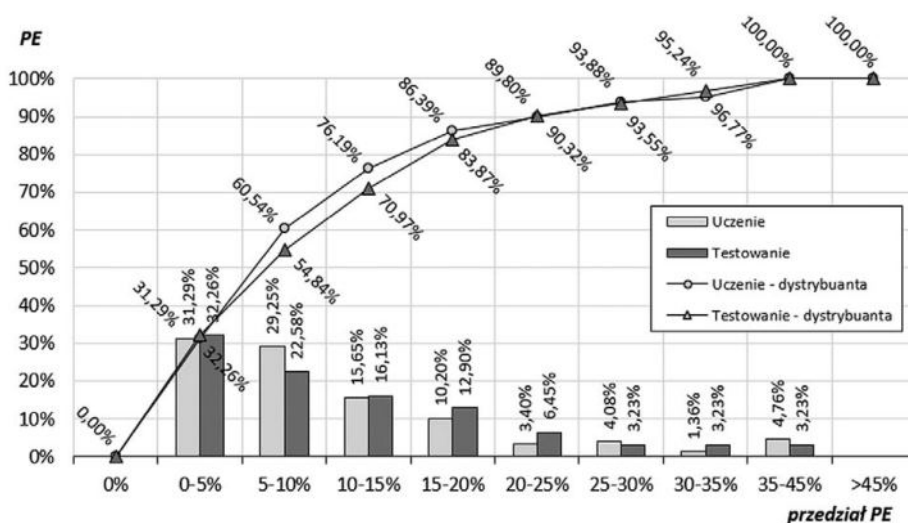
W pracy [1] zaprezentowano autorską metodę priorytetowego harmonogramowania wieloobiektywnych przedsięwzięć budowlanych. W rozprawie wykazano, że brakuje świadomości wśród inżynierów budownictwa dotyczące wpływu kolejności wykonania obiektów na czas i koszt projektu, istnieją luki w oprogramowaniu wspierającym harmonogramowanie przedsięwzięć wieloobiektywnych oraz brakuje elastycznych modeli umożliwiających definiowanie ograniczeń technologiczno-organizacyjnych. W odpowiedzi na zidentyfikowane braki opracowano metodę priorytetowego harmonogramowania, która w elastyczny sposób uwzględnia ograniczenia technologiczno-organizacyjne poprzez zastosowanie listy priorytetów oraz w funkcji celu obejmuje koszty: bezpośrednie, pośrednie, kary za opóźnienia, nagrody za wczesne ukończenie oraz koszty nieciągłości pracy brygad. Skuteczność metody potwierdzono poprzez wielopoziomą weryfikację i walidację. W ramach walidacji operacyjnej przeprowadzono analizę wrażliwości, która wykazała szczególną wrażliwość modelu na zmianę parametrów czas graniczny oraz termin dyrektywny. Metoda wykazała swoją efektywność poprzez minimalizację całkowitych kosztów przedsięwzięcia przy zachowaniu założonych ograniczeń technologiczno-organizacyjnych, co zilustrowano na przykładach obliczeniowych. Opracowana metoda umożliwiła redukcję: kosztów całkowitych średnio o ok. 3,6%, czasu realizacji średnio o ok. 0,7%, przy priorytetowym uwzględnianiu ograniczeń technologiczno-organizacyjnych. W pracy przedstawiono zarówno modele matematyczne, jak i kody programu napisanego w języku Python. Opracowane rozwiązanie może stanowić cenne narzędzie dla inżynierów i kierowników budowy, ułatwiające harmonogramowanie przedsięwzięć wieloobiektywnych.

W pracy [2] opracowano matematyczny model do weryfikacji planowanej liczby roboczogodzin na cele planowania zatrudnienia na budowie oraz harmonogramowania robót budowlanych po stronie wykonawcy budowlanego. Opracowany model oparto o teorię zbiorów rozmytych, a do zdefiniowania problemu wpływu 12 analizowanych czynników na planowanie zatrudnienia zastosowano pojęcie relacji rozmytej. Wagi wpływu czynników określono na podstawie wyników przeprowadzonych badań kwestionariuszowych,

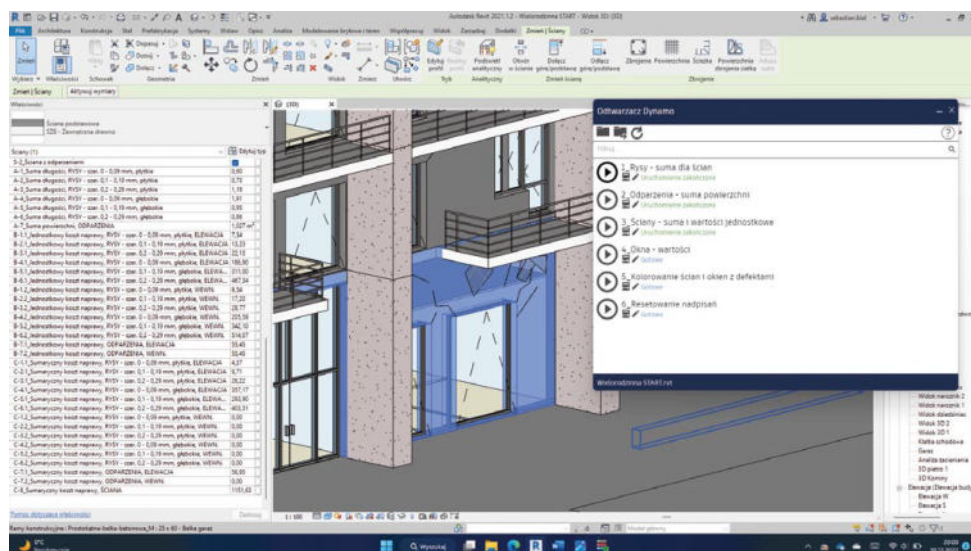
które zweryfikowano na podstawie współczynnika dyspersji względnej klasyfikacji. Proces sterowania rozmytego składa się z etapu fuzyfikacji, wnioskowania oraz defuzyfikacji. Dla etapu fuzyfikacji opracowano funkcje przynależności wejść modelu, w oparciu o wyniki badań kwestionariuszowych. Wnioskowanie rozmyte w modelu opiera się o architekturę Mamdani – Zadeha i zachodzi przy wykorzystaniu opracowanej bazy reguł modelu z zastosowaniem maxyminowego złożenia relacji rozmytych. Opracowano funkcje przynależności wyjść modelu, w oparciu o analizę 270 przedsięwzięć budowlanych. Dla etapu defuzyfikacji przyjęto metodę środka ciężkości. Wprowadzony podział na cztery grupy czynników pozwala na analizę wyników w aspekcie technologicznym, organizacyjnym, projektowym i w sferze zarządzania. W wyniku działania modelu uzyskuje się cztery współczynniki szczegółowe, które po zastosowaniu wag znormalizowanych grup czynników pozwalają wyznaczyć wynik ogólny modelu. Model poddano analizie wrażliwości, a jego działanie w zakresie uzyskiwanych wyników zweryfikowano na rzeczywistych przypadkach. Obliczony błąd względny wyników modelu nie przekracza 2,5%.

W rozwijającym się sektorze budownictwa komercyjnego, zwłaszcza w przypadku obiektów użyteczności publicznej, kluczowe znaczenie ma oszacowanie kosztów inwestycji już na etapie projektowania koncepcyjnego. Koszty inwestycji, obok czasu i jakości są podstawowym miernikiem sukcesu przedsięwzięcia budowlanego. Istotnym składnikiem tych kosztów są systemy elewacyjne w formie fasad aluminiowo-szklanych oraz elewacji wentylowanych. Proces wyceny lekkich ścian osłonowych charakteryzuje się wysokim stopniem złożoności, co uzasadnia potrzebę poszukiwania nowych metod oraz modeli predykcji kosztów, stanowiących aktualny i praktyczny temat badań naukowych. W pracy [3] dokonano analizy zgromadzonej dokumentacji kontraktowej budynków użyteczności publicznej. Na ich podstawie wyodrębniono 14 kluczowych czynników determinujących koszty systemów fasadowych, które poddano

Rys. 1. Histogram rozkładu i wykres liniowy dystrybucji błędów względnych uczenia (L) i testowania (T) dla wybranej sieci MLP24-2-1 [3]



Rys. 2. Zastosowanie opracowanych algorytmów i dodatku Dynamo do wyliczania kosztu napraw rys i odparzeń na tynku elewacyjnym [4]



analizie statystycznej oraz strukturalnej. Następnie zaproponowano cztery modele predykcji kosztów: model regresji wielorakiej, model regresji krokowej postępującej, model drzewa regresyjnego oraz model sztucznej sieci neuronowej. Analiza wyników predykcji wykazała, że model oparty na sztucznej sieci neuronowej charakteryzuje się najlepszą jakością predykcji, co stanowiło podstawę jego wyboru jako najskuteczniejszego narzędzia estymacji kosztów systemów fasadowych (rys. 1). Dodatkowo w ramach prowadzonych badań dokonano analizy czynników wpływających na koszty związane z jakością wykonania systemów elewacyjnych. Wyselekcjonowano 22 kluczowe czynniki, które sklasyfikowano w pięciu grupach kosztowych. Oceny istotności poszczególnych czynników dokonano na podstawie badań kwestionariuszowych, a następnie przeprowadzono procentową analizę ich wpływu na całkowitą wartość inwestycji. Otrzymane w rozprawie doktorskiej wyniki badań stanowią istotny wkład w rozwój narzędzi wspomagających proces prognozowania kosztów systemów fasadowych.

Kolejna praca [4] związana jest z dynamicznie rozwijającym się rynkiem nieruchomości mieszkaniowych w Polsce. Podczas odbiorów wykrywane są liczne usterki budowlane, dlatego powstała potrzeba utworzenia rozwiązań, które ułatwią ich zarządzanie. W celu opracowania metody zarządzania usterekami dokonano analizy 351 protokołów odbiorowych lokali mieszkalnych, opracowanych przez inspektorów nadzoru inwestorskiego. W protokołach zidentyfikowano łącznie 3265 usterek budowlanych, które następnie sklasyfikowano i pogrupowano. Dla każdej usterki oszacowano koszt jej naprawy oraz wyodrębniono i dokonano normalizacji czasu dla każdego etapu naprawy usterki. Na podstawie opracowanych danych oraz wnioskowania z przypadków Case Based Reasoning (CBR) opracowano metodę zarządzania usterekami. W celu jej opracowania stworzono bazę przypadków, oszacowano wagi kryteriów za pomocą korelacji, a także opracowano w programie Excel arkusze mające za zadanie wyszukanie podobnych przypadków w bazie przypadków oraz wygenerowanie raportu głównego i pomocniczego. Dzięki raportom inspektor przeprowadzający odbiór otrzyma informację na temat usterek, które mogą

pojawić się w analizowanym pomieszczeniu m.in. o rodzaju usterek i ich istotności, prawdopodobieństwie ich wystąpienia oraz informację na temat średniego czasu i kosztu naprawy każdej usterki, jak i sumaryczny czas i koszt napraw wszystkich potencjalnych usterek w pomieszczeniu. Zgromadzone dane i opracowane rozwiązania posłużyły do stworzenia narzędzia w programie Autodesk Revit. Na podstawie opracowanej bazy danych algorytmy zaimplementowane do dodatku Dynamo wykorzystują parametry usterek przypisanych do poszczególnych elementów modelu budynku (takie jak np. szerokość i długość rysy) do oszacowania kosztu napraw usterek na poszczególnych elementach budynku (rys. 2).

4. Podsumowanie

W podejmowanych pracach naukowo-badawczych Katedra L-7 wyznacza nowatorskie trendy w zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi, istotnie przyczyniając się do rozwoju inżynierii lądowej. Poza walorem naukowo-badawczym, wyniki badań, a także efekty dysertacji mają charakter implikacyjny i dają możliwość praktycznego wdrożenia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sroka B., Metoda priorytetowego harmonogramowania wieloobiektowych przedsięwzięć budowlanych, rozprawa doktorska, promotor: E. Radziszewska-Zielina, Politechnika Krakowska, Kraków, 2023
- [2] Karcińska P., Model planowania zatrudnienia i wspomagania tworzenia harmonogramów postępu robót w wykonawstwie budowlanym, rozprawa doktorska, promotor: E. Plebaniakiewicz, promotor pomocniczy: A. Leśniak, Politechnika Krakowska, Kraków, 2023
- [3] Górka-Stańczyk M., Modelowanie kosztów wykonania systemów fasadowych budynków użyteczności publicznej, rozprawa doktorska, promotor: A. Leśniak, promotor pomocniczy: D. Wieczorek, Politechnika Krakowska, Kraków, 2023
- [4] Biel S., Identyfikacja usterek w budownictwie mieszkaniowym, wielorodzinnym i zarządzanie ich usuwaniem na etapie odbiorów, rozprawa doktorska, promotor: K. Zima, promotor pomocniczy: J. Malara, Politechnika Krakowska, Kraków, 2023

Tradycja, innowacja, współpraca: mechanika budowli w służbie społeczeństwa i środowiska

– Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów L-8

Tradition, innovation, collaboration: structural mechanics in service to society and environment – Chair of Structural Mechanics and Materials L-8

prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatara (ORCID: 0000-0002-4071-2358), dr hab. inż. Alicja Kowalska-Koczwara, prof. PK (ORCID: 0000-0001-8088-7729), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1421

Streszczenie: Artykuł przedstawia historię, zakres działalności oraz kluczowe osiągnięcia Katedry Mechaniki Budowli i Materiałów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Głównym celem opracowania jest ukazanie ewolucji jednostki, jej aktywnego udziału w innowacyjnych projektach badawczych oraz efektywnej współpracy z przemysłem transportowym i budowlanym. Przedstawiono sylwetki kierowników jednostki, podkreślając ich wkład w rozwój budownictwa i dynamiki budowli. Szczególną uwagę zwrócono na projekty badawcze finansowane ze środków unijnych, które przyczyniły się do istotnego rozwoju technologii minimalizujących drgania, mających duże znaczenie dla poprawy komfortu życia mieszkańców oraz ochrony budowli. Opisano współpracę jednostki z przemysłem, w tym realizację projektów dla Metra Warszawskiego oraz tramwajowych inwestycji w Krakowie i Warszawie. W artykule podkreślono znaczenie synergii pomiędzy nauką i praktyką, która pozwala na efektywne wdrażanie nowoczesnych rozwiązań technicznych oraz uzyskanie trwałego uznania jednostki na arenie krajowej i międzynarodowej.

Słowa kluczowe: mechanika budowli, dynamika budowli, współpraca z przemysłem, minimalizacja drgań, ochrona środowiska.

Abstract: The article presents the history, scope of activities, and key achievements of the Department of Structural Mechanics and Materials at the Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology. The main goal of this paper is to illustrate the unit's evolution, active participation in innovative research projects, and effective cooperation with the transportation and construction industries. Profiles of the department heads are presented, highlighting their contributions to the development of construction and structural dynamics. Particular attention is paid to research projects financed by EU funds, significantly advancing technologies for vibration minimization, crucial for enhancing residents' comfort of life and protecting buildings. The unit's cooperation with industry, including projects for the Warsaw Metro and tramway investments in Cracow and Warsaw, is described. The article emphasizes the importance of synergy between science and practice, enabling effective implementation of modern technical solutions and securing the department's sustained recognition nationally and internationally.

Keywords: structural mechanics, structural dynamics, industry collaboration, vibration minimization, environmental protection.

1. Wprowadzenie

Rys historyczny oraz sylwetki kierowników katedry

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów od chwili powstania Politechniki Krakowskiej przechodziła szereg przeobrażeń, zmian organizacyjnych, a w tym zmian nazwy. Poniżej podajemy wybrane dane historyczne oraz krótkie dane bibliograficzne osób, które kierowały katedrą.

Początki historii Politechniki Krakowskiej, jak również i naszej katedry nierozdzielnie wiążą się z osobą prof. Izzydora Stelli-Sawickiego. Po 1945 r. prof. Izydor Stella-Sawicki był jednym z organizatorów politechnik w Krakowie oraz Gliwicach. Profesor Stella-Sawicki był ojcem założycielem Politechniki Krakowskiej i prorektorem wydziałów politechnicznych

z ramienia Akademii Górniczej (w latach 1945–1948). Był jednym z organizatorów Politechniki Śląskiej z tymczasową siedzibą w Krakowie. Od 1945 roku objął ponownie obowiązki profesora na Wydziale Elektromechanicznym Akademii Górniczej, pełniąc równocześnie kierownictwo Katedry Statyki Budowli i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Krakowskiej. Po przekształceniu w 1954 r. wydziałów politechnicznych AGH w całkiem samodzielną Politechnikę Krakowską pełnił funkcję kierownika Katedry Statyki Budowli i Wytrzymałości Materiałów, prowadząc wykłady ze statyki i budownictwa żelbetowego. Początkowo zajmował się budownictwem wodnym i geodezją, z czasem skupił swoje zainteresowania na zagadnieniach budownictwa, statyki i stosowania żelbetu. Był prekursorem budownictwa żelbetowego w Polsce,

współpracował przy wydaniu „Podręcznika Inżynierskiego”, wydał wiele podręczników z zakresu budownictwa. Prof. Tadeusz Kozłowski w latach 1959–1970 był kierownikiem Katedry Statyki Budownictwa i Wytrzymałości Materiałów Wydziału Budownictwa Lądowego Politechniki Krakowskiej, a w latach 1970–1972 pełnił funkcję dyrektora Instytutu Mechaniki Budowli, w skład którego wchodziła katedra. Jest autorem podręczników akademickich z budownictwa metalowego i teorii sprężystości. Poza zainteresowaniami naukowymi prof. Kozłowski dał się poznać jako autor artykułów na temat eksploracji kosmosu oraz publikacji SF.

