

Koordynator: Konstanty MARSZAŁEK

Tomasz BARSZCZ (1), Ireneusz CZAJKA (2, 3), Kajetan DZIEDZIECH (1), Roman FILIPEK (2, 3), Maksymilian HOMA (7), Adam JABŁOŃSKI (1), Marcin JANKOWSKI (7), Jakub KATERLA (7), Krzysztof KOŁODZIEJCZYK (2, 3), Gabriela LEWIŃSKA (6), Konstanty MARSZAŁEK (4, 5, 6), Jędrzej MINDA (2, 3), Karolina PAPIS-FRĄCZEK (7), Krzysztof PYTEL (2, 3), Janusz RYBAK (5), Krzysztof SORNEK (7), Katarzyna SUDER-DĘBSKA (2, 3), Katarzyna UNGEHEUER (4)

II. Rozproszone źródła energii

Abstrakt: W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki prac prowadzonych przez zespoły zajmujące się energetyką wiatrową, fotowoltaiką cienkowarstwową i organiczną oraz alternatywnymi technologiami energetycznymi. Omówiono metody wsparcia ruchu urządzeń energetyki rozproszonej, modelowanie elementów elektrowni wiatrowych, projektowanie i walidację nowoczesnych turbin wiatrowych, a także efekty prac nad innowacyjnymi technologiami, takimi jak mikroskalowe instalacje słoneczne (komin słoneczny z akumulacją ciepła, moduły fotowoltaiczne wyposażone w system chłodzenia i czyszczenia wodnego) oraz wysokotemperaturowy magazyn ciepła. Zaprezentowano również metody modyfikacji absorberów w ogniach organicznych oraz sposoby wytwarzania i badania cienkowarstwowych ogniw tlenkowych i optycznych filtrów elektrochromowych do zastosowań kosmicznych.

Słowa kluczowe: energetyka wiatrowa, fotowoltaika cienkowarstwową i organiczną, aplikacje kosmiczne, alternatywne technologie energetyczne, czyste technologie energetyczne

W ostatnich latach energetyka rozproszona z tematu gorących dyskusji pomiędzy różnymi europejskimi grupami nacisku urosła do rangi podstawy bezpieczeństwa energetycznego nie tylko na Starym Kontynencie, ale i na całym świecie. Kilka krajów podało już terminy uruchomienia elektrowni fotowoltaicznych na orbicie okołoziemskiej, co usunie podstawową wadę takich instalacji – okresową pracę dobową. Rosną nakłady finansowe, zarówno rządowych, jak prywatnych inwestorów, na rozbudowę sieci wiatrowych i fotowoltaicznych. W Polsce mamy już 1,5 miliona instalacji fotowoltaicznych, a liczba obiektów wiatrowych (w tym planowanych na wodach przybrzeżnych, z generatorami o dużej mocy – 10 i 15 MW) wciąż rośnie. Akademia Górniczo-Hutnicza od samego początku bierze udział w pracach badawczych i aplikacyjnych dotyczących energetyki rozproszonej.

Uczelnia jest również członkiem Rady Koordynacyjnej ds. Rozwoju Sektora Fotowoltaiki działającej przy Ministerstwie Klimatu i Środowiska. W niniejszym artykule zaprezentowane zostały aktywności zespołów naukowych AGH zajmujących się energetyką wiatrową i fotowoltaiczną oraz innymi alternatywnymi technologiami energetycznymi.

1. Cyfryzacja i wsparcie utrzymania ruchu urządzeń energetyki rozproszonej

Pomiar i analiza drgań mechanicznych to dobrze ugruntowana metoda służąca do utrzymania ruchu urządzeń energetyki rozproszonej w wielu gałęziach przemysłu. Wzrost znaczenia paradygmatu Przemysłu 4.0 jest impulsem, który przyspiesza jej rozwój i powoduje coraz szersze zastosowanie. Jeszcze 20 lat temu systemy monitorowania i diagnostyki (*condition monitoring systems*, CMS) były bardzo kosztowne i znajdowały zastosowanie w przemysłach energetycznym czy chemicznym. Rozwój energetyki wiatrowej był istotnym impulsem, który spowodował rozpowszechnianie systemów CMS i spadek ich cen.

Wraz z gwałtownym rozwojem technologii Przemysłu 4.0 widzimy pojawianie się w nich nowych trendów. Najistotniejsze z nich to: układy o niskim zapotrzebowaniu na energię, szybka komunikacja bezprzewodowa i technologie chmurowe.

W konsekwencji pojawiają się liczne propozycje nowych produktów, np. bezprzewodowe czujniki drgań. Instalacja systemu CMS nie musi już oznaczać montażu kilkuset metrów kabli i może być zrealizowana w krótkim czasie. Nowoczesne czujniki drgań potrafią pracować przez kilka lat na jednej baterii. Dane o stanie dynamicznym maszyny i ostrzeżenia o możliwych niesprawnościach są przekazywane do systemów zarządzania w czasie rzeczywistym. W bazach pojawiają się gigabajty i terabajty danych, co z kolei pozwala na rozwój dokładniejszych algorytmów *machine learning*, które wspierają ekspertów-diagnostów w szybkiej i ekonomicznej analizie danych. Szerokie wdrażanie technologii Przemysłu 4.0 niesie też ze sobą ryzyka i zagrożenia, które zmieniają równowagę na rynku i wpływają na długoterminowe powiązanie dostawcy i użytkownika systemów. Ich zastosowanie jest jednak niezbędne, jeżeli chcemy utrzymywać wysokie tempo rozwoju przemysłu i wzrost dyspozycyjności parku maszynowego. W dalszej części artykułu wymienione zostaną wybrane osiągnięcia pracowników Katedry Robotyki i Mechatroniki AGH.

1.1. System monitorowania stanu dynamicznego turbin wiatrowych

W ramach projektów krajowych i międzynarodowych opracowany został innowacyjny system monitorowania stanu dynamicznego turbin wiatrowych. Wykorzystuje on diagnostykę wibroakustyczną bazującą na analizie sygnałów sygnałów drgań mechanicznych, co umożliwia zidentyfikowanie źródeł sygnałów wibracyjnych pochodzących z różnych części maszyn. Z punktu widzenia analizy wibracji części maszyn turbiny wiatrowej dzielą się na następujące grupy: wał, wirnik z łopatkami, sprzęgło, przekładnia, łożysko toczne. Każda z tych grup reprezentuje określone zachowanie dynamiczne i generuje charakterystyczne wibracje. Najważniejszym parametrem każdej części jest tak zwana częstotliwość charakterystyczna, którą można opisać jako częstotliwość powtarzania się zjawiska związanego z tą częścią. Wszystkie

częstotliwości charakterystyczne zależą od prędkości obrotowej wirnika. Dlatego najłatwiej przedstawia się ją jako stosunek częstotliwości do prędkości obrotowej wału. System opracowany i rozwijany m.in. w ramach projektów KASTRION i SUPREME posiada unikalne właściwości, które pozwalają na ciągłe monitorowanie turbin wiatrowych i automatyczne wykrywanie niesprawności. Bardzo istotne jest, że system funkcjonuje poprawnie dla maszyn, które – jak turbiny wiatrowe czy pompy ciepła – pracują w silnie zmieniających warunkach eksploatacyjnych.

1.2. Metoda wykrywania uszkodzeń przekładni planetarnych dużej mocy

Przedstawiony system zapewnił wysokiej jakości dane diagnostyczne i możliwość automatycznej oceny stanu urządzenia. W dalszej kolejności konieczne było wykrywanie złożonych elementów, takich jak przekładnie planetarne. Koncepcja Adama Jabłońskiego i Tomasza Barszcza jest pierwszą polską metodą oceny stanu technicznego przekładni obiegowych, która uzyskała ochronę patentową UPRP (PL 223044B1). W skali światowej istnieje kilkanaście rozwiązań dotyczących diagnostyki przekładni obiegowych, ale wszystkie dotychczas znane dotyczą mechanizmów prostszych, potocznie zwanych „planetarnymi”, które generują bardziej powtarzalne sygnały. Diagnostyka tego typu przekładni jest obecnie jednym z najważniejszych problemów badawczych w technologii maszyn wolnoobrotowych. Urządzenia tego typu są trudne do diagnozowania i bardzo kosztowne, o krytycznym znaczeniu dla ciągłości produkcji w takich dziedzinach przemysłu jak energetyka wiatrowa czy górnictwo podziemne i odkrywkowe.