Prof. Roman Ciesielski w latach 1963–1970 kierował Katedrą Dynamiki Budowli, w latach 1982–1996 pełnił funkcję dyrektora Instytutu Mechaniki Budowli. Od 1970 r. kierował Katedrą Statyki i Dynamiki Budowli, która była jedną z jednostek Instytutu. W 1971 r. prof. R. Ciesielski został wybrany na członka korespondenta Polskiej Akademii Nauk, a w 1983 r. wybrano go członkiem rzeczywistym Polskiej Akademii Nauk. Od 1989 r. był członkiem czynnym Polskiej Akademii Umiejętności. Profesor był w latach: 1967–90 członkiem Rady Głównej Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT, 1987–98 członkiem Prezydium Polskiej Akademii Nauk, 1982–1985 przewodniczącym Rady Głównej Szkolnictwa Wyższego. W latach 1972–1990 był przewodniczącym Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, a w 1990 r. został honorowym przewodniczącym tego komitetu. Był przewodniczącym Komisji Budownictwa Krakowskiego Oddziału PAN, a od 2003 r. – przewodniczącym honorowym tej komisji. W pracach Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa (PZITB) uczestniczył nieprzerwanie od 1958 r. W latach 1962–1972 był przewodniczącym Komitetu Nauki PZITB. Został członkiem honorowym PZITB.

Profesor Roman Ciesielski pełnił funkcję rektora Politechniki Krakowskiej w latach 1981–1982. Jego kadencja została przerwana w wyniku wprowadzenia stanu wojennego w Polsce. W latach 1989–1991 był senatorem Rzeczypospolitej; był członkiem OKP, aktywnie uczestniczył w pracach komisji senackich: Gospodarki Narodowej, Kultury, Środków Przekazu, Nauki i Edukacji Narodowej.

Prof. Edward Maciąg od 1996 do 2000 r. był kierownikiem Katedry Statyki i Dynamiki Budowli. Profesor był m.in.: członkiem Sekcji Mechaniki Konstrukcji KILiW PAN, kierował Krakowskim Oddziałem PTMTS, był wieloletnim wiceprzewodniczącym Polskiej Grupy Sejsmicznej i Parasejsmicznej, wieloletnim przewodniczącym Komisji Nauki Oddziału Małopolskiego PZITB w Krakowie, członkiem Komitetu Nauki PZITB. Był członkiem Komisji ds. Ochrony Powierzchni Wyższego Urzędu Górniczego w Katowicach. Profesor był uznanym autorytetem naukowym i zawodowym w zakresie mechaniki i dynamiki konstrukcji budowlanych. Był wybitnym specjalistą w dziedzinie dynamiki budowli, a w szczególności wpływów parasejsmicznych na budowle i ludzi w nich przebywających. Profesor szczególnie aktywnie uczestniczył w kształceniu młodej kadry naukowej;

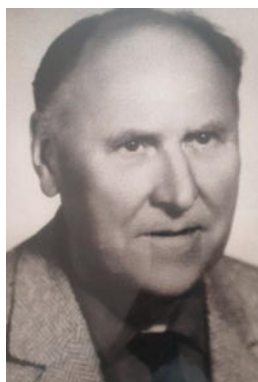
był promotorem czterech prac doktorskich. W pracy naukowej najczęściej skupiał się na zagadnieniach teoretycznych i eksperymentalnych dotyczących różnego typu konstrukcji budowlanych i podłoża gruntowego poddanych obciążeniom dynamicznym. Wymiernymi rezultatami jego dociekań naukowych było m.in. współautorstwo dwóch norm PN-85/B-02170 i PN-88/B-02170 oraz licznych artykułów naukowych i monografii.

Prof. Janusz Kawecki objął kierownictwo Katedry Statyki i Dynamiki Budowli w roku 2001 i pełnił tę funkcję do roku 2013. W pracy naukowej prof. J. Kawecki zajmuje się zagadnieniami z zakresu dynamiki budowli, identyfikacji dynamicznej, jak też wpływu drgań na budowle i ludzi. Jest autorem lub współautorem m.in. monografii poświęconych inżynierii wiatrowej i diagnostyce dynamicznej, współautorem podręczników akademickich, a także współautorem dwóch norm. Uczestniczył w pracach licznych międzynarodowych organizacji naukowych, m.in. JAKIE, ISO, IASS oraz polskich, m.in. Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, do którego regularnie od 1993 r. jest wybierany przez społeczność naukową Polski, Komisji Budownictwa PAN O/Kraków (przewodniczący w latach 2006–2015), Komitetu Nauki PZITB oraz PTMTS. W latach 2006–2015 przewodniczył Komisji Budownictwa PAN. Od 1980 r. jest członkiem IASS W. G. Mast & Towers, od 1985 r. do 2016 r. członkiem International Organization for Standardization (ISO) w komitecie sterującym TC 98, członkiem International Association for Wind Engineering, w latach 1988–2008 przewodniczył Polskiej Grupie IAWWE.

Prof. Tadeusz Tatała przejął kierowanie Katedrą Statyki i Dynamiki Budowli w latach 2013–2019. W roku 2019 po reorganizacji struktury Wydziału Inżynierii Lądowej katedra przyjęła nazwę Katedry Mechaniki Budowli i Materiałów, którą do chwili obecnej kieruje prof. Tadeusz Tatała. Zainteresowania badawcze i naukowe prof. T. Tatary koncentrują się na zagadnieniach związanych z dynamiką konstrukcji i oceną szkodliwości wpływu drgań parasejsmicznych na konstrukcje budynków i ludzi w nich przebywających. Dotyczy to zwłaszcza propagacji drgań w podłożu gruntowym wzbudzanych różnymi źródłami (wstrząsy górnicze, wstrząsy od odstrzałów w kamieniołomach, drgania komunikacyjne wzbudzane eksploatacją metra, przejazdami pociągów, tramwajów i pojazdów samochodowych), dynamicznej interakcji układu budynek-podłoże gruntowe wywołanej drganiami typu parasejsmicznego, analizy modelowej i doświadczalnej cech dynamicznych oraz odpowiedzi dynamicznej budowli, diagnostyki dynamicznej, a w tym oceny szkodliwości wpływu drgań przekazywanych z podłoża na budynki i ludzi w nich przebywających. Od 2006 r. jest przewodniczącym Zarządu Polskiej Grupy Inżynierii Sejsmicznej i Parasejsmicznej, a od 2008 r. pełni funkcję przewodniczącego zarządu Komisji Nauki PZITB O/Małopolski. Od 2008 r. jest członkiem Komisji ds. Ochrony Powierzchni Wyższego Urzędu Górniczego. Od 2024 r. jest członkiem rady naukowej ds. budowy metra w Krakowie.

Tabela 1. Kierownicy katedry w latach 1945–2025

Prof. Izidor Stell-Sawicki



Prof. Tadeusz Kozłowski



Prof. Roman Ciesielski



Prof. Edward Maciąg



Prof. Janusz Kawecki



Prof. Tadeusz Tatara

Poczet kierowników katedry obejmujący lata 1945–2025 przedstawiamy w tabeli 1.

Pracownicy katedry byli i są aktywnymi członkami wielu organizacji i stowarzyszeń naukowych i zawodowych w kraju i za granicą, m.in.: Komisja Budownictwa PAN o/ Kraków, Komisja ds. Ochrony Powierzchni przy WUG, Polska Izba Inżynierów Budownictwa, Komitet Nauki PZITB, PZITB O/ Małopolska, Polska Grupa Inżynierii Sejsmicznej i Parasejsmicznej, RILEM.

2. Projekty badawcze realizowane w jednostce

Pierwszym projektem realizowanym ze środków unijnych przez Katedrę Mechaniki Budowli i Materiałów był projekt o wartości 4 000 000,00 zł, finansowany ze środków Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (POIG.01.01.02-10-106/09), realizowany w okresie od 2 listopada 2010 roku do 30 czerwca 2013 roku z udziałem kluczowego personelu B+R. Efektem tego projektu była nowelizacja normy PN-B-02171 dotyczącej oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach oraz opracowanie algorytmu dawki wibracji, który został załączony do tej normy.

Kolejne dwa projekty zgłoszone przez Katedrę Mechaniki Budowli i Materiałów otrzymały dofinansowanie od Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Działania 4.1 „Badania naukowe i prace rozwojowe”, Poddziałanie 4.1.2

„Regionalne agendy naukowo-badawcze”. Zespół Instytutu Mechaniki Budowli WIL w konsorcjum z firmami TINES S.A. oraz GEO-COMP Sp. z o.o. uzyskał dofinansowanie na realizację dwóch tematów badawczych na łączną kwotę przekraczającą 4 mln złotych. W obu projektach Politechnika Krakowska pełniła funkcję lidera.

Projektem „Nowatorska technologia izolacji wibroakustycznej podłóg”, realizowanym we współpracy z firmą TINES, kierowała dr hab. inż. Alicja Kowalska-Koczwara, prof. PK. Rezultatem projektu stały się podłogi o właściwościach izolacji akustycznej i wibracyjnej w zakresie dźwięków uderzeniowych. W ciągu 35 miesięcy trwania projektu zespoły badawcze przeszły od laboratoryjnych testów materiałów wibroizolacyjnych firmy TINES do wdrożenia gotowego produktu – systemów podłogowych zapewniających komfort akustyczno-wibracyjny. Wykonano pomiary in situ dla trzech najbardziej obiecujących rozwiązań, potwierdzając ich skuteczność na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym. Aplikacja opracowanych rozwiązań podłogowych odbyła się na terenie szkoły podczas ferii zimowych, po uzyskaniu certyfikatów PZH i aprobat dotyczących odporności ogniowej. Potrzebę wdrożenia tego typu kompleksowego rozwiązania sygnalizowali mieszkańcy terenów przylegających do tras tramwajowych i kolejowych oraz osoby mieszkające w ścisłym centrum miast, gdzie drgania są odczuwalne także z innych źródeł. Drugim projektem był: „Innowacyjna hybrydowa konstrukcja

przegród wibroizolacyjnych do ochrony środowiska przed drganiami transportowymi i z podobnych źródeł”, realizowany przy współpracy z firmą GEO-COMP. Początkowo kierownikiem projektu był prof. dr hab. inż. Krzysztof Stypuła, a następnie funkcję tę przejął prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatała. W wyniku projektu opracowano trzy różne rozwiązania przegród wibroizolacyjnych w gruncie. Przez dwa i pół roku zespoły realizowały działania od opracowania koncepcji po wdrożenie finalnych produktów przez firmę GEO-COMP. Firma, od lat specjalizująca się w budowie przegród gruntowych, wprowadziła znaczące innowacje wibroizolacyjne, co wyróżniło produkt na rynku. Przeprowadzono kompleksowe badania, obejmujące zarówno analizę koncepcyjną, jak i pomiary in situ na poligonie doświadczalnym oraz na obiektach rzeczywistych. Uzyskane rozwiązania zapewniły konkurencyjność dzięki kompleksowości oraz podkreślonej oszczędności kosztów, co spotkało się z zainteresowaniem m.in. ze strony Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad oraz samorządów lokalnych.

Kolejnym zrealizowanym projektem był projekt o wartości 3 883 999,10 zł, finansowany ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (POIR.01.01.01-00-1671/20), realizowany od 1 stycznia 2022 roku do 31 grudnia 2023 roku przez pion B+R. Efektem tego projektu było zaproponowanie systemu podłóg przemysłowych, które zapewniają redukcję drgań pochodzących zarówno ze źródeł zewnętrznych, jak i wewnętrznych.

Obecnie pracownicy katedry uczestniczą w realizacji projektu „Measuring Envelope products and systems contributing to next generation of healthy nearly Zero Energy Buildings” (MEZeroE), finansowanym w ramach programu Horyzont 2020, którego liderem jest Eurac Research. Projekt rozpoczął się 1 stycznia 2021 roku i potrwa do 31 grudnia 2025 roku. Głównym celem projektu jest stworzenie europejskiego ekosystemu otwartych innowacji, który przyspieszy rozwój technologii budowlanych dla budynków niemal zeroenergetycznych (nZEB), wspierając testowanie produktów w warunkach rzeczywistych oraz ułatwiając ich standaryzację i wdrożenie na rynek.

3. Współpraca z przemysłem

Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów od wielu lat aktywnie współpracuje z przemysłem transportowym, realizując szereg projektów dotyczących oceny oraz minimalizacji wpływów dynamicznych i wibracyjnych na środowisko budowlane oraz ludzi. Ekspertyzy i badania wykonywane przez Katedrę mają duże znaczenie dla poprawy komfortu życia mieszkańców oraz ochrony infrastruktury miejskiej.

Wybrane przykłady realizowanych prac – poniżej.

- Projekty dotyczące ograniczania wpływów drgań komunikacyjnych od pociągów Metra Warszawskiego (I i II linia metra) na rzecz firm ILF sp. z o.o. i Gulermak sp. z o.o.:
 - Analiza wpływu drgań i obciążeń dynamicznych od projektowanej III linii metra na budynki i ludzi w Warszawie;

- Parametryzacja i wdrożenie oprogramowania sterującego wraz z pomiarami weryfikacyjnymi;
 - Porealizacyjne pomiary drgań na eksploatowanym odcinku II linii metra.
 - Projekty dotyczące wibroizolacji torowisk tramwajowych w Warszawie (Balzola sp. z o.o., Progrej sp. z o.o.) oraz Krakowie – KST IV (odcinek tunelowy i pozatunelowy – (Arcadis sp. z o.o.):
 - Projekt wibroizolacji torowiska przy ul. Gagarina w Warszawie;
 - Dokumentacja projektowa trasy tramwajowej od Dworca Zachodniego do ul. Grójeckiej w Warszawie;
 - Dokumentacja projektowa trasy tramwajowej na Gocław w Warszawie.
 - Projekty dotyczące drgań od pociągów w tunelach w Łodzi (PBDiM sp. z o.o., Metroprojekt sp. z o.o., ZNTK sp. z o.o.):
 - Analiza wpływu drgań i projekt rozwiązań minimalizujących ich oddziaływanie dla tunelu dalekobieżnego w Łodzi;
 - Ekspertyza techniczna zabytкового budynku kolejowego w Katowicach Szopienicach;
 - Kompleksowa ocena wpływu drgań generowanych w tunelu kolejowym na konstrukcję budynków oraz ludzi wraz z projektowaniem rozwiązań minimalizujących wpływy dynamiczne w ramach inwestycji Łódzkiego Węzła Kolejowego.
- Dzięki realizacji wymienionych projektów Katedra Mechaniki Budowli i Materiałów zdobyła bogate doświadczenie, przyczyniając się istotnie do rozwoju zrównoważonego transportu miejskiego oraz bezpieczeństwa użytkowania infrastruktury transportowej w Polsce.

4. Podsumowanie

Działalność Katedry Mechaniki Budowli i Materiałów na przestrzeni lat pokazuje jej znaczącą rolę w rozwoju wiedzy technicznej oraz innowacyjnych rozwiązań dla przemysłu transportowego i infrastruktury miejskiej. Realizowane projekty, zarówno w zakresie metra, tramwajów, jak i transportu kolejowego potwierdzają wysoki poziom ekspertyz technicznych, przyczyniających się do poprawy jakości życia mieszkańców oraz ochrony obiektów budowlanych. Bogate doświadczenie kadry naukowej katedry pozwala na efektywne łączenie teorii z praktyką, co przekłada się na trwałe relacje z przemysłem oraz uznanie na arenie krajowej i międzynarodowej.

Główne wnioski:

- współpraca nauki z przemysłem zapewnia praktyczne wdrożenie najnowszych osiągnięć technicznych;
- realizowane projekty unijne znacząco wpływają na poprawę jakości życia mieszkańców i bezpieczeństwo infrastruktury;
- doświadczenie zdobywane w projektach pozwala na dalszy rozwój innowacyjnych technologii w dziedzinie budownictwa i transportu;
- wysoka jakość wykonywanych ekspertyz oraz pomiarów potwierdza pozycję katedry jako wiarygodnego i cenionego partnera zarówno krajowego, jak i międzynarodowego.

Pasja inżynierska wsparta innowacyjnością – Katedra Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów L-9

Engineering passion backed by innovation – Chair of Geotechnics and Strength of Materials L-9

dr inż. Janusz P. Kogut (ORCID: 0000-0001-5728-1809), Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1422

Streszczenie: Katedra Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów skupia zespół specjalistów prowadzących nowoczesne badania i kształcących inżynierów w zakresie geotechniki, mechaniki gruntów, wytrzymałości materiałów i geologii. Posiada dobrze wyposażone laboratoria i cieszy się uznaniem studentów, także tych zagranicznych. Prace prowadzone obecnie w katedrze obejmują: ocenę jakości podłoża budowlanego, analizy drgań fundamentów, projektowanie obiektów na terenach górniczych, monitoring zachowania gruntów i konstrukcji, badania terenowe i laboratoryjne gruntów, a także zagadnienia związane ze statecznością podłoża, zastosowaniem geosyntetyków, fundamentowaniem, głębokimi wykopami i posadowieniem obiektów nietypowych.

Słowa kluczowe: mechanika gruntów, fundamentowanie, wytrzymałość materiałów.

Abstract: The Department of Geotechnics and Strength of Materials brings together a team of specialists conducting advanced research and educating engineers in the fields of geotechnics, soil mechanics, strength of materials, and geology. It is equipped with well-developed laboratories and is highly regarded by both domestic and international students. Current research conducted at the Department includes: assessment of soil quality for construction purposes, analysis of foundation vibrations, design of structures in mining areas, monitoring of soil and structural behaviour, field and laboratory soil testing, as well as issues related to soil stability, the use of geosynthetics, foundation engineering, deep excavations, and the foundation of unconventional structures.

Keywords: soil mechanics, foundations, strength of materials.

1. Wprowadzenie

Katedra Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Krakowskiej wywodzi swoje tradycje z Instytutu Mechaniki Budowli, funkcjonującego na Wydziale Inżynierii Lądowej, w skład którego przez wiele lat wchodziła, tworząc dwie jednostki: Katedrę Wytrzymałości Materiałów i Katedrę Współdziałania Budowli z Podłożem. Dzisiaj katedra dysponuje dynamicznym zespołem naukowców i ekspertów, którzy łączą pasję do inżynierii z innowacyjnymi rozwiązaniami w zakresie geologii, geotechniki, mechaniki gruntów i badań wytrzymałościowych. Dzięki nowoczesnemu zapleczu laboratoryjnemu oraz interdyscyplinarnemu podejściu kształcimy wysokiej klasy przyszłych inżynierów i prowadzimy badania na najwyższym poziomie. Nasze atuty są szczególnie doceniane przez studentów zagranicznych studiujących w ramach programu ERASMUS. W katedrze prowadzone są różnorodne prace z geologii i geotechniki inżynierskiej, obejmujące m.in. analizy materiału gruntowego w zakresie obejmującym ocenę jakości podłoża do celów budowlanych, ze szczególnym uwzględnieniem tzw. warunków skomplikowanych i trzeciej kategorii geotechnicznej, a także analiza drgań fundamentów oraz projektowanie budowli na terenach objętych eksploatacją górniczą. Badania obejmują również pomiary

zachowania podłoża gruntowego i obiektów budowlanych, w tym także możliwości opracowania i wykonania dedykowanych systemów monitoringu, obejmujących obserwację parametrów statycznych i dynamicznych, stosunków wodnych oraz osiadań podłoża i konstrukcji, a także badania polowe i laboratoryjne materiału gruntowego wykorzystywanego w budownictwie ogólnym czy przemysłowym. Prace te dotyczą wszelkiego rodzaju niestabilnych zachowań podłoża, a w szczególności: analizy stateczności podłoża i konstrukcji, zastosowania geosyntetyków i innych materiałów w stabilizacji podłoża i konstrukcji szlaków komunikacyjnych, oceny pracy kolumn i pali fundamentowych czy ścianek szczelnych i szczelinowych, zwłaszcza na terenach zagrożonych działaniem wód oraz terenach górniczych, głębokie wykoppy oraz posadowienie obiektów nietypowych. Zakres prac badawczych katedry obejmuje również badania laboratoryjne i terenowe statycznych i dynamicznych parametrów podłoża gruntowego, w tym w aparacie trójosiowego ściskania wraz z użyciem elementów bender, także z zastosowaniem sondowań statycznych (CPT, CPTU) i dynamicznych (SCPT, SCPTU), związków naprężenie-odkształcenie, modułów ścisłości pierwotnej i wtórnej, granic Atterberga, analizy granulometrycznej, badanie pęcznienia i zapadowości, określenie zawartości części organicznych, wilgotności optymalnej

oraz gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, a także agresywności wody, analizy, obliczenia i badania statyczne i dynamiczne fundamentów konstrukcji, w tym fundamentów pod maszyny, diagnostykę fundamentów budowli, w tym budowli przemysłowych, weryfikacja założeń projektowych w odniesieniu do panujących warunków gruntowo-wodnych oraz konsultacje różnorodnych problemów związanych z podłożem wykonywane zgodnie z obowiązującymi normami krajowymi i europejskimi.

Wieloletnim kierownikiem katedry jest prof. Elżbieta Pilecka, uznany ekspert w zakresie geotechniki, geologii inżynierskiej i geofizyki. W pracy naukowej zajmuje się problematyką tras komunikacyjnych w aspekcie ich nośności i stateczności. Opracowania pod jej kierunkiem wykonywano na zlecenie przedsiębiorstw projektowych i produkcyjnych oraz instytucji administracji państwowej i samorządowej (np. budowa autostrady A1, tunelu drogowego w Lalikach, drogi ekspresowej S7, linii kolejowej Podłęże – Piekietko). Brała udział w zespołach eksperckich m.in. z firmami: INGEO Sp. z o.o., NDI S.A. czy Budimex S.A, gdzie analizowano różne rodzaje wzmocnień w aspekcie bezpieczeństwa czy stateczności. Jest też promotorem szeregu prac doktorskich i innych, w szczególności w aspekcie podwyższania prędkości eksploatacyjnych na kolei, gdzie ważną rolę odgrywają zagadnienia wzmocnień w celu zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia osuwisk i uzyskania dopuszczalnych osiadań nasypów. Prof. E. Pilecka jest inicjatorką cyklu konferencji naukowych BIG – Budownictwo-Infrastruktura-Górnictwo. W katedrze realizowane są badania naukowe o różnicowanej tematyce, gdzie wspólnym obszarem jest geotechnika i wytrzymałość materiałów. Poniżej opisano niektóre z rozwijanych aktualnie tematów.

2. Badania mechanicznych właściwości podłoża i monitoring

W tych badaniach katedra skupia się na określeniu zmienności parametrów geotechnicznych w odniesieniu do granulometrii i wilgotności gruntów oraz stanów naprężeń wywołanych obciążeniami zewnętrznymi. Prowadzone prace obejmują charakterystyki wytrzymałościowe oraz wartości parametrów fizyko mechanicznych i przepuszczalności gruntów oraz materiałów antropogenicznych i odpadowych o naruszonej i nienaruszonej strukturze, również określenie wpływu nawodnienia gruntu na przebieg charakterystyk ścinania oraz wartości parametrów geotechnicznych, w typowych badaniach (np. bezpośredniego ścinania czy trójosiowego ściskania). Przebadane materiały oraz ich charakterystyki można stosować w budownictwie – np. jako elementy konstrukcji nasypów czy wałów przeciwpowodziowych. W katedrze wykonywane są też badania z użyciem naziemnego skanera laserowego w celu monitorowania budowli ziemnych, co dało możliwość stworzenia oryginalnej metodyki pomiarowo-interpretacyjnej dla modeli różnicowych. Inwentaryzacja danej budowli daje odwzorowanie rzeczywistej powierzchni, która

może zostać zaimplementowana do analiz numerycznych. Bazując na modelach numerycznych, opracowano w katedrze metodykę uzyskiwania wartości krytycznych dla monitorowania nasypów budowli liniowych. Prace zapoczątkowane w doktoracie dr. Tomasza Manterysa są kontynuowane przez prof. E. Pilecką, dr. Janusza Kogutę, dr. Dariusza Szwarrowskiego oraz dr. Mirosławę Bazarnik. Aktualnie trwają badania Kopca Tadeusza Kościuszki w Krakowie.

3. Rozwijanie metod numerycznych w geotechnice oraz nowych materiałów i technologii

W katedrze rozwijane są zaawansowane narzędzia do komputerowej analizy metodą elementów skończonych (MES) w programie ZSoil w zagadnieniach współpracy konstrukcji z podłożem. Koordynatorem tych badań jest prof. Andrzej Truty, a prace badawcze realizuje także dr Michał Grodecki. Prof. A. Truty jest jednym z głównych architektów tego uznanego systemu obliczeniowego, który znajduje szerokie zastosowanie w projektowaniu zaawansowanych konstrukcji inżynierskich na całym świecie. Badania obejmują opracowanie stabilnych sformułowań MES dla zagadnienia konsolidacji ośrodka porowatego, zarówno w pełni, jak i częściowo nasyconego wodą, rozwój nielokalnego sformułowania MES w analizie fundamentów zespolonych typu płyta-pale/barety, gdzie elementy te są modelowane jako belki zanurzone arbitralnie w siatce MES kontinuum materialnego 3D, a także opracowanie nowej wersji modelu konstytutywnego Hardening Soil-Brick, szeroko aplikowanego w praktyce geoinżynierskiej. Corocznie organizowana jest konferencja „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, która odbywa się w Korbiewicach. W 2025 r. miała miejsce już 35. edycja tego wydarzenia. Towarzyszyło jej pięć edycji „Warsztatów modelowania komputerowego w geotechnice”, co mocno przyczyniło się do rozwoju potencjału wielu firm projektowo-wykonawczych. Kierujący konferencją prof. A. Truty jest organizacyjnie wspierany przez zespół pracowników Katedry. Badania i prace wdrożeniowe prof. Trutego mają istotny wpływ na rozwój metod analizy geotechnicznej oraz praktykę inżynierską zarówno w Polsce, jak i zagranicą. Praktyczną implementacją w programie ZSoil zajmuje się dr M. Grodecki. Opracował on metodologię badań doświadczalnych i symulacji numerycznych pracy spleatanych siatek gabionowych wraz z metodologią modelowania numerycznego murów oporowych z gabionów. Rozwijane są też zagadnienia zewnętrznego wzmocnienia i naprawy konstrukcji inżynierskich. Na szczególną uwagę zasługują te, związane z zastosowaniem złączy podatnych, a koordynuje je prof. PK Bogusław Zajac. Związane są z zagadnieniami reologii wzmocnień konstrukcji oraz trwałości połączeń w zmiennych warunkach środowiskowych. Rozpatrywane są w nich wpływy temperatury oraz czynników zewnętrznych (np. w postaci zmiennych warunków fizyko-chemicznych) na elementy połączeń konstrukcyjnych. Wiąże się to z problemami naprawy

i wzmacnianiem konstrukcji. We współpracy międzynarodowej z badaczami z Portugalii, Włoch i Grecji rozwijane są zagadnienia modelowania połączeń dla materiałów hipersprężystych. Prowadzi się również badania rozciągania i ściskania w podwyższonej temperaturze (do 100°C) dla różnych prędkości odkształcenia oraz badania zachowania się reologicznego polimerów, które umożliwiają wyznaczenie parametrów mechanicznych w funkcji temperatury. Jako wzmocnienia stosuje materiały kompozytowe i włókniste, m.in. z włókien węglowych, szklanych, bazaltowych i naturalnych (np. z bambusa i lnu). Prof. B. Zając jest współautorem szeregu zgłoszeń patentowych, dotyczących wykonywania nośnych złączy naprawczych o zadanych parametrach mechanicznych. Zostały one skomercjalizowane, a ich wdrażaniem zajmuje się spin-off – FlexAndRobust Systems.

4. Prace naukowe dotyczące podstaw projektowania i propagacji drgań w podłożu

W ramach prac katedry prowadzone są badania dotyczące oceny parametrów fizyko mechanicznych podłoża gruntowego na potrzeby posadowienia obiektów budowlanych. W badaniach naukowych wykorzystuje się nowoczesne techniki in situ – sondowania statyczne i dynamiczne czy dylatometr płaski Marchettiego z modułem sejsmicznym SDMT. W połączeniu z wierceniami pozwalają m.in. na szczegółową ocenę profilu geologicznego, identyfikację osłabień czy powierzchni poślizgu. Pozwalają również na wyznaczanie parametrów gruntów słabonośnych w warunkach in situ, co jest istotne ze względu na ograniczenia techniczne związane z poborem próbek gruntu z warstw słabonośnych, gdyż wykonywanie testów laboratoryjnych dla takich gruntów jest utrudnione i może też być obciążone dużym błędem. W ramach tych prac wykonuje się też kalibracje parametrów pozyskiwanych w warunkach in situ z badaniami laboratoryjnymi, w szczególności dotyczy to oceny niedrenowanej wytrzymałości na ścinanie s_u . Innym zagadnieniem jest ocena parametrów wytrzymałościowych gruntów drobnoziarnistych dla zaawansowanych modeli konstytutywnych gruntu (np. Hardening Soil – small – HSs). Badania te są prowadzone w aparacie trójosiowego ściskania, zarówno z pełnym, jak i zatrzymanym drenażem. Uzyskujemy tu efektywne parametry wytrzymałościowe, jak również parametry odkształceniowe. Badania terenowe w katedrze koordynuje dr Rafał Gwóźdź, a prace kalibracyjne



Rys. 1. Aparat trójosiowego ściskania będący na wyposażeniu Laboratorium Katedry Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Krakowskiej

w laboratorium prowadzi dr Jakub Zięba. Aktualizacją wartości normowych i wytycznych do projektowania geotechnicznego zajmuje się dr Grażyna Gaszyńska-Freiwald. Badaniami nad wpływem plastyczności na tempo degradacji pełzania gruntów wykazujących strukturę dla stanu normalnie skonsolidowanego zajmuje się dr Bałtomej Olek. Za podstawowy cel tych obrano zbadanie trendu zmian współczynnika ściśliwości wtórnej ze zmianami w gęstości gruntu konsolidowanego. Model podwójnie logarytmiczny opisujący zjawisko degradacji pełzania zaaplikowano tu po raz pierwszy do gruntów o naturalnej strukturze. W katedrze prowadzone są też badania i symulacje propagacji drgań w gruncie. Tematyką tą zajmują się przed wszystkim prof. E. Pilecka, dr J. Kogut, dr D. Szwarekowski oraz dr J. Zięba. Badania laboratoryjne prowadzone są m.in. przy użyciu elementów bender. Intensywny rozwój inżynierii transportowej powoduje, że po-

jazdy stanowią główne źródło drgań mających negatywny wpływ na budynki i komfort ludzi w nich przebywających. Dr D. Szwarekowski analizował sposoby redukcji drgań transportowych m.in. przez przegrody wibroizolacyjne wykonane z różnych materiałów. Jego prace obejmują m.in. badania terenowe i laboratoryjne ośrodka gruntowego, a także projekt mieszaniny gruntuobetonu z dodatkiem odpadów gumowych pochodzących z recyklingu. Analizy MES wykonano na wieloparametrycznym modelu konstytutywnym ośrodka gruntowego w zakresie małych odkształceń. Umożliwiają one ocenę skuteczności przegród w redukcji maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań w niskich częstotliwościach. Koordynując tę tematykę, dr J. Kogut



Rys. 2. Sonda statyczna Pagani pracująca w terenie

zajmuje się m.in. problematyką propagacji drgań komunikacyjnych i ich wpływu na obiekty posadowione w podłożu. Opracował metodykę pomiarowo-interpretacyjną, wykorzystywaną zarówno w badaniach interakcji konstrukcji z podłożem gruntowym, jak i stateczności układów konstrukcja-podłoże. Wprowadził też innowacyjną technikę DIC w badaniu własności prób gruntowych. Tematykę tę rozwijano w szeregu prac naukowo-badawczych (m.in. studium wykonalności metra w Krakowie, zabezpieczenie linii kolejowej nr 99, Trasa Łagiewnicka). W pracach eksperckich współpracowano m.in. z MP Mosty S.A., PKP PLK, PUT Intercor, gdzie analizowano kwestie dotyczące projektowania (m.in. na terenach górniczych) czy określenia przyczyn awarii. Dr J. Kogut dodatkowo brał udział w pracach wykopaliskowych i archeologicznych (Egipt, Ameryka Północna). Dr Małgorzata Janus-Michalska bada zmiany w mikrostrukturze auksetycznego materiału komórkowego pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Zmiany te są następstwem dużych ugięć i wybożenia beleczek tworzących mikrostrukturę. Studium deformacji odpowiadającej testowi ściskania zostało przeprowadzone przy użyciu elementów belkowych Timoshenki. Obliczenia prowadzą do otrzymania ścieżek nieliniowych oraz wyznaczenia krytycznych wartości naprężeń i odpowiadających im odkształceń. Zagadnieniami rozwoju uszkodzeń i pęczaniem w materiałach polikrystalicznych zajmuje się dr Krzysztof Nowak. Modele te działają w dwóch skalach: mikro i makro. W skali mikro modele wykorzystują tzw. automaty komórkowe, które umożliwiają opis rozwoju uszkodzeń. Wyniki makroskopowe, wymagane są do porównania z wynikami eksperymentalnymi i do analizy konstrukcji inżynierskich w MES, gdzie łączy się modele uszkodzeń automatów komórkowych z modelami odkształceń zaimplementowanych w układzie elementów skończonych, przy użyciu podejścia nielokalnego, w celu realizacji wieloskalowego modelu elementów skończonych automatów komórkowych.

5. Badania materiałów antropogenicznych i problematyka zabezpieczania osuwisk

Katedra realizuje badania przydatności materiałów antropogenicznych jako materiału do wbudowywania w istniejące nasypy drogowe lub kolejowe albo wały przeciwpowodziowe. Polegają one na określeniu podstawowych cech fizycznych i wytrzymałościowych. Dr J. Zięba analizował zależności między parametrami wyznaczonymi w laboratorium, m.in. z użyciem aparatu trójosiowego ściskania, a wynikami badań sondą statyczną z pomiarem ciśnienia wody porowej (CPTU), m.in. materiałów odpadowych z obszaru Białych Mózg. W katedrze przeprowadzono także badania możliwościami wykorzystania odpadów górniczych z kopalń. Dr Justyna Morman-Wątor zaproponowała wykorzystanie odpadów górniczych do budowy wałów przeciwpowodziowych pełniących również funkcję drogi. Badała je też z dodatkami różnych materiałów spajających. W katedrze realizowana jest też problematyka zabezpieczania osuwisk drogowych i kolejowych. Dr Magdalena



Rys. 3. Zespół Katedry Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Krakowskiej podczas spotkania noworocznego

Moskal zajmuje się m.in. nowatorską metodyką prognozowania wpływu czynników geotechniczno-konstrukcyjnych na stateczność osuwisk na terenie fliszu karpackiego. Metodyka ta bazuje na metodzie sztucznej inteligencji w postaci zastosowania sieci neuronowych i modelowania numerycznego. Opracowany przez nią algorytm neuronowy stanowi przydatne narzędzie dla projektantów oraz poprawia jakość podejmowanych decyzji projektowych w zakresie infrastruktury drogowej na terenach osuwiskowych.

6. Projektowanie konstrukcji hydrotechnicznych oraz działania promocyjne

W odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie rynku na specjalistów w dziedzinie budownictwa hydrotechnicznego katedra prowadzi obecnie kolejną edycję studiów podyplomowych – Projektowanie konstrukcji hydrotechnicznych i geotechnicznych. Skierowane są one do osób, które chcą poszerzyć swoją wiedzę i podnieść kwalifikacje w zakresie projektowania takich konstrukcji, z uwzględnieniem aktualnych przepisów prawa. Kierownikiem studium jest dr G. Gaszyńska-Freiwald. W katedrze realizowane były też granty mające na celu zachęcenie uczniów szkół podstawowych do zagłębienia się w podstawy zagadnień inżynierskich. Odniosły one ogromny sukces, choć owoców tych prac należy spodziewać się dopiero w przyszłości.