Metoda bazuje na wyznaczaniu trójwymiarowej mapy mocy sygnału drgań w funkcji kolejnych obrotów przekładni oraz w funkcji kolejnych ząbów. Aby sporządzić mapę, opracowano autorską metodę przepróbkowania sygnału, uwzględniającą właściwości kinematyczne oraz kinetostatyczne badanej przekładni, co jest zupełnie nowym podejściem naukowym.

Metoda ICPCP pozwala nie tylko na detekcję uszkodzenia przekładni, ale dzięki wizualizacji dowolnych stopni modulacji sygnału pozwala dodatkowo na identyfikację uszkodzeń każdego z jej elementów na każdym stopniu, nawet dla złożonych przekładni wielostopniowych.

O wartości metody świadczy uzyskanie następujących wyróżnień:

- nagroda Prezesa Rady Ministrów za wyróżnioną pracę doktorską (2014),
- nagroda programu Start Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2013),
- stypendium MNiSW dla wybitnych młodych naukowców (2013),

a także publikacje w czasopismach z listy JCR i wystąpienia na konferencjach międzynarodowych (BINDT, MFPT, CMMNO).

1.3. Nowoczesne metody automatycznej diagnostyki urządzeń energetycznych

W miarę wzrostu liczby zainstalowanych systemów diagnostycznych konieczne stało się podjęcie prac badawczych nad automatyzacją procesów konfiguracji i analizy danych wynikowych. Potrzeba ta została wygenerowana przez przemysł, ponieważ czas pracy ekspertów-diagnostów jest bardzo kosztowny, głównie z uwagi na długie szkolenie i niską dostępność. W efekcie realizacji projektu BLASTER powstał zupełnie nowy produkt służący do oceny stanu technicznego maszyn wchodzących w skład oferty lidera projektu (AMC TECH). Charakteryzuje się on innowacyjną funkcjonalnością „inteligentnego systemu monitorowania” maszyn, dzięki zastosowaniu inteligentnego algorytmu redukcijno-redundantnego (RR) w ramach zupełnie nowej architektury *failure-to-failure* (FTF). Główne innowacyjne cechy funkcjonalne systemu obejmują brak konieczności konfiguracji znacznej większości parametrów (obecnych w dostępnych rozwiązaniach) oraz automatyczną detekcję uszkodzeń

– poprzez wskazanie metaparametrów analizy widmowej, tj. automatyczne wyznaczenie rodzaju widma (*spectrum*, *order spectrum*, *envelope spectrum*, *envelope order spectrum* oraz *TSA spectrum*), automatyczne wskazanie optymalnej rozdzielczości widmowej (wg kryterium statystycznego A-score) oraz automatyczne wskazanie pasma częstotliwości/*order*, w którym dane w przestrzeni czas-częstotliwość/*order* charakteryzuje się najwyższą wartością wskaźnika statystycznego. Uzyskane wyniki pozwoliły na redukcję ilości danych wymaganych do konfiguracji systemu, a także czasu pracy (redukcja czasu konfiguracji), dzięki automatycznemu wyznaczaniu danych referencyjnych. Kolejną korzyścią jest obniżenie kosztów instalacji poprzez opracowanie zasady działania opartej na obliczeniach tymczasowych wykorzystywanych w algorytmie redukcijno-redundantnym, a także opracowanie innowacyjnego modułu wizualizacji *Big Data* poprzez automatyczne wskazanie pasm widmowych i odwołanie do struktur typu *parent array*, redukcję kosztów uruchomienia instalacji poprzez automatyzację procesu konfiguracji w algorytmie RR czy uzyskanie funkcjonalności autonomicznej analizy reprezentacji spektralnych w dziedzinach częstotliwości i rzędów za pomocą algorytmu redukcijno-redundantnego.