7. Podsumowanie

Katedra Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów L-9 to dynamiczny ośrodek naukowy, w którym innowacja spotyka się z praktyką. Zespół doświadczonych ekspertów i pasjonatów inżynierii prowadzi badania na najwyższym poziomie w dziedzinie geotechniki, mechaniki gruntów oraz wytrzymałości materiałów. Dysponujemy nowoczesnym zapleczem laboratoryjnym, które pozwala na realizację zaawansowanych projektów badawczych oraz kształcenie przyszłych inżynierów gotowych na wyzwania współczesnego budownictwa i inżynierii lądowej. Interdyscyplinarne podejście i ścisła współpraca z przemysłem sprawiają, że nasze działania mają realny wpływ na rozwój geotechniki.

Inżynieria obliczeniowa – Katedra Technologii Informatycznych w Inżynierii L-10

Computational engineering – Chair for Computational Engineering L-10

prof. dr hab. inż. Witold Cecot (ORCID: 0000-0002-3257-5226), dr hab. Irena Jaworska, prof. uczelni (ORCID: 0000-0003-4123-5570), dr hab. inż. Jan Jaśkowicz, prof. uczelni (ORCID: 0000-0002-4047-1339), dr inż. Jacek Magiera (ORCID: 0000-0003-3710-9416), dr hab. inż. Sławomir Milewski, prof. uczelni (ORCID: 0000-0003-4967-9061), prof. dr hab. inż. Jerzy Pamin (ORCID: 0000-0002-9611-391X), dr hab. inż. Marek Słoński, prof. uczelni (ORCID: 0000-0001-8888-9112), dr hab. inż. Adam Wosatko, prof. uczelni (ORCID: 0000-0002-7763-1164), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1423

Streszczenie: Celem artykułu jest zapoznanie czytelników z kierunkami prac naukowych prowadzonych w Katedrze Technologii Informatycznych w Inżynierii. Nasze prace dotyczą rozwijania zaawansowanych modeli zjawisk i procesów oraz efektywnych i oryginalnych metod obliczeniowych.

Słowa kluczowe: inżynieria obliczeniowa, modelowanie komputerowe, mechanika, BIM.

Abstract: The paper aims to familiarize readers with the directions of scientific research conducted at the Chair for Computational Engineering. Our research focuses on the development of advanced models of phenomena and processes as well as efficient and original computational methods.

Keywords: computational engineering, computer modeling, mechanics, BIM.

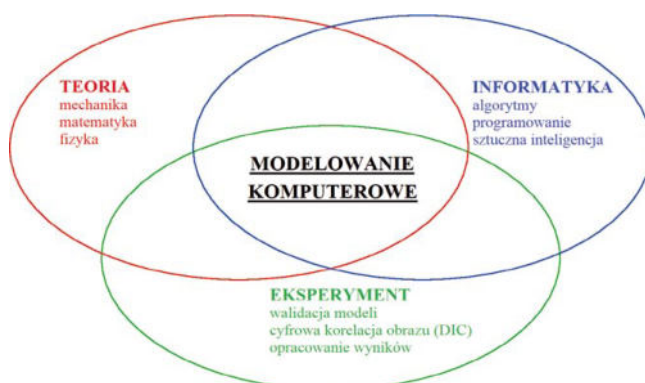
1. Wprowadzenie

Modelowanie i symulacje komputerowe stają się kluczowymi technikami wspierającymi przemysł XXI wieku w zakresie doskonalenia produktów oraz obniżania kosztów ich realizacji. Celem naszych badań jest rozwijanie modelowania komputerowego w inżynierii (*computational engineering*), czyli metod oraz narzędzi służących do analizy i zrozumienia złożonych zjawisk lub procesów występujących w praktyce inżynierskiej. Nasze prace łączą kilka obszarów nauki przedstawionych schematycznie na rysunku 1. Warto dodać, że tematyka modelowania komputerowego jest również w kręgu zainteresowań Komitetu Mechaniki PAN, w ramach którego od ok. 30 lat, z małą przerwą, działa w kolejnych kadencjach bardzo liczna Sekcja Metod Obliczeniowych. Na jej przewodniczących zawsze do tej pory wybierano pracownika z zespołu obecnej Katedry L10.

Główne kierunki naszych badań są opisane w dalszych rozdziałach.

2. Rozwijanie metody elementów skończonych wysokiego rzędu

W większości zastosowań w MES korzysta się z pierwszego, ewentualnie drugiego stopnia aproksymacji ($p = 1, p = 2$). W naszych pracach stosujemy, zyskującą coraz większą popularność,



Rys. 1. Inżynieria obliczeniowa (*computational engineering*) w Katedrze L10; obszary wiedzy wykorzystywane do rozwijania modeli i symulacji komputerowych

aproksymację wysokiego stopnia ($p = 3, 4, \dots$). Korzystamy z takiej aproksymacji np. w zadaniach homogenizacji, w których na podstawie analizy w skali mikro, uwzględniającej niejednorodność mikrostruktury, można przewidywać makroskopowe jednorodne parametry materiału [1–3].

Rozwijamy również aproksymację dwupolową, w której przemieszczenia i naprężenia są obliczane niezależnie. Dla zapewnienia stabilności takiego podejścia korzystamy z zaawansowanej metodologii *Discontinuous Petrov Galerkin* (DPG) [4]. Wszelkie obliczenia przeprowadzamy, korzystając z własnego

oprogramowania albo własnych modyfikacji kodu źródłowego HP3D rozwijanego przez zespół prof. L. Demkowicza z Oden Institute for Computational Engineering and Sciences, University of Texas at Austin, USA.

Kolejnym rozwijanym podejściem z wysokim stopniem aproksymacji jest *Orthogonalized Finite Element Method* (OFEM) [5] korzystająca z dwupoziomowej ortogonalizacji: najpierw na poziomie pojedynczych elementów skończonych, a następnie na poziomie superelementów składających się ze zbiorów elementów skończonych. Dzięki temu macierz globalnego układu równań jest znacznie mniejsza niż w standardowej metodzie elementów skończonych, co pozwala na przyspieszenie obliczeń.

Nasze prace nad rozwijaniem MES wysokiego stopnia znalazły uznanie i jesteśmy regularnie zapraszani na dwie cykliczne, międzynarodowe konferencje, typu workshop. Są to *High Order Finite Element and Isogeometric Methods* oraz *Minimum Residual Methods*.

3. Bezsiatkowa MRS

Jako alternatywne podejście do MES, już od lat 70. XX wieku, rozwijano tzw. metody bezsiatkowe (*meshless methods*). Jedną z najstarszych metod – bezsiatkowa metoda różnic skończonych BMRS – powstała w krakowskim zespole prof. Janusza Orkisa na PK [6]. Jest to uogólniona wersja metody różnic skończonych MRS – metody o wiele starszej niż MES, ale mającej swoje ograniczenia w najprostszej postaci.

Bezsiatkowa/Uogólniona MRS (MFDM/GFDM – *Meshless/Generalized Finite Difference Method*) jest jedną z podstawowych metod bezsiatkowych, które cechują się brakiem konieczności generowania siatki obliczeniowej. W przeciwieństwie do MES, gdzie analiza bazuje na podziale geometrycznego obszaru zagadnienia na elementy skończone, metody bezsiatkowe bazują jedynie na punktach dyskretyzacji, które można z łatwością modyfikować, co pozwala na większą elastyczność w modelowaniu złożonych i dynamicznie zmieniających się geometrii. Podstawową cechą tych metod jest możliwość aproksymacji nieznannej funkcji, opisującej rozwiązanie zagadnienia, na podstawie zbioru rozproszonych punktów, bez struktury siatki (jak w MES). Przykładami komercyjnych programów wykorzystujących techniki różnicowe lub bezsiatkowe są amerykański LS-DYNA, stosowany m.in. w analizach dynamicznych zderzeń, oraz niemiecki Meshfree, rozwijany na potrzeby badań naukowych, komercyjnych i złożonych analiz numerycznych. Metody bezsiatkowe, choć mniej popularne niż MES, znajdują zastosowanie tam, gdzie tradycyjne podejścia napotykają trudności – w analizie pęknięć, dużych deformacji oraz zagadnieniach wieloskalowych [7]. W ostatnich latach BMRS jest rozwijana zwłaszcza pod kątem rozszerzeń wyższego rzędu, które zapewniają rozwiązanie wysokiej jakości [8]. Równie dobrze sprawuje się ona w połączeniu z MES oraz z podejściami stochastycznymi na różnych etapach analizy [9]. Ich rozwój i implementacja wymagają zaawansowanej wiedzy z zakresu analizy numerycznej, ale mogą stanowić cenne narzędzie w przypadku wielu problemów inżynierskich.

4. Modele obliczeniowe dla nieliniowej mechaniki materiałów

Kolejnym kierunkiem badań jest analiza nieliniowa MES w mechanice materiałów. Obszarem zainteresowań są modele z tzw. regularyzacją, które cechują się poprawnym odtworzeniem zjawisk osłabienia materiału i lokalizacji odkształceń poprzez parametr reprezentujący mikrostrukturę materiału, nazywany wewnętrzną skalą długości. Do symulacji materiałów sprężysto-plastycznych i dużych deformacji można zastosować gradientowy model termomechaniczny, opracowany w pakiecie ACE for Mathematica [10]. We współpracy z TU Dortmund w Niemczech przeprowadzono doświadczenia rozciągania próbek stopu aluminium AW5083 z obserwacją tzw. pasm Luedersa i efektu Portevin-Le Chatellera. Do symulacji zaproponowano model termo-lepko-plastyczny [11].

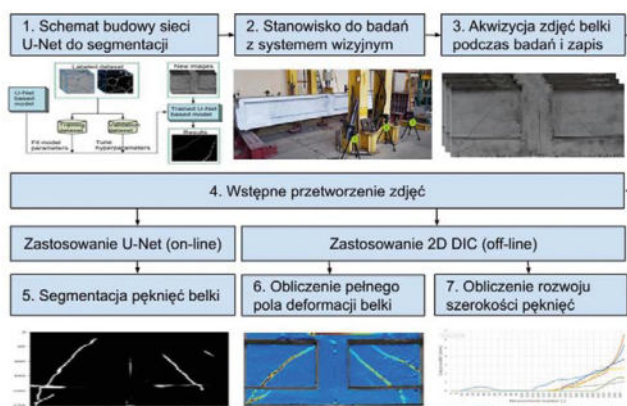
Innym obszarem badań jest modelowanie zarysowania betonu. Pierwszym modelem, dostępnym w pakiecie ABAQUS jako *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), jest plastyczność z uwzględnieniem członu lepkiego. We współpracy z University of Waterloo w Kanadzie przeprowadzono symulację zjawiska przebiccia w połączeniu płyt-słup [12]. Drugim jest gradientowy model mechaniki uszkodzenia, oprogramowany w FEAP, w którym zastąpiono stałą wewnętrzną skalę długości tzw. funkcją aktywności gradientów [13].

Osobnym aspektem badań jest modelowanie korozji prętów zbrojenia w utołinie betonowej, gdzie zastosowano program ABAQUS i także model CDP oraz rozpatrywano różne warianty przekrojów żelbetowych i rozwoju korozji [14].

W grupie pracowników Katedry L-10 opracowano także monografię [15], która dotyczy analizy tarcz, płyt i powłok, z licznymi przykładami rozwiązań numerycznych dla takich konstrukcji.

5. Integracja metody cyfrowej korelacji obrazu ze spłotowymi sieciami neuronowymi w analizie odkształceń prefabrykowanych belek żelbetowych

Cyfrowa korelacja obrazu (DIC) jest techniką optyczną umożliwiającą bezkontaktowy pomiar pól przemieszczeń na powierzchni badanych elementów. W połączeniu ze spłotowymi sieciami neuronowymi metoda ta zyskuje na efektywności, szczególnie w kontekście monitorowania i oceny stanu technicznego elementów żelbetowych. Spłotowe sieci neuronowe dzięki zdolności do automatycznej ekstrakcji cech pozwalają na efektywne wykrywanie i klasyfikację uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych oraz analizę ewolucji odkształceń w czasie. Monitorowanie zmian pola odkształceń pozwala na prognozowanie potencjalnych miejsc uszkodzeń i ocenę trwałości konstrukcji (rys. 2). W badaniach opisanych w artykułach [16, 17] zastosowano połączenie DIC z sieciami spłotowymi do oceny rozwoju pęknięć w prefabrykowanych żelbetowych dźwigarach. Wykorzystanie tej zintegrowanej metody pozwoliło na bardziej precyzyjne śledzenie inicjacji i propagacji pęknięć pod wpływem



Rys. 2. Schemat postępowania do oceny rozwoju pęknięć w belkach żelbetowych z wykorzystaniem splotowych sieci neuronowych i metody DIC

obciążeń eksploatacyjnych, co jest kluczowe dla oceny bezpieczeństwa i trwałości konstrukcji.

6. Building Information Modelling w Katedrze Technologii Informatycznych w Inżynierii

Technologia *Building Information Modelling* stała się w ostatnich dwóch dekadach jednym z głównych frontów rozwoju nie tylko metod komputerowych w inżynierii lądowej, ale i cyfryzacji branży budowlanej jako gałęzi przemysłu. Katedra Technologii Informatycznych w Inżynierii była jednym z liderów wdrażania BIM zarówno w edukacji, jak i wsparcia jej wdrażania w projektach budowlanych w Polsce. Poniżej kilka faktów i dat z historii BIM na WIL PK.

Początki nauczania BIM w Katedrze L-10 sięgają roku 2002, wraz z wprowadzeniem do dydaktyki oprogramowania Architectural Desktop. W 2007 roku zostanie ono zastąpione oprogramowaniem Revit. W roku 2010 Politechnika Krakowska staje się partnerem edukacyjnym firmy Autodesk i zarazem powstaje Centrum Kompetencji Autodesk przy PK – jednostka dla prowadzenia szkoleń i certyfikacji oprogramowania. Rok 2010 to także pierwszy kurs BIM-u dla studentów i pracowników naukowych z Afganistanu. Od roku 2012, pod szyldem CKA PK i WIL PK, startują cykliczne konferencje „Dzień BIM na PK”. Rok 2015, Katedra L-10 otwiera specjalność BIM na II stopniu studiów magisterskich. W roku 2017 i 2018 WIL PK jest organizatorem ogólnopolskich konferencji: BIM dla inwestorów publicznych (2017 r.) i Sympozjum „BIM w edukacji” (2017 i 2018 r.). W 2019 roku otwarte zostają studia podyplomowe „Koordynator BIM”.

Wsparcie dla wdrażania BIM w Polsce to także praca w ciałach eksperckich (np. V4 BIM Task Group Grupy Krajów Wyszehradzkich, Komitecie BIM PZITB, Grupie Roboczej ds. BIM przy Ministrze Rozwoju i Technologii, Komitecie Technicznym Cyfryzacji przy Ministerstwie Infrastruktury i Polskim Kongresie Drogowym), udział w projektach BIM i liczne publikacje (ponad 50 pozycji). Ważniejsze pozycje podano w bibliografii [18–22].

7. Podsumowanie

Przedstawione w artykule kierunki badawcze, rozwijane w Katedrze Technologii Informatycznych w Inżynierii, mieszczą się w ramach najważniejszych, aktualnie prowadzonych na świecie prac naukowych w zakresie inżynierii obliczeniowej (*computational engineering*) i będą nadal prowadzone, uwzględniając coraz to nowe wyzwania związane z modelowaniem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cecot W., Oleksy M., High order FEM for multigrid homogenization, *Computers and Mathematics with Applications* 70, 2015, str. 1370–1390
- [2] Klimczak M., Cecot W., Towards asphalt concrete modeling by the multi-scale finite element method, *Finite Elements in Analysis and Design* 171, 2020, str. 1–13
- [3] Dryzek M., Cecot W., The iterative multiscale finite element method for sandwich beams and plates, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 122, 2021, str. 6714–6735
- [4] Oleksy M., Cecot W., Rachowicz W., Nessel M., An improved Multiscale FEM for the free vibrations of heterogeneous solids, *Computers & Mathematics with Applications* 110, 2022, str. 110–122
- [5] Jaśkowicz J., Pluciński P., Orthogonalization in high-order finite element method, *Computers & Structures* 311, 2025, str. 107692
- [6] Orkisz J., Finite Difference Method (Part III) in the Handbook of Computational Solid Mechanics: Survey and Comparison of Contemporary Methods, M. Kleiber (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, 1998, str. 335–432
- [7] Jaworska I., Milewski S., On two-scale analysis of heterogeneous materials by means of the meshless finite difference method, *International Journal for Multiscale Computational Engineering* 14(2)2016, str. 113–134
- [8] Jaworska I., Generalization of the Multipoint meshless FDM application to the nonlinear analysis, *Computers & Mathematics with Applications* 87(3)2021, str. 1–11
- [9] Milewski S., Higher order meshless approximation applied to Finite Difference and Finite Element methods in selected thermomechanical problems, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 140, 2022, str. 300–321
- [10] Wcisło B., Pamin J., Local and non-local thermomechanical modeling of elastic-plastic materials undergoing large strains, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 109(1), 1/2017, str. 102–124
- [11] Mucha M., Rose L., Wcisło B., Menzel A., Pamin J., Experiments and numerical simulations of Lüders bands and Portevin–Le Chatelier effect in aluminium alloy AW5083, *Archives of Mechanics* 75(3), 6/2023, str. 301–336
- [12] Wosatko A., Winnicki A., Polak M.A., Pamin J., Role of dilatancy angle in plasticity-based models of concrete, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19(4), 8/2019, str. 1268–1283
- [13] Wosatko A., Pamin J., Winnicki A., Ability of localizing gradient damage to determine size effect in concrete beams, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 62(1), 4/2024, str. 193–206
- [14] German M., Pamin J., Cracking in reinforced concrete cross-sections due to non-uniformly distributed corrosion, *Materials* 16(18), 9/2023, str. 6331
- [15] Radwańska M., Stankiewicz A., Wosatko A., Pamin J., Plate and Shell Structures: Selected Analytical and Finite Element Solutions, John Wiley & Sons, 2017
- [16] Słoiński M., Assessment of Cracking Development in Concrete Precast Crane Beams Using Optical and Deep Learning Methods, *Materials* 18(4)2025, str. 731
- [17] Słoiński M., Tekieli M., 2D digital image correlation and region-based convolutional neural network in monitoring and evaluation of surface cracks in concrete structural elements, *Materials* 13(16)2020, str. 3527
- [18] Kasznia D., Magiera J., Wierzowiecki P., BIM w praktyce. Standardy, wdrożenia, case study, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2018
- [19] Magiera J., Pożarowska J., BIM wg ISO 19650, a perspektywa zamówień publicznych. Wprowadzenie, Urząd Zamówień Publicznych, Warszawa, 2025
- [20] Pożarowska J. (ed.), BIM – Innowacyjne podejście do zamówień publicznych w sektorze budowlanym, Urząd Zamówień Publicznych, Warszawa, 2022
- [21] Magiera J., Kasznia D. (ed.), BIM Standard PL, PZPB, Warszawa, 2020
- [22] Magiera J., BIM D-01. Wprowadzenie do stosowania technologii BIM w budownictwie drogowym. Seria: Wzorce i Standardy, Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa, 2022

Centrum Certyfikacji Budowlanej L-11 – Realizacja projektu MEZeroE

Construction Certification Center L-11 – Implementation of the MEZeroE project

dr inż. Aneta Nowak-Michta (ORCID: 0000-0002-8120-750X), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1424

Streszczenie: Celem działalności Centrum Certyfikacji Budowlanej jest rozszerzenie współpracy Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z przemysłem w zakresie badań i oceny właściwości wyrobów budowlanych. Kierownik centrum dr inż. Aneta Nowak-Michta koordynuje badania linii badawczej Pilot Measurement & Verification Line (PM&VL7): badania mechaniczne i trwałościowe złączy oraz ich wpływ na komfort wibroakustyczny, termiczny i mikroklimatyczny, utworzonej i przetestowanej w ramach europejskiego projektu Horizon 2020: Measuring Envelope products and systems contribute to the next generation of healthy almost Zero Energy Buildings (MEZeroE). W artykule przedstawiono główne elementy realizacji projektu MEZeroE: linię badawczą PM&VL7, żywe laboratorium Living Lab oraz platformę MEZeroE łączącą naukę z biznesem, na której PM&VL7 wraz z ośmioma liniami utworzonymi przez europejskie instytuty badawcze i uniwersytety techniczne prezentuje swoje usługi.

Słowa kluczowe: współpraca z przemysłem, projekt MEZeroE, linia badawcza PM&VL7, platforma MEZeroE.

Abstract: The aim of the Construction Certification Center is to expand cooperation between the Faculty of Civil Engineering of the Cracow University of Technology and industry in the field of research and assessment of the properties of construction products. The Head of the Centre, Ph.D., Eng. Aneta Nowak-Michta, coordinates research of the Pilot Measurement & Verification Line (PM&VL7): mechanical and durability tests of connections and their impact on vibroacoustic, thermal and microclimatic comfort, created and tested as part of the European project Horizon 2020: Measuring Envelope products and systems contribute to the next generation of healthy almost Zero Energy Buildings (MEZeroE). The article presents the main elements of the MEZeroE project: the PM&VL7 research line, the Living Lab and the MEZeroE platform combining science with business, where PM&VL7, together with eight lines created by European research institutes and technical universities, presents its services.

Keywords: cooperation with industry, MEZeroE project, PM&VL7 research line, MEZeroE platform.

1. Wprowadzenie

Historia jednostki

Centrum Certyfikacji Budowlanej (CCB) zostało utworzone w 2018 roku w celu rozszerzenia współpracy w pierw Inżynierii Lądowej (WIL) z przemysłem w zakresie badań i oceny właściwości wyrobów budowlanych. Założycielem i kierownikiem centrum od początku jest dr inż. Aneta Nowak-Michta. Obecnie CCB stanowi jednostkę odpowiedzialną za realizację usług komercyjnych zleczanych poprzez platformę MEZeroE. Kierownik koordynuje badania, a także zleca ich realizację wydziałowym, akredytowanym laboratorium oraz pracownikom badawczo-dydaktycznym WIL.

2. Realizacja projektu MEZeroE

Od stycznia 2021 roku kierownik centrum dr inż. Aneta Nowak-Michta koordynuje, utworzoną w ramach realizowanego

pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Arkadiusza Kwietnia projektu Measuring Envelope project, products and systems contributing to healthy, nearly zero-energy buildings (MEZeroE), Horizon 2020 No. 953157 [1] linię badawczą Pilot Measurement & Verification Line 7 (PM&VL7): badania mechaniczne i trwałościowe złączy oraz ich wpływ na komfort wibroakustyczny, termiczny i mikroklimatyczny.

2. Linia badawcza PM&VL7

W ramach linii badawczej PM&VL7 [2] badania realizują pracownicy 10 jednostek WIL: L-01, L-02, L-04, L-05, L-07, L-08, L-11, L-12, L-13 i L-15, którzy na potrzeby projektu MEZeroE tworzą Międzyjednostkowy Zespół Badawczy (rys. 1).

PM&VL7 została podzielona na cztery sublinie badawcze:

- sublinię mechaniczną (7.1),
- sublinię trwałościową (7.2),
- sublinię wibroakustyczną (7.3),
- sublinię termiczną (7.4).



Fot. Jan Zych

Rys. 1. Zespół PM&VL7

Linia badawcza PM&VL7 w ramach projektu MEZeroE realizuje wspólne przedsięwzięcia badawcze z naukowcami z europejskich instytutów badawczych oraz uniwersytetów technicznych, takich jak:

- Accademia Europea di Bolzano (EU-RAC), Włochy,
- Politecnico di Milano (POLIMI), Włochy,
- Acondicionamiento Tarrasense Association (LEITAT), Hiszpania,
- Universitaet Innsbruck (UIBK), Austria,
- Zavod za Gradbenistvo Slovenije (ZAG), Słowenia,
- Institut de Tecnologia de la Construc-cion de Catalunya (ITEC), Hiszpania,
- Danmarks Tekniske Universitet (DTU),
- Fundacion Tecnalia Research & Innovation (TECNALIA), Hiszpania.

Zespół PM&VL7 w ramach zadania polegającego na testowaniu linii badawczej opracował, w większości przypadków nowe lub wymagające modyfikacji procedury badawcze, wykonał 32 typy badań oraz przygotował opracowania wyników badań dla 10 wyrobów budowlanych, czterech europejskich partnerów przemysłowych:

- Membrany (rys. 4), taśmy oraz połączenia membrana-taśma-membrana włoskiej firmy Rothoblaas,
- Kurtynę oraz wsporniki elewacyjne hiszpańskiej firmy Flexbrick,
- Ramy okienne (rys. 5) oraz płyty warstwowe hiszpańskiej firmy Indresmat,
- Kompozyty, iniekcje i powłoki firmy Flex&Robust [3].

Badania zrealizowano i opracowano w oparciu o obowiązujące wymagania prawne w zakresie znakowania wyrobów znakiem CE, w standardach akredytacyjnych zgodnych z EN ISO/IEC 17025 w akredytowanych, wydziałowych laboratoriach. Zrealizowane testy nowych linii badawczych dają podstawę rozszerzenia zakresu akredytacji laboratoriów

badawczych oraz, w dalszej perspektywie, wskazują zakres działań dla centrum jako jednostki certyfikującej wyroby budowlane.

W badaniach mechanicznych oraz dynamicznych systemu elewacyjnego (kurtyn) w kierunku prostopadłym do płaszczyzny elementu badanej elewacji (rys. 2, 3) uczestniczyli przedstawiciele hiszpańskiej firmy Flexbrick: dr Pedro Casariego Vales oraz Rafael Pardo i Miguel Eduardo Lopez. Badania zostały przeprowadzone w ramach wyodrębnionej w projekcie MEZeroE sublinii mechanicznej, w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych (L-12), przy współudziale Laboratorium Badań Odształceń i Drgań Budowli (L-15).

3. Platforma MEZeroE

Zrealizowane badania w ramach zadania polegającego na testowaniu linii badawczej prezentowane są na cyfrowej

platformie usług MEZeroE [https://mezeroe-platform.eu/\[4\]](https://mezeroe-platform.eu/[4]). PM&VL7 prezentuje usługi jako jedna z dziewięciu linii badawczych. Platforma tworzy otwarty ekosystem do opracowywania, testowania i zwiększania skali inteligentnych, biopochodnych i zorientowanych na człowieka produktów elewacyjnych. Łączy infrastrukturę oraz wiedzę ośrodków akademickich i badawczych z innowacyjnymi rozwiązaniami proponowanymi przez przemysł. Została stworzona z myślą o trendach Przemysłu 4.0, szybkim podejmowaniu decyzji i zdecydowanie zorientowanym podejściu na klienta. MEZeroE towarzyszy europejskim przedsiębiorstwom, które decydują się na przyjęcie podejścia otwartych innowacji.



Fot. Jan Zych

Rys. 2. Stanowisko badawcze kurtyny Flexbrick w L-12

Fot. Jan Zych

Rys. 3. Zespół MEZeroE realizujący badania z przedstawicielami firmy Flexbrick

Rys. 4. Historia sukcesu PM&VL7 w zakresie badań membran Rothoblaas [4]

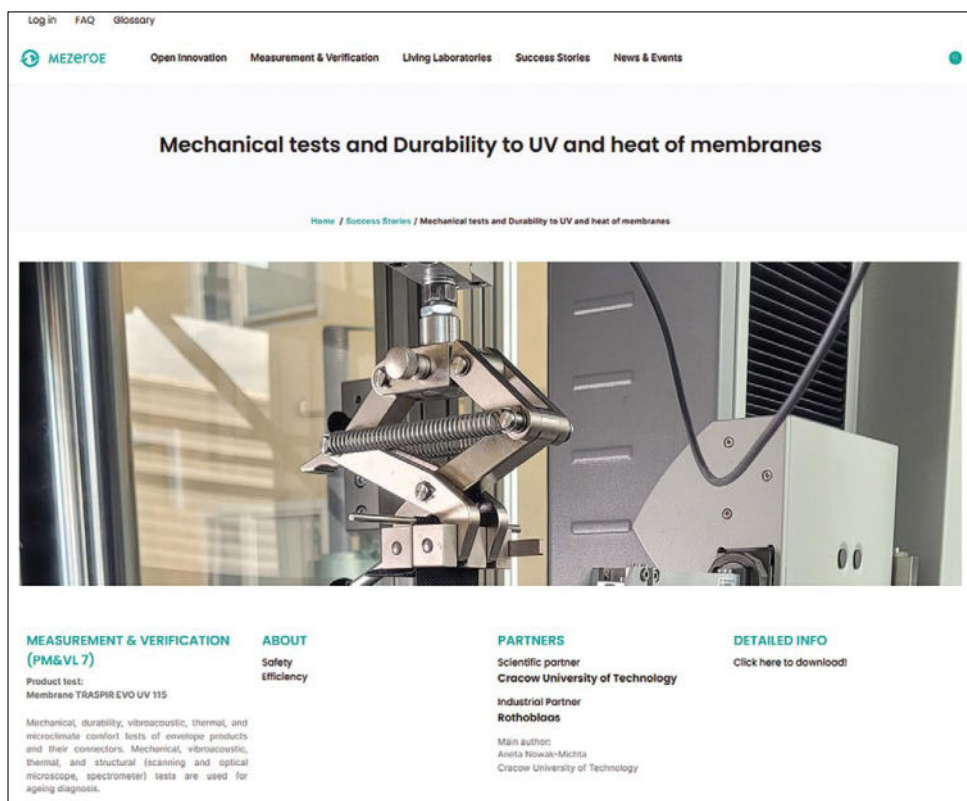
Oferta badawcza skierowana jest do potencjalnych partnerów rynku europejskiego. Firma reklamowa Compaz wraz z firmą R2M tworząca platformę realizuje działania promujące platformę wśród producentów wyrobów budowlanych.

4. Living Lab

Drugi etap projektu polegał na utworzeniu żywych laboratoriów – Living Lab (LL). LL25 utworzono na kampusie Politechniki Krakowskiej przy ulicy Warszawskiej 24, w dawnym budynku trakcji elektrycznej Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej (rys. 4). Koordynatorką LL25 jest mgr inż. Katarzyna Nowak-Dziesko. Przed modernizacją obiektu przeprowadzono ocenę stanu technicznego oraz badania szczelności obudowy, detekcję mostków termicznych, analizę komfortu cieplnego wewnątrz pomieszczeń oraz pomiary akustyczne. Wyniki badań wykazały, że budynek wymaga gruntownej przebudowy. Modernizacja budynku objęła wbudowanie uprzednio przetestowanych przez m.in. linię badawczą PM&VL7 produktów partnerów projektu:

- wzmocnienie wykonanych z cegły pełnej zewnętrznych ścian budynku za pomocą poliuretanowych złączy podatnych firmy FlexAndRobust Systems,
- wymianę stolarki okiennej na wykonane z poliuretanowej biopianki hiszpańskiej firmy Indresmat, zintegrowane z żaluzjami włoskiej firmy Pellini, a także produktów krajowych sponsorów:
- firma SHM SYSTEM zamontowała system światłowodu monitorujący odkształcenia ścian, który umożliwia ocenę skuteczności wzmocnienia konstrukcji,
- firma TermoOrganika dostarczyła system ocieplenia budynku,
- firma Domidor przekazała drzwi wewnętrzne.

W LL25 prowadzone badania szeroko pojętej jakości powietrza wewnętrznego, a także ciągle monitoring poziomu zanieczyszczeń CO₂, parametrów komfortu cieplnego, parametrów wibroakustycznych oraz odkształceń, które to umożliwią analizę wpływu zastosowanych rozwiązań na warunki wewnątrz budynku. LL umożliwia testowanie wyrobów budowlanych w warunkach rzeczywistych, co daje szansę



na walidację opracowywanych przez linię badawczą PM&VL7 nowych lub zmodyfikowanych metod testowych.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono historię i zadania CCB oraz główne elementy realizacji projektu MEZeroE. Opisano utworzoną i przetestowaną w ramach projektu MEZeroE na WIL PK linię badawczą PM&VL7: Badania mechaniczne i trwałościowe złączy oraz ich wpływ na komfort wibroakustyczny, termiczny i mikroklimatyczny. Żywe laboratorium Living Lab, w którym prowadzone są badania wyrobów budowlanych w warunkach rzeczywistych, co daje szansę na walidację opracowywanych przez linię badawczą PM&VL7 nowych lub zmodyfikowanych metod testowych. A także dostępną pod adresem <https://www.mezeroe-platform.eu/> platformę MEZeroE łączącą naukę z biznesem, na której PM&VL7 wraz z ośmioma liniami utworzonymi przez europejskie instytuty badawcze i uniwersytety techniczne prezentuje swoje usługi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] MEZeroE Measuring Envelope project for products and systems contributing to healthy, nearly zero-energy buildings, EU Horizon 2020 research and innovation program under subsidy No. 953157, [https://www.mezeroe.eu/](https://www.mezeroe.eu/(dostęp: 28.03.2025)) (dostęp: 28.03.2025)
- [2] Nowak-Michta A., Linia badawcza PM&VL7: Badania mechaniczne i trwałościowe złączy oraz ich wpływ na komfort wibroakustyczny, termiczny i mikroklimatyczny, 2025, Przegląd Budowlany 96(2):224-227
- [3] Nowak-Michta A., Kwiecien A., Michta J., A Roadmap for the Certification of Polyurethane Flexible Connectors Used as Envelope Products in the Next Generation of Healthy, Nearly Zero-Energy Buildings, Materials, 17(22)2024
- [4] [https://mezeroe-platform.eu/](https://mezeroe-platform.eu/(dostęp: 28.03.2025)) (dostęp: 28.03.2025)

Laboratorium Badawcze Materiałów i Konstrukcji Budowlanych L-12 – historia i możliwości badawcze

Building Materials and Structures Research Laboratory L-12 – history and research capabilities

dr inż. Krystian Brasse (ORCID: 0000-0001-8654-8816), dr inż. Stanisław Kańka, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1425

Streszczenie: Artykuł prezentuje krótki rys historyczny Laboratorium Badawczego Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, funkcjonującego w strukturze Wydziału Inżynierii Lądowej. Przedstawione zostały jego główne obszary i możliwości badawcze oraz wymienione niektóre ze zrealizowanych w laboratorium projektów badawczych. Ponadto zaprezentowano przykładowe badania elementów nawierzchni kolejowych oraz próbek betonu, zgrupowane w linie badawcze, które mieszczą się w zakresie akredytacji laboratorium badawczego.

Słowa kluczowe: badania, materiały budowlane, elementy konstrukcje, elementy nawierzchni kolejowych.

Abstract: The article presents a brief historical outline of Building Materials and Structures Research Laboratory, which operates within the structure of the Faculty of Civil Engineering. Its main research areas and capabilities were presented and some of the research projects carried out in the laboratory were listed. In addition, examples of tests of elements used for the construction of railway surfaces and concrete specimens, which are grouped into testing lines that fall within the scope of laboratory's accreditation, were shown.

Keywords: research, building materials, construction elements, railway surface elements.