1.4. Nowe metody ekonomicznej cyfryzacji diagnostyki maszyn wirnikowych

W miarę rozwoju technik UR obserwujemy spadek cen urządzeń (czujników i jednostek akwizycji) monitorowania drgań. W rezultacie coraz powszechniejsze stało się dążenie do opracowania dostępnych metod monitorowania, które mogą być zastosowane np. do elementów pomp ciepła. Wymagało to podjęcia tematu efektywnej cyfryzacji, która mogłaby być osiągnięta dużo niższymi nakładami niż zaawansowana diagnostyka dużych turbin wiatrowych. Konieczne było również brzegowe (Edge) przetwarzanie danych, przesyłanie ich do chmury oraz szerokie wdrożenie metod sztucznej inteligencji do zautomatyzowanej analizy. Prace te zrealizowano w ramach projektu CLOUDER.

Przedmiotem projektu było zwiększenie poziomu cyfryzacji przemysłu maszynowego poprzez opracowanie systemu umożliwiającego w pełni autonomiczne wykrywanie uszkodzeń maszyn na podstawie analizy danych przesyłanych z zakładu przemysłowego do oprogramowania serwerowego, w nowoczesnej architekturze IIoT. Zasadniczymi warstwami systemu CLOUDER są:

- inteligentne czujniki stanu maszyn w technologii MEMS,
- moduł Edge do akwizycji, przetwarzania i agregacji danych,
- centralny system do zarządzania i analiz danych, z algorytmami automatycznej analizy danych.

Prace projektowe pozwoliły zaprojektować kompletny, gotowy do wprowadzenia na rynek produkt. Wynikami projektu były:

- model czujnika MEMS,
- struktura i architektura sterownika Edge nowej generacji,
- modyfikacje struktury algorytmu RR, tak aby był dostosowany do rozproszonej architektury systemu; zasadniczą zmianą jest możliwość iteracyjnego przetwarzania dynamicznie aktualizowanych struktur macierzowych dla danych pochodzących z różnych źródeł (czujników HF albo LF, modułów Edge, chmury CLOUDER).

2. Modelowanie elementów elektrowni wiatrowych

W Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH realizowane są badania poświęcone aspektom technicznemu, środowiskowemu i ekonomicznemu energetyki wiatrowej. Prace Zespołu Przepływów i Akustyki w Systemach Energetycznych koncentrują się na dyskretnym modelowaniu turbin wiatrowych na potrzeby systemów energetycznych, analizie wpływu efektów aeroelastycznych na sprawność turbin oraz optymalizacji topologii łopat turbin

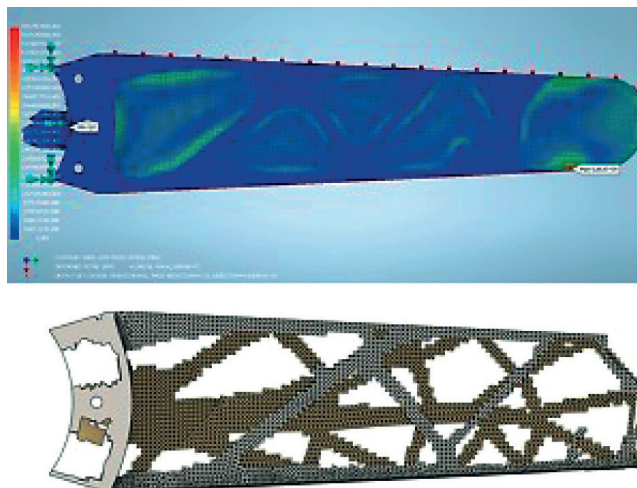
wiatrowych. Odrębną grupę stanowią opracowania związane z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych do oceny potencjału energetyki wiatrowej oraz budową stanowisk badawczych do pomiaru parametrów pracy turbin w różnych warunkach eksploatacyjnych. Na dorobek zespołu składają się także analizy wpływu lokalnych zasobów wiatru oraz parametrów konstrukcyjnych i ekonomicznych na efektywność i opłacalność projektów wiatrowych. Wszystkie te prace wspierają rozwój technologii zrównoważonej energetyki oraz doskonalenie metod projektowania turbin wiatrowych.