1. Wprowadzenie

Laboratorium Badawcze Materiałów i Konstrukcji Budowlanych zostało utworzone 18 stycznia 2006 roku na mocy uchwały Rady Wydziału Inżynierii Lądowej i wchodziło w skład Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych. Powołanej nowej jednostce został przypisany symbol L-18, a funkcję pełnienia obowiązków kierownika od 01.11.2006 roku powierzono dr inż. Marcinowi Radoniowi. Od 01 października 2007 roku funkcję kierownika laboratorium objął dr inż. Maciej Suchodoła, a dr inż. Marcin Radoń pełnił funkcję kierownika ds. jakości. 1 września 2008 roku na funkcję kierownika laboratorium został powołany dr inż. Stanisław Kańka, funkcję tę pełni obecnie.

Przełomowym wydarzeniem w historii laboratorium było uzyskanie 02.02.2011 r. Certyfikatu Akredytacji Laboratorium Badawczego nr AB 1251, który został wydany przez Polskie Centrum Akredytacji. W wyniku reorganizacji struktury Wydziału Inżynierii Lądowej od 01 października 2019 roku laboratorium funkcjonuje jako jednostka organizacyjna Wydziału Inżynierii Lądowej z symbolem L-12.

Funkcjonowanie laboratorium spełnia wymagania zawarte w normie PN-EN ISO/IEC 17025 „Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących” [1]. Obecnie Certyfikat Akredytacji PCA obejmuje niemal 40 metod badawczych w zakresie szeroko rozumianego

budownictwa, dotyczących m.in. właściwości fizycznych i mechanicznych materiałów i wyrobów budowlanych oraz konstrukcji. Akredytowane metody badawcze obejmują badania: betonu, stali, kamienia naturalnego, zapraw czy elementów nawierzchni kolejowych, a więc podkładów i podrozdżadnic strunobetonowych oraz systemów przytwierdzeń. Wszystkie metody badawcze dotyczące badań elementów nawierzchni kolejowych są w elastycznym zakresie akredytacji. Badania wykonywane są zgodnie ze znormalizowanymi metodami badawczymi i przy użyciu właściwie nadzorowanego wyposażenia badawczego, a także zgodnie z zasadami systemu zarządzania przedstawionego w Księdze Jakości. Wdrożenie w laboratorium systemu zarządzania oraz jego ciągłe usprawnianie zapewnia wysoką jakość realizowanych badań.

2. Przykładowe prace badawcze realizowane w laboratorium

W Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych prowadzone są badania związane zarówno z działalnością naukowo-badawczą i dydaktyczną jednostek Wydziału Inżynierii Lądowej, jak również związane ze współpracą z otoczeniem gospodarczym. Część realizowanych badań z uwagi na nowatorski i niepowtarzalny charakter nie jest objęta zakresem akredytacji. Taka sytuacja dotyczy na przykład badań prowadzonych w ramach prac dyplomowych,



Rys. 1. Stanowisko badawcze służące do realizacji testów związanych z realizacją grantu badawczego POIR.04.01.04-00-0078/18 (źródło: archiwum laboratorium)



Rys. 2. Belka z drewna klejonego podczas badania na stanowisku w systemie badawczym Instron Schenck Testing System (źródło: archiwum laboratorium)

badan naukowych pracowników Wydziału Inżynierii Lądowej czy badań prowadzonych dla podmiotów z przemysłu. Ponadto laboratorium regularnie realizuje badania prowadzone w ramach grantów i programów badawczych przyznanych jednostkom Wydziału Inżynierii Lądowej, wśród których w ostatnich latach można wymienić: POIR.03.02.01-12-0057/21 – Technologia ścian fibrogruntobetonowych do realizacji szczelnych obudów wykopów, POIR.04.01.02-00-0032/17 – Innowacyjne technologie odzysku i przetwarzania odpadów oraz rewitalizacja terenów zanieczyszczonych w systemie komunalnej gospodarki cyrkulacyjnej, POIR.01.01.01-00-1132/18 – Technologia ekonomicznych ścian szczelinowych do realizacji fundamentów, obudów wykopów i ścian oporowych oraz Grant Agreement number: 953157 – MEZeroE – H2020-NMBP-TO-IND-2018-2020/H2020-NMBP-TO-IND-2020 – two stage MEZEROE – Measuring Envelope products and systems contributing to next generation of healthy nearly Zero Energy Buildings. Od kilku lat laboratorium specjalizuje się w prowadzeniu badań elementów nawierzchni kolejowych. Odzwierciedleniem wzmożonej aktywności na polu badawczym związanym z przemysłem kolejowym była m.in. realizacja

grantu badawczego POIR.04.01.04-00-0078/18 – Nowe rozwiązanie podkładki podszykowej i tłumika szynowego do ochrony otoczenia drogi szynowej przed drganiami i hałasem. Stanowisko badawcze wykorzystywane podczas testów prowadzonych w ramach powyższego grantu przedstawia rysunek 1.

Obecnie laboratorium uczestniczy w realizacji wydzielonych zadań grantu badawczego Diagnostics and mechanical tests of aged adhesive layers used in joints of wooden structures, związanych z badaniami starzeniowymi oraz badaniami wybranych właściwości mechanicznych drewna klejonego. Przykład badania nośności wielkogabarytowej belki z drewna klejonego, które zrealizowano w laboratorium prezentuje rysunek 2.

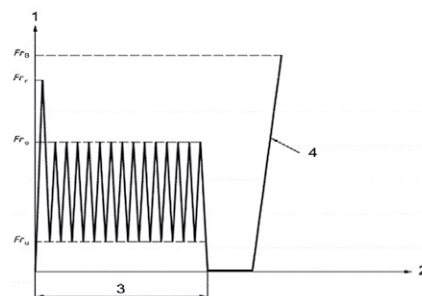
3. Badania podkładów i podrozjazdnic betonowych

Laboratorium wykonuje pełny zakres badań podkładów i podrozjazdnic betonowych zgodnie z serią norm PN-EN 13230 oraz WTWiO Id-101 [2]. Przykładowo trwałość na długotrwałe oddziaływania mechaniczne sprawdzana jest w badaniu rysoodporności części podszykowej podkładu lub części środkowej podrozjazdnicy przy obciążeniu zmęczeniowym według PN-EN 13230-2 [3] lub PN-EN 13230-4 [4]. Badanie polega na ocenie dopuszczalnej szerokości rysy po realizacji obciążenia zmęczeniowego (2 mln cykli) elementu odciążonego i obciążonego siłą początkową F_{t0} . Następnie określana jest wartość siły niszczącej testowany element. Zniszczony podkład w strefie podszykowej po zakończeniu badania przedstawia rysunek 3, a schematycznie przebieg badania obrazuje rysunek 4.



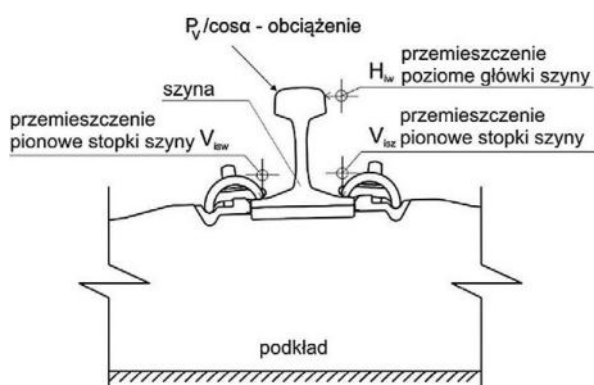
Rys. 3. Widok zniszczonego w strefie podszykowej podkładu strunobetonowego po zakończonym badaniu (źródło: archiwum laboratorium)

Rys. 4. Graficzny schemat przebiegu badania (PN-EN 13230-2:2016-06)





Rys. 5. Przykład ilustrujący badanie skutków obciążeń powtarzalnych systemu przytwierdzenia posadowionego na podkładzie betonowym (źródło: archiwum laboratorium)



Rys. 6. Graficzny schemat obciążenia szyny i pomiaru przemieszczeń podczas realizacji badania (źródło: archiwum laboratorium)

4. Badania systemów przytwierdzenia szyny do podkładów lub nawierzchni bezpodsynekowej

Laboratorium wykonuje pełny zakres badań systemów przytwierdzenia szyny do podkładów lub nawierzchni bezpodsynekowej zgodnie z serią norm PN-EN 13146 oraz innymi dokumentami odniesienia. W przypadku tej linii testowej trwałość systemów przytwierdzenia (w aspekcie oddziaływań mechanicznych) testowana jest poprzez określenie

skutków obciążeń powtarzalnych według PN-EN 13146-4 [5]. Badanie polega na wykazaniu skutków obciążeń powtarzalnych (3 mln cykli) na podstawowe analizy zmian parametrów systemu przytwierdzenia, tj. sztywności statycznej, siły docisku i oporu podłużnego. Badania realizowane są dla systemu przytwierdzenia szyny mocowanego na podkładzie lub wycinku nawierzchni bezpodsynekowej. Dwa systemy przytwierdzenia zamontowane na podkładzie w trakcie realizacji obciążenia cyklicznego przedstawia rysunek 5. Sposób obciążenia szyny i miejsca pomiaru jej przemieszczeń schematycznie obrazuje rysunek 6.

Trwałość w aspekcie oddziaływań środowiskowych (chemicznych) systemów przytwierdzenia testowana jest poprzez wykazanie efektu działania trudnych warunków środowiska według PN-EN 13146-6 [6]. Badanie polega na określeniu skutków działania mgły solnej (300 godzin) na system przytwierdzenia mocowany na podkładzie kolejowym lub wycinku nawierzchni bezpodsynekowej. Przykłady skutków oddziaływania trudnych warunków środowiska na różne systemy przytwierdzenia przedstawiono na rysunkach 7a–c.

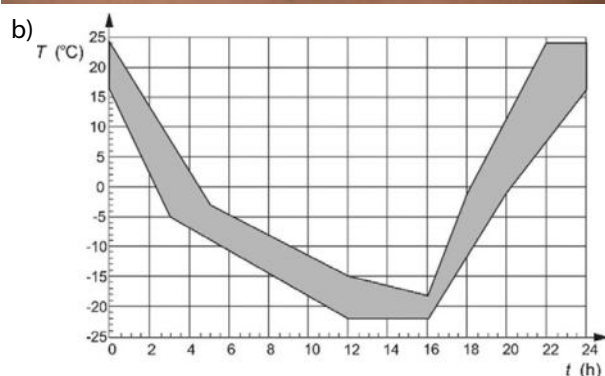
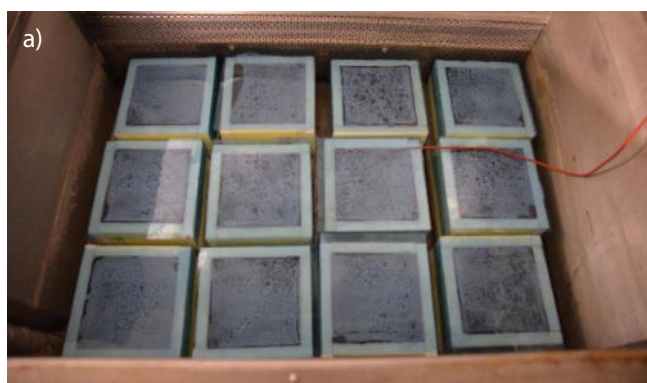
5. Badania próbek betonowych

Laboratorium wykonuje szeroki zakres badań próbek betonowych zgodnie z serią norm PN-EN 12390 oraz norm PN-B-06250 [7] i PN-B-06265 [8]. Badania te dotyczą zarówno cech fizycznych betonu, jak również mechanicznych i znajdują się w stałym zakresie akredytacji laboratorium. Wśród cech fizycznych wymienić można badanie odporności betonu na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzającej, realizowane zgodnie z normą PN-B-06265:2022-08. Przygotowane próbki w naczyniach badawczych podczas badania w komorze zamrażalniczej przedstawia rysunek 8a, natomiast wykres dopuszczalnego zakresu zmiany temperatury w czasie w trakcie jednego cyklu badania – rysunek 8b.

W obszarze badań cech mechanicznych betonu realizowanych przez laboratorium uwagę warto zwrócić na badanie modułu sprężystości przy ściskaniu według normy PN-EN 12390-13:2021-12. Pomiar odkształceń podłużnych betonu



Rys. 7. Wybrane systemy przytwierdzenia po 300 h ekspozycji na działanie mgły solnej: a) system przytwierdzenia SB, b) system przytwierdzenia szyny w otulinie, c) system przytwierdzenia W14 (źródło: archiwum laboratorium)



Rys. 8. Zestawy badawcze w trakcie badania w komorze zamrażalniczej (a) (źródło: archiwum laboratorium), zakres dopuszczalnej temperatury roztworu zamrażalniczego w pojedynczym cyklu badania (b) (PN-B-06265:2022-08)

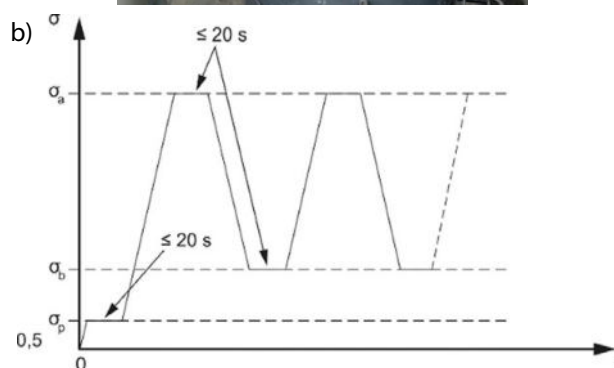
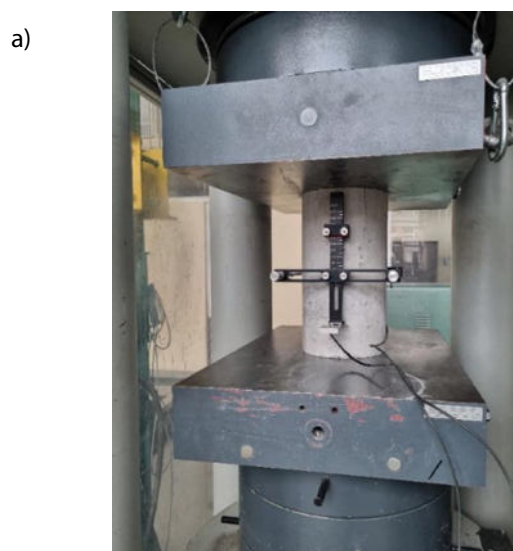
prorowadzony jest przy użyciu dwóch ekstensometrów umieszczonych w specjalnej ramce na pobocznych próbki, co obrazuje rysunek 9a. Próbka w trakcie badania jest obciążana cyklicznie w dwóch poziomach naprężeń zgodnie z normowym wykresem pokazanym na rysunku 9b.

6. Dalsze kierunki badań

Obecnie dostrzec można potrzebę realizacji badań dotyczących oceny odporności na działanie zmiennych warunków atmosferycznych. Laboratorium już dziś posiada niezbędne do tego wyposażenie m.in. komory starzeniowe, mikroskop SEM, spektrometr z przystawką ATR czy aparat do analizy termogravimetrycznej. Co więcej, w laboratorium zostały wdrożone procedury badawcze PKP PLK S.A. PLK-01 związane z badaniami starzeniowymi elementów przytwierdzenia szyny z tworzyw sztucznych, co otwiera drogę na rozszerzenie w przyszłości zakresu akredytacji laboratorium o nowy obszar badawczy.

7. Podsumowanie

Laboratorium Badawcze Materiałów i Konstrukcji Budowlanych L-12 posiada akredytację PCA i realizuje szeroki zakres badań zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 17025, obejmujących m.in. beton, stal, elementy nawierzchni kolejowych oraz systemy przytwierdzeń. Wyróżnia się aktywnym udziałem w projektach badawczych i programach krajowych oraz



Rys. 9. Próbka betonu w trakcie badania w maszynie wytrzymałościowej (a) (źródło: archiwum laboratorium), normowy przebieg obciążenia w trakcie badania modułu sprężystości przy ściskaniu (b) (PN-EN 12390-13:2021-12)

ściłą współpracą z przemysłem. W artykule podkreślono znaczenie laboratorium jako ośrodka łączącego badania naukowe z praktycznym zastosowaniem w budownictwie. Laboratorium łączy wysoką jakość badań z ciągłym rozwojem metod i infrastruktury, odpowiadając na aktualne wyzwania budownictwa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02: Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących
- [2] Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru podkładów i podrozdnic strunobetonowych Id 101 WTWIO – ILK3a-5187/01/05
- [3] PN-EN 13230-2:2016-06: Kolejnictwo – Tor – Podkłady i podrozdnic betonowe – Część 2: Podkłady monoblokowe z betonu sprężonego
- [4] PN-EN 13230-4+A1:2020-07: Kolejnictwo – Tor – Podkłady i podrozdnic betonowe – Część 4: Podrozdnic z betonu sprężonego do rozjazdów i skrzyżowań
- [5] PN-EN 13146-4:2020-09: Kolejnictwo – Tor – Metody badań systemów przytwierdzeń – Część 4: Skutki obciążeń powtarzalnych
- [6] PN-EN 13146-6:2012: Kolejnictwo – Tor – Metody badań systemów przytwierdzeń – Część 4: Skutki trudnych warunków środowiska
- [7] PN-B-06250:1988: Beton zwykły
- [8] PN-B-06265:2022-08: Beton. Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
- [9] PN-EN 12390-13:2021-12: Badania betonu. Część 13: Wyznaczanie ścieznego modułu sprężystości przy ściskaniu

Małopolskie Centrum Budownictwa Energooszczędnego L-13 – rola w nowoczesnym budownictwie

Małopolska Center of Energy Efficient Building L-13 – its role in modern construction

dr hab. inż. Małgorzata Fedorczyk-Cisak, prof. PK (ORCID: 0000-0003-1125-4068), dr inż. Mirosław Dechnik (ORCID: 0000-0002-8352-6686), dr inż. arch. Michał Ciuła (ORCID: 0000-0002-4345-0381), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, mgr inż. Aleksandra Buda-Chowaniec (ORCID: 0000-0001-9836-1012), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, Szkoła Doktorska PK

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1426

Streszczenie: Artykuł opisuje koncepcję, realizację oraz działalność Małopolskiego Centrum Budownictwa Energooszczędnego (MCBE) Politechniki Krakowskiej. MCBE to unikatowe w skali kraju centrum badawcze poświęcone nowoczesnym technologiom budowlanym, umożliwiające interdyscyplinarne badania w obszarach architektury, fizyki budowli, systemów instalacyjnych oraz automatyzacji budynków niskoenergetycznych. Centrum wyposażono w zaawansowane systemy HVAC, oświetlenie LED, przesłony zaciemniające, systemy pomiarowe oraz urządzenia do analizy efektywności energetycznej i komfortu użytkownika. MCBE pełni funkcję kluczowej platformy badawczej, wspierając rozwój innowacyjnych technologii budowlanych, współpracę z przemysłem oraz edukację młodych naukowców. Działania MCBE przyczyniają się także do popularyzacji proekologicznych rozwiązań oraz wzmacniania pozycji Małopolski jako lidera innowacji technologicznych w Polsce.

Słowa kluczowe: budownictwo energooszczędne, efektywność energetyczna, automatyzacja budynków, Politechnika Krakowska, Małopolskie Centrum Budownictwa Energooszczędnego.

Abstract: The article describes the concept, construction, and operations of the Małopolska Center of Energy-Efficient Building (MCBE) at the Cracow University of Technology. MCBE is a unique research center in Poland, dedicated to modern building technologies and enabling interdisciplinary research in the fields of architecture, building physics, installation systems, and automation of low-energy buildings. The MCBE is equipped with advanced HVAC systems, LED lighting, shading devices, measurement systems, and equipment for analyzing energy efficiency and user comfort. MCBE serves as a key research platform, supporting the development of innovative building technologies, collaboration with industry, and the education of young researchers. Its activities also contribute to promoting eco-friendly solutions and strengthening the position of the Małopolska region as a leader in technological innovation in Poland.

Keywords: energy-efficient construction, energy efficiency, building automation, Cracow University of Technology, Małopolska Center of Energy Efficient Building.

1. Wprowadzenie

Pod koniec 2010 roku na Politechnice Krakowskiej zrodziła się koncepcja utworzenia innowacyjnego centrum badawczego w skali 1:1, dedykowanego zagadnieniom związanym z energooszczędnym budownictwem. Inicjatywa ta, zapoczątkowana przez dr. hab. inż. arch. Marcina Furtakę z Wydziału Architektury oraz dr. hab. inż. Małgorzatę Fedorczyk-Cisak z Wydziału Inżynierii Lądowej, doprowadziła do powołania interdyscyplinarnego zespołu naukowców reprezentujących różne jednostki Politechniki Krakowskiej. W efekcie powstała koncepcja niskoenergetycznego budynku doświadczalnego, projektowanego zgodnie z surowymi wymaganiami Polskiego Certyfikatu Budownictwa

Energooszczędnego. W latach 2013–2014, w ramach projektu realizowanego z funduszy MRPO, na głównym kampusie uczelni wzniesiono Małopolskie Centrum Budownictwa Energooszczędnego (MCBE) (rys. 1). Budynek oddany do użytku we wrześniu 2014 roku stanowi unikatowe centrum naukowo-badawcze, w którym na dużą skalę prowadzone są badania technologii energooszczędnych, rozwiązań materiałowych, konstrukcyjnych i instalacyjnych oraz komfortu użytkownika budynków niskoenergetycznych. MCBE stanowi unikatowy w skali kraju obiekt badawczy umożliwiający realizację multidyscyplinarnych programów badawczych koncentrujących się na nowoczesnych rozwiązaniach z zakresu szeroko rozumianego budownictwa energooszczędnego [1].

2. Infrastruktura doświadczalna budynku oraz wyposażenie badawcze

Projekt MCBE powstał na podstawie szczegółowych wytycznych interdyscyplinarnego zespołu naukowego Politechniki Krakowskiej. Koncepcja i główne założenia projektowe zakładały stworzenie zaawansowanego, rzeczywistego obiektu badawczego, odpowiadającego potrzebom środowiska akademickiego i branżowego. Projekt był ukierunkowany na realizację celów w czterech głównych obszarach [2, 3]:

- zaprojektowanie przestrzeni laboratoryjnej z bogatym zapleczem aparaturowym, umożliwiającą prowadzenie kompleksowych badań nad właściwościami materiałów i przegród budowlanych, a także nad parametrami środowiska wewnętrznego w kontekście wielokryterialnego komfortu użytkownika;
- wyposażenie budynku w różnorodne źródła energii (w tym energii odnawialnej) wraz z systemem magazynowania, z zamiarem badania wpływu warunków zewnętrznych na sprawność tych źródeł oraz opracowania strategii inteligentnego zarządzania energią – zależnie od aktualnych potrzeb energetycznych i efektywności poszczególnych źródeł;
- wykorzystanie samego obiektu jako pełnowymiarowej platformy doświadczalnej do badań w zakresie szeroko rozumianego budownictwa niskoenergetycznego;
- wdrożenie zaawansowanych systemów automatyki i sterowania w celu badań wpływu tego typu systemów na komfort użytkowania i efektywność energetyczną budynków oraz stworzenia bazy dla pozostałych prac badawczych prowadzonych w obiekcie.

Infrastruktura budynku MCBE będącego samym w sobie obiektem badawczym w skali rzeczywistej oraz niezależne, specjalistyczne urządzenia pomiarowe znajdujące się na jego wyposażeniu pozwalają na prowadzenie szeregu interdyscyplinarnych prac badawczych w obszarze budownictwa energooszczędnego. MCBE to w pełni zautomatyzowany inteligentny budynek, wyróżniający się rozbudowanymi, innowacyjnymi i wielowariantowymi rozwiązaniami instalacji technicznych oraz badawczym systemem zarządzania budynkiem BMS (ang. *Building Management System*) (rys. 2).

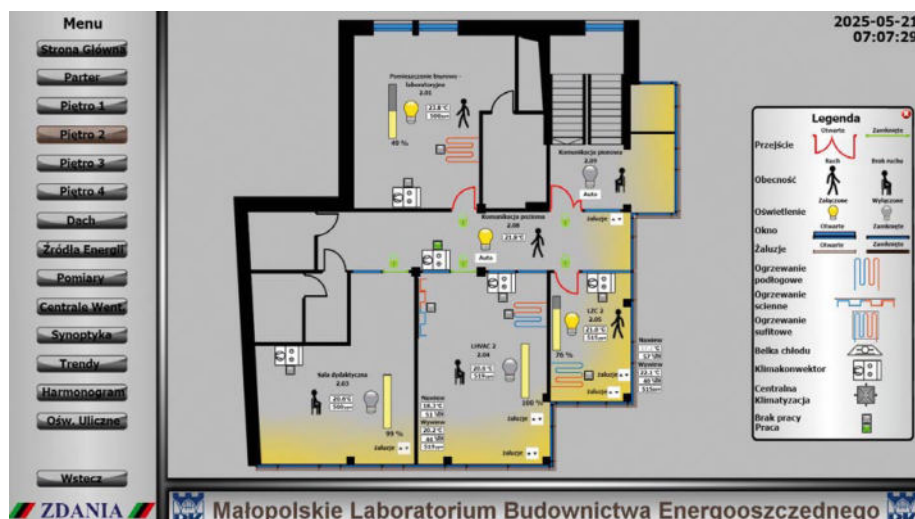
Instalacja grzewczo-chłodnicza budynku obejmuje pięć źródeł ciepła oraz trzy źródła chłodu, które zasilają magazyny energii w postaci zasobnika wody gorącej i lodowej. Źródła obejmują trzy pompy ciepła z funkcją grzania i chłodzenia (powietrzne z napędem elektrycznym oraz gazowym, a także gruntowa), a także węzeł MPEC i kocioł gazowy kondensacyjny. Gruntowa pompa ciepła współpracuje z sondami pionowymi o głębokości 125 m, umożliwiając również chłodzenie pasywne. W obiekcie wydzielono niezależne strefy klimatyczne i energetyczne, z indywidualnym opomiarowaniem, w których zastosowano różnorodne systemy HVAC. Warunki mikroklimatyczne w wybranych pomieszczeniach doświadczalnych mogą być wytwarzane



Rys. 1. Małopolskie Centrum Budownictwa Energooszczędnego

przez różnego typu systemy grzewczo-chłodnicze (m.in. klimakonwektory, układy podłogowe, ściennie, sufitowe, belki aktywne oraz pasywne), system wentylacji, przesłony zacinające, a także dodatkowe dołączane urządzenia. Wentylacja budynku jest realizowana przez trzy systemy nawiewno-wywiewne o różnych funkcjonalnościach, z odzyskiem energii z powietrza zużytego. W ramach systemu wentylacji zintegrowano także zespół dwóch poziomych gruntowych wymienników ciepła GPWC, które zapewniają wstępne kondycjonowanie powietrza przed jego dalszą obróbką w centrali [5]. W budynku zainstalowano także kolektory słoneczne (płaskie i próżniowe) (rys. 3) oraz panele fotowoltaiczne: stacjonarne i ruchome żaluzje PV. Stacje meteorologiczne zlokalizowane na dachu i elewacjach dostarczają danych na potrzeby badań oraz bieżącego zarządzania budynkiem. Duże powierzchnie przeszkleń elewacji częściowo osłonięto ruchomymi poziomymi żaluzjami zewnętrznymi, umożliwiając badania nad ochroną przed przegrzewaniem i osłepianiem oraz integracją z instalacjami HVAC. Zbliżony układ kondygnacji umożliwia badania porównawcze w obszarach komfortu wielokryterialnego i zarządzania dystrybucją energii. W obiekcie zrealizowano także system oświetlenia LED umożliwiający badania zaawansowanych metod sterowania oświetleniem, w tym

Rys. 2. Panel operatorski systemu BMS – widok jednej z kondygnacji budynku MCBE



sterowania dystrybucją światła według potrzeb użytkowników [6]. Funkcjonalność BMS poszerzono o wydzielony Specjalistyczny System Opomiarowania, szczególnie ukierunkowany na badania fizyki budowli, z unikalnymi pomiarami w elementach konstrukcyjnych. W całym budynku MCBE zintegrowano ponad 3000 czujników. Pomiary obejmują m.in. temperatury powietrza wewnętrznego, zewnętrznego, gruntu, warstw konstrukcyjnych i izolacyjnych przegród budynku, ciśnienia, wilgotności względne powietrza, przepływy powietrza, stężenia CO₂, przepływy mediów i ciepła, parametry energii elektrycznej. Dane te wraz z informacjami diagnostycznymi są rejestrowane i wykorzystywane w prowadzonych pracach badawczych [2, 3]. Wysoką elastyczność i możliwości dalszego rozwoju zapewniają przewidziane rezerwy instalacji sanitarnej oraz systemów sterowania i automatyzacji, a także wysoka zdolność do współdziałania (ang. *interoperability*) badawczego systemu BMS.

W 2024 roku, po dziesięciu latach eksploatacji, budynek MCBE został poddany ewaluacji w ramach pilotażowego testu metodologii wskaźnika gotowości budynku do inteligencji (SRI). Uzyskany wynik 63,5% – najwyższy spośród ocenianych obiektów w Polsce – potwierdził wizjonerski charakter koncepcji i projektu, które już dekadę wcześniej skutecznie przewidziały kierunki rozwoju nowoczesnego budownictwa [4].

3. Zakres działalności

Prowadzone w MCBE badania naukowe dotyczą zagadnień dotyczących szeroko rozumianego budownictwa energooszczędnego i mają często charakter interdyscyplinarny. Poruszana tematyka obejmuje m.in. zagadnienia związane z: architekturą i projektowaniem proekologicznym

[7–9], fizyką budowli [10, 11], wielokryterialnym komfortem użytkownika [12–14], współpracą i efektywnością energetyczną instalacji technologicznych [15–17], a także systemami sterowania, automatyzacji oraz inteligentnych budynków [2, 5, 6, 18, 19].

Ponadto obszar działania MCBE obejmuje badania będące odpowiedzią na potrzeby otoczenia gospodarczego. Realizowana jest działalność ekspercka i usługowa na rzecz przemysłu, samorządów, instytucji publicznych oraz inwestorów prywatnych:

- ekspertyzy techniczne i energetyczne dotyczące istniejących i projektowanych obiektów budowlanych, w tym analizy efektywności energetycznej, oceny jakości i innowacyjności w zakresie rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych, instalacyjnych oraz systemów automatyki, a także rekomendacje w zakresie modernizacji energetycznej budynków;
- audyt energetyczny i certyfikacja energetyczna budynków zgodnie z obowiązującymi normami krajowymi i europejskimi;



Rys. 3. Wybrane odnawialne źródła energii na dachu budynku MCBE

- pomiary i analizy komfortu użytkowania w budynkach, obejmujące m.in. komfort cieplny, akustyczny, wizualny oraz jakość powietrza wewnętrznego;
- współpraca z producentami i dostawcami technologii w zakresie badań rozwojowych, optymalizacji energetycznej produktów i wdrażania innowacyjnych rozwiązań w budownictwie;
- współpraca z przedsiębiorcami w zakresie pozyskiwania grantów badawczo-rozwojowych.

MCBE aktywnie wspiera popularyzację nauki oraz upowszechnianie wyników badań, organizując i biorąc udział w konferencjach naukowych, seminariach tematycznych oraz wydarzeniach branżowych. Centrum stanowi również przestrzeń rozwoju dla młodych naukowców i studentów, którzy mogą realizować własne projekty badawcze, korzystając z nowoczesnej infrastruktury laboratorium. Szczególne miejsce w tej działalności zajmuje koło naukowe EcoPower, które skupia studentów zainteresowanych zrównoważonym budownictwem, efektywnością energetyczną i architekturą.

4. Podsumowanie

Małopolskie Centrum Budownictwa Energooszczędnego stanowi unikatowe w skali kraju centrum naukowo-badawcze, w którym na szeroką skalę prowadzone są multidyscyplinarne programy badawcze koncentrujące się na nowoczesnych rozwiązaniach z zakresu szeroko rozumianego budownictwa energooszczędnego, obejmujące w szczególności takie obszary nauki, jak: architektura, fizyka budowli, systemy instalacyjne oraz zarządzania, sterowania i automatyzacji budynków, efektywność energetyczna, komfort użytkowania budynku i interakcja na linii budynek-człowiek. Centrum stanowi zatem wyjątkową platformę badawczą, pozwalającą na testowanie i optymalizację nowoczesnych technologii budowlanych, sprzyjających zrównoważonemu rozwojowi oraz poprawie komfortu użytkowania budynków niskoenergetycznych.

Działalność centrum nie ogranicza się wyłącznie do badań – MCBE aktywnie angażuje się również w podnoszenie świadomości społecznej w zakresie efektywnego gospodarowania zasobami energii oraz promowanie proekologicznych postaw. Działania te realizowane są między innymi poprzez organizację wizyt studyjnych, szkoleń i konferencji naukowych, które cieszą się dużym zainteresowaniem zarówno środowiska naukowego, jak i ogółu społeczeństwa. Od chwili powstania centrum odwiedza rocznie około 400 gości z kraju i zagranicy. MCBE nieustannie wzmacnia także pozycję Małopolski jako regionu innowacji technologicznych, aspirującego do miana krajowego lidera w dziedzinie technologii niskoenergetycznych. W dążeniu do tych celów kluczową rolę odgrywa Politechnika Krakowska, której eksperci od ponad 25 lat specjalizują się w badaniach i wdrażaniu rozwiązań z zakresu energooszczędności w budownictwie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dechnik M., Furtak M., Inteligentne budynki dziś i jutro, *Builder* 21, 2017, str. 64–66
- [2] Fedorczak-Cisak M., Dechnik M., Kwasnowski P., Budynek Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego Politechniki Krakowskiej jako przykład perspektywicznego spojrzenia na funkcjonalności budynków w świetle oceny wskaźnikiem SRI. KNER: II Konferencja Naukowa Energetyki Rozproszonej KNER'2024, 30.10.2024 r., Kraków, materiały konferencyjne, str. 28–32
- [3] Dokumentacja powykonawcza: Budowa budynku Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie wraz z urządzeniami budowlanymi i infrastrukturą techniczną, architektura: Furtak M., konstrukcja: Szydlowski R., instalacje sanitarne: Wójcik K., instalacje elektryczne i automatyka: Spaczyński M., 2014
- [4] Kwasnowski P., Polska w europejskiej fazie testów wskaźnika SRI – Pierwsze wyniki badań, Seminarium 10 Projektu Obserwatorium transformacji energetycznej – Budownictwo proaktywne – współczesne budynki w świetle ewolucji dyrektywy EPBD, 2024, https://www.energetyka-rozproszona.pl/media/event_activity_presentations/Polska_w_europejskiej_fazie_test%C3%B3w_SRI_Pawe%C5%82_Kwasnowski_27_2paSLvV.pdf [dostęp: 2025-05-13]
- [5] Romańska-Zapała A., Furtak M., Fedorczak-Cisak M., Dechnik M., Need for automatic bypass control to improve the energy efficiency of a building through the cooperation of a horizontal ground heat exchanger with a ventilation unit during transitional seasons: a case study, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, tom 471, 2019, str. 1–10
- [6] Dechnik M., Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej, w kontekście adaptacji oświetlenia pomieszczeń w budynku biurowym poprzez personalizację warunków oświetlenia, rozprawa doktorska, promotor: Stala R., Moskwa S., AGH w Krakowie, 2021
- [7] Furtak M., The embodied energy of architecture, *Przestrzeń i Forma* 44, 2020, str. 9–22
- [8] Ciula M., Ślad węglowy w architekturze pierwszej połowy XX w, rozprawa doktorska, promotor: Furtak M., Politechnika Krakowska, 2023
- [9] Fedorczak-Cisak M., Furtak M., Ciula M., i Krupa M., Building geometry and development form optimisation in terms of the energy efficiency, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, tom 603, 2019, str. 1–13
- [10] Fedorczak-Cisak M., Nowak K., Furtak M., Analysis of the effect of using external venetian blinds on the thermal comfort of users of highly glazed office rooms in a transition season of temperate climate – case study, *Energies* 13, 1/2020, str. 1–18
- [11] Kisilewicz T., Fedorczak-Cisak M., Sadowska B., Ickiewicz I., Barkanyi T., Bomberg M., Góbciewicz E., On the results of long-term winter testing of active thermal insulation, *Energy and Buildings*, tom 296, 2023, str. 1–13
- [12] Piasecki M., Fedorczak-Cisak M., Furtak M., Biskupski J., Experimental confirmation of the reliability of fanger's thermal comfort model–Case study of a near-zero energy building (NZEB) office building, *Sustainability* 11, 9/2019, str. 1–25
- [13] Furtak M., Chowaniec A., Parametry mikroklimatu w historycznych zespołach zabytkowych, *Wiadomości Konserwatorskie* 76, 2023, str. 172–184
- [14] Fedorczak-Cisak M., Furtak M., Szmelter A., Dechnik M., The influence of air heating and lighting on the comfort conditions in NZEB buildings' rooms, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 603, 2019, str. 1–12
- [15] Romańska-Zapała A., Bomberg M., Dechnik M., Fedorczak-Cisak M., Furtak M., On preheating of the outdoor ventilation air, *Energies* 13, 1/2020, str. 1–12
- [16] Romańska-Zapała A., Grzywocz K., Dechnik M., Power quality in energy efficient buildings – a case study, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 603, 2019, str. 1–7
- [17] Romańska-Zapała A., Bomberg M., Fedorczak-Cisak M., Furtak M., Yarbrough D., Dechnik M., Buildings with environmental quality management, part 2: Integration of hydronic heating/cooling with thermal mass, *Journal of Building Physics* 41, 5/2018, str. 397–417
- [18] Dechnik M., Moskwa S., Smart House – inteligentny budynek – idea przyszłości, *Przegląd Elektrotechniczny* 93, 9/2017, str. 1–10
- [19] Dudzik M., Dechnik M., Furtak M., Application of neural networks to lighting systems, *MATEC Web of Conferences* 282, 2019, str. 1–6

Laboratorium Inżynierii Wiatrowej L-14

– Tunele aerodynamiczne do badań środowiskowych i budowlanych

Wind Engineering Laboratory L-14 – Wind tunnels for environmental and construction research

prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga (ORCID: 0000-0002-9143-2014), dr inż. arch. Łukasz Flaga (ORCID: 0000-0001-9650-4913), Laboratorium Inżynierii Wiatrowej, Politechnika Krakowska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1427

Streszczenie: Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej (LIW PK) to unikalna w skali Polski i ceniona międzynarodowo jednostka badawczo-dydaktyczna, specjalizująca się w badaniach z zakresu aerodynamiki budowli, inżynierii śniegowej, energetyki wiatrowej oraz inżynierii środowiska. Początkowo funkcjonowało z jednym tunelem aerodynamicznym, otwartym w 2001 roku, natomiast w 2024 roku oddano do użytku nowy kompleks z trzema dodatkowymi tunelami. Całość inwestycji została zrealizowana w ramach projektu „Budowa Laboratorium Aerodynamiki Środowiskowej Politechniki Krakowskiej”. Podstawowe przeznaczenie poszczególnych tuneli wraz z ich oznaczeniem jest następujące: tunel TA1 – symulacja warstwy przyściennej, badania aerodynamiki budowli, energetyki wiatrowej, sportu; tunel TA2 – symulacja warunków klimatycznych, w tym opadów deszczu, mżawki, sztucznego śniegu i oblodzenia; tunel TA3 – kalibracja urządzeń pomiarowych oraz wizualizacja przepływów m.in. metodą PIV. W pracy przedstawiono podstawowe dane techniczne tych tuneli oraz ich możliwości badawcze.

Słowa kluczowe: tunel aerodynamiczny, wiatr, inżynieria, aerodynamika, laboratorium.

Abstract: Wind Engineering Laboratory of the Cracow University of Technology (LIW PK) is a unique and appreciated internationally research and teaching unit in Poland. LIW PK specializes in research in building aerodynamics, snow engineering, wind power and environmental engineering. It initially operated with one wind tunnel, opened in 2001. A new complex with three additional tunnels was put into operation in 2024. The entire investment was carried out as part of the project „Construction of the Laboratory of Environmental Aerodynamics of the Cracow University of Technology”. The main purpose of the wind tunnels, along with their designation, is as follows: tunnel TA1 – simulation of boundary layer, research on building aerodynamics, wind energy, sport; tunnel TA2 – simulation of climatic conditions, including rainfall, drizzle, artificial snow, and icing; tunnel TA3 – calibration of measuring equipment and wind flow visualization, among others, with the use of PIV method. The paper presents the basic technical data of these tunnels and their research capabilities.

Keywords: wind tunnel, wind, engineering, aerodynamics, laboratory.

1. Wprowadzenie

30 stycznia 2024 r. został otwarty nowy budynek LIW PK z trzema tunelami aerodynamicznymi, przeznaczonymi do badań różnych zagadnień aerodynamiki budowli, inżynierii śniegowej, energetyki wiatrowej i inżynierii środowiska [1, 2, 3]. Inwestycja ta – unikatowa w skali światowej – została zrealizowana w ramach projektu Budowa Laboratorium Aerodynamiki Środowiskowej Politechniki Krakowskiej.

Laboratorium Inżynierii Wiatrowej (LIW) jest jednostką organizacyjną L-14 na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej (WIL PK). Mieści się ono głównie w dwóch budynkach (budynek „O” o symbolu LIW (O – TA1, TA2, TA3) i budynek „F” o symbolu LIW (F – TA4)) na terenie kampusu

PK w Krakowie – Czyżynach przy Alei Jana Pawła II. W budynku „O” mieszczą się trzy tunele aerodynamiczne naukowo-badawcze inżynierii wiatrowej, a mianowicie: tunel aerodynamiczny aerodynamiki budowli i energetyki wiatrowej TA1, tunel aerodynamiczny klimatyczny inżynierii środowiska TA2 i tunel aerodynamiczny wizualizacji opływów TA3. Z kolei zaś w budynku „F” mieści się tunel aerodynamiczny badawczo-dydaktyczny inżynierii wiatrowej TA4.

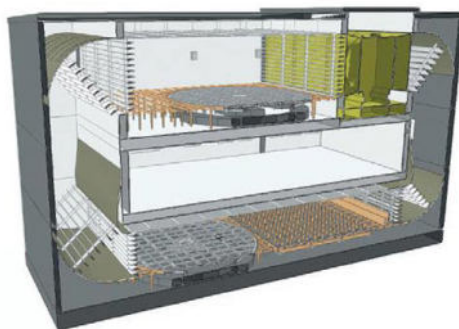
W LIW PK (L-14) realizowane są prace eksperymentalne i obliczeniowe z następujących działów inżynierii wiatrowej, inżynierii śniegowej i inżynierii środowiska:

- fizyka wiatru w warstwie przyziemnej, symulacje i badania modelowe pola prędkości wiatru nad wybranymi obszarami;

Rys. 1. Widok budynku od strony wjazdu (z lewej) oraz widok wnętrza przestrzeni badawczej tunelu TA1 (z prawej)



- aerodynamika budowli i konstrukcji;
- aerodynamika ruchomych obiektów inżynierskich;
- aerodynamika linii elektroenergetycznych;
- energetyka wiatrowa w tym badania siłowni wiatrowych w skali modelowej oraz małych turbin/siłowni wiatrowych w skali 1:1;
- komfort wiatrowy przechodniów, komfort wibracyjny użytkowników budynków wysokościowych i użytkowników mostów/kładek dla pieszych przy wpływach wiatru;
- wpływy środowiskowe wiatru – rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, transport cząstek stałych (piasku, śniegu), symulacje obciążenia śniegiem dachów i przekryć w warunkach opadu śniegu i redystrybucji pokrywy śnieżnej;
- dynamiczne przewietrzanie i redukcja smogu obszarów zurbanizowanych;
- symulacje opadów deszczu i/lub śniegu oraz wiatru oddziałujących na: elementy pokryć dachowych i ścian, systemy wentylacji, systemy odprowadzenia wód opadowych oraz stolarkę okienną połaciową;
- wizualizacje dymowe i PIV (*Particle Image Velocimetry*) pływów i przepływów;
- badania, analizy i opinie eksperckie dotyczące wpływów planowanej inwestycji na środowisko;
- badania oblodzenia elementów budowli i konstrukcji inżynierskich w skali 1:1;
- prace obliczeniowe z wykorzystaniem techniki komputerowej dotyczące głównie następujących zagadnień:
 - symulacji pola prędkości wiatru dla typowych chropowatości terenu (programy własne),
 - symulacji statycznego i dynamicznego działania wiatru na budowle i konstrukcje według teorii quasi – ustalonej, w sytuacjach w miarę typowych, lecz nieujętych normami (programy własne),
 - analiz numerycznych różnych przypadków niestateczności aeroelastycznej smukłych budowli i konstrukcji (programy i ujęcia obliczeniowe własne),
 - symulacji numerycznych przy użyciu różnych programów komercyjnych numerycznej dynamiki płynów (CFD) lub numerycznej inżynierii wiatrowej (CWE);
- walidacja symulacji komputerowych przepływów powietrza w różnych warunkach oraz symulacji CFD (*Computational Fluid Dynamics*) oraz CWE (*Computational Wind Engineering*);



- normalizacja, kodyfikacja i regulowanie różnych zagadnień inżynierii wiatrowej.

Wymienione działy inżynierii wiatrowej, inżynierii śniegowej i inżynierii środowiska stanowią obszar zainteresowania inżynierów konstruktorów, architektów, urbanistów, specjalistów z dziedziny wentylacji i inżynierii środowiska, inżynierów mechaników, energetyków i innych. Tymi zagadnieniami interesuje się też wiele różnych wydziałów wyższych uczelni technicznych w Polsce.

Rodzaj prowadzonych prac eksperymentalnych i obliczeniowych jest następujący:

- prace dydaktyczne (wykłady, laboratoria, studia podyplomowe, kursy szkoleniowe, prace dyplomowe);
- studia i badania naukowe, prace doktorskie, prace habilitacyjne;
- prace naukowo-badawcze (w tym granty) dla potrzeb gospodarki narodowej oraz zlecniodawców indywidualnych i zbiorowych;
- prace usługowe, konsultacje, ekspertyzy i opinie oraz prace normalizacyjne i kodyfikacyjne na zlecenia indywidualne i zbiorowe.

2. Podstawowe dane techniczne tuneli aerodynamicznych LIW PK

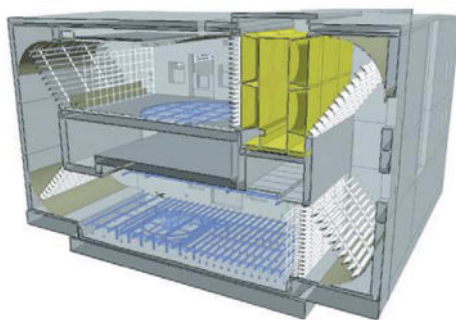
2.1. Tunel aerodynamiczny aerodynamiki budowli i energetyki wiatrowej – TA1 (rys. 2)

- W obu przestrzeniach pomiarowych stoły obrotowe o średnicy 8 m.
- Kanały łączące obie sekcje po bokach i mieszczące kierownice – dodatkowa długość 3,2 m z każdej strony.
- Nominalna najwyższa średnia prędkość przepływu powietrza: 30 m/s.

- Przestrzeń pomiarowa 1 (dolna) – z elementami symulującymi warstwę przyścienną (blokami, iglicami i aktywnymi urządzeniami generującymi turbulencje)

Rys. 2. Schematyczny przekrój perspektywiczny z wyszczególnieniem elementów wyposażenia specjalistycznego tunelu aerodynamicznego TA1

Rys. 3. Schematyczny przekrój perspektywiczny z wyszczególnieniem elementów wyposażenia specjalistycznego tunelu aerodynamicznego TA2



na długości 9 m: szerokość 9,7 m x wysokość 2,3 m x długość całkowita 17,7 m; najbardziej rozbudowane możliwości tworzenia turbulencji i pionowego profilu wiatru; główne przeznaczenie: badania wpływu wiatru na budynki wysokościowe, mosty i kładki dla pieszych, budynki i przekrycia wielkopowierzchniowe, badania rozkładów ciśnień na powierzchniach budynków, badania aeroelastyczne, przewietrzanie miast, transport zanieczyszczeń.

- Przestrzeń pomiarowa 2 (górna): szerokość 9,7 m x wysokość 3,3 m x długość całkowita 12 m; największe wymiary przestrzeni badawczej oraz możliwości montażu urządzeń w skali 1:1 lub o znacznych wymiarach, mniejsze możliwości w zakresie kształtowania pionowego profilu wiatru; główne przeznaczenie: badania siłowni wiatrowych, elementów infrastruktury technicznej (wentylacja i klimatyzacja), elementów fasad, dachów (iglice, kominy), konstrukcji inżynierskich.

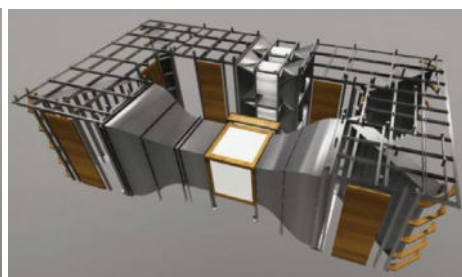
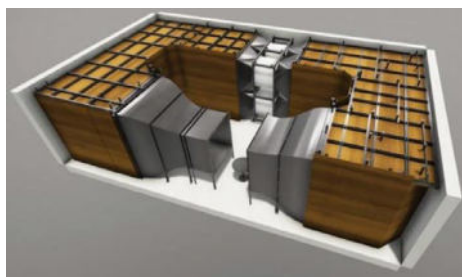
2.2. Tunel aerodynamiczny klimatyczny inżynierii środowiska – TA2 (rys. 3)

- Nominalna najwyższa średnia prędkość przepływu powietrza: 20 m/s.

- Przestrzeń pomiarowa 1 (dolna): szerokość 7,9 m x wysokość 4,05 m x długość całkowita 16,8 m; stół obrotowy o średnicy 4 m; podłoga techniczna z systemem odprowadzenia opadu; elementy symulujące opad na specjalnym ruszcie z możliwością zmiany wysokości; główne przeznaczenie: badania klimatyczne uwzględniające symulację wiatru, opadu deszczu (od mżawki po deszcz ulewny), zmianę temperatury powietrza w zakresie od -10 do +25°C, symulację oblodzenia oraz cykli rozmrażania (zestaw promienników podczerwieni) elementów budynków i budowli, konstrukcji inżynierskich, fragmentów elewacji, turbin wiatrowych, linii elektroenergetycznych i innych.

- Przestrzeń pomiarowa 2 (górna): szerokość 7,9 m x wysokość 4,1 m x długość całkowita 12,9 m; stół obrotowy o średnicy 6,5 m; elementy symulujące opad sztucznego śniegu na specjalnym ruszcie z możliwością zmiany/dostosowania wysokości; główne przeznaczenie: badania eksperymentalne obciążenia śniegiem dachów

Rys. 4. Schematyczny widok tunelu aerodynamicznego TA3 z przestrzenią pomiarową otwartą (z lewej) i zamkniętą (z prawej)



wielkopowierzchniowych, identyfikacja stref zastoju i turbulencji w złożonych układach urbanistycznych.

2.3. Tunel aerodynamiczny wizualizacji przepływów TA3 (rys. 4)

- Nominalna najwyższa średnia prędkość przepływu powietrza: 20 m/s.
- Przestrzeń pomiarowa zamknięta oraz otwarta (tunel typu Eiffla): szerokość przestrzeni roboczej 1,0 m x wy-

sokość 1,0 m x długość całkowita 3,5 m; główne przeznaczenie: badania rozkładu prędkości powietrza wokół obiektów, wizualizacja przepływu w postaci pola wektorowego prędkości wokół obiektów metodą PIV (Particle Image Velocimetry) i innymi metodami.

3. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano szczegółowo charakterystykę każdej przestrzeni badawczej nowych tuneli aerodynamicznych zrealizowanych w ramach projektu „Budowa Laboratorium Aerodynamiki Środowiskowej Politechniki Krakowskiej”. Posiadana dotychczas infrastruktura badawcza Laboratorium Inżynierii Wiatrowej została rozbudowana (z 1 do 4 tuneli aerodynamicznych) co znacząco zwiększyło wachlarz oferowanych usług badawczych. Na uwagę zasługuje zarówno rozmiar przestrzeni roboczych tuneli aerodynamicznych jak i możliwość symulacji warunków środowiskowych (m.in. opad, załodzenie, temperatura, wiatr). We wrześniu 2024r. inwestycja uzyskała aprobatę środowiska specjalistów (w tym członków Polskiego Stowarzyszenia Inżynierii Wiatrowej PSIW i Międzynarodowego Stowarzyszenia Inżynierii Wiatrowej IAWWE) w ramach międzynarodowej konferencji EEBP X, podczas której odbyła się oficjalna prezentacja laboratorium LAŚ PK.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Peters L., LAŚ – inwestycja dla zdrowia i życia, Nasza Politechnika 12(244)2023
- [2] Flaga A., Flaga Ł., Laboratorium Aerodynamiki Środowiskowej Politechniki Krakowskiej i jego możliwości badawcze. Jedyne takie na świecie – Laboratorium Aerodynamiki Środowiskowej Politechniki Krakowskiej, Politechnika Krakowska, Kraków, 2024
- [3] Flaga Ł., Flaga A., New big-size wind tunnels of the Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology and their research potential in wind, snow and environmental engineering, Materials of the EEBP X International Conference, Cracow University of Technology, Cracow, 2024