W omawianych pracach zintegrowano metody numeryczne i eksperymentalne, co umożliwiło odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy turbin oraz prognozowanie ich efektywności w złożonych systemach elektroenergetycznych. Do symulacji działania urządzeń wykorzystywano modele dyskretnie i uwzględniono lokalne warunki meteorologiczne, zmienne obciążenia oraz charakterystyki aerodynamiczne.

W celu oceny wpływu strategii sterowania i struktury systemu elektroenergetycznego na produkcję energii analizowano warianty konfiguracji i sterowania turbin. Wykorzystywano sprzężone symulacje CFD–FEM pozwalające na analizę interakcji między deformacjami strukturalnymi a rozkładem ciśnienia oraz siłami aerodynamicznymi. Struktura łopat turbiny wiatrowej przy ograniczonej gęstości siatki obliczeniowej przedstawiono na Rys. 1.

Wszystkie te działania przełożyły się na następujące osiągnięcia badawcze.

- Zidentyfikowano źródła hałasu aerodynamicznego z wykorzystaniem środowisk ANSYS Fluent i OpenFOAM oraz powiązano je z parametrami komponentów turbiny.
- Przeprowadzono topologiczną optymalizację łopat z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych.
- Zrealizowano sprzężone symulacje FSI.
- Zweryfikowano modele aerodynamiczne w tunelu aerodynamicznym.
- Opracowano dyskretny model turbiny wiatrowej (*black-box*); zaimplementowano go w środowiskach Matlab/Simulink i OpenModelica.

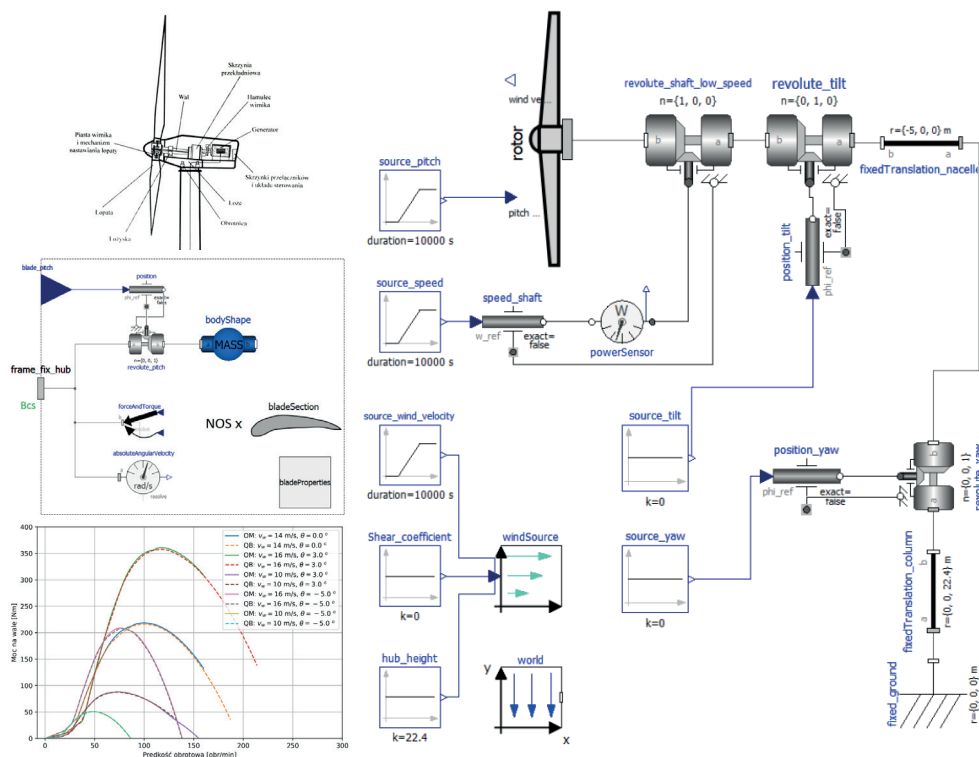


Rys. 1. Struktura łopaty turbiny wiatrowej przy ograniczonej gęstości siatki obliczeniowej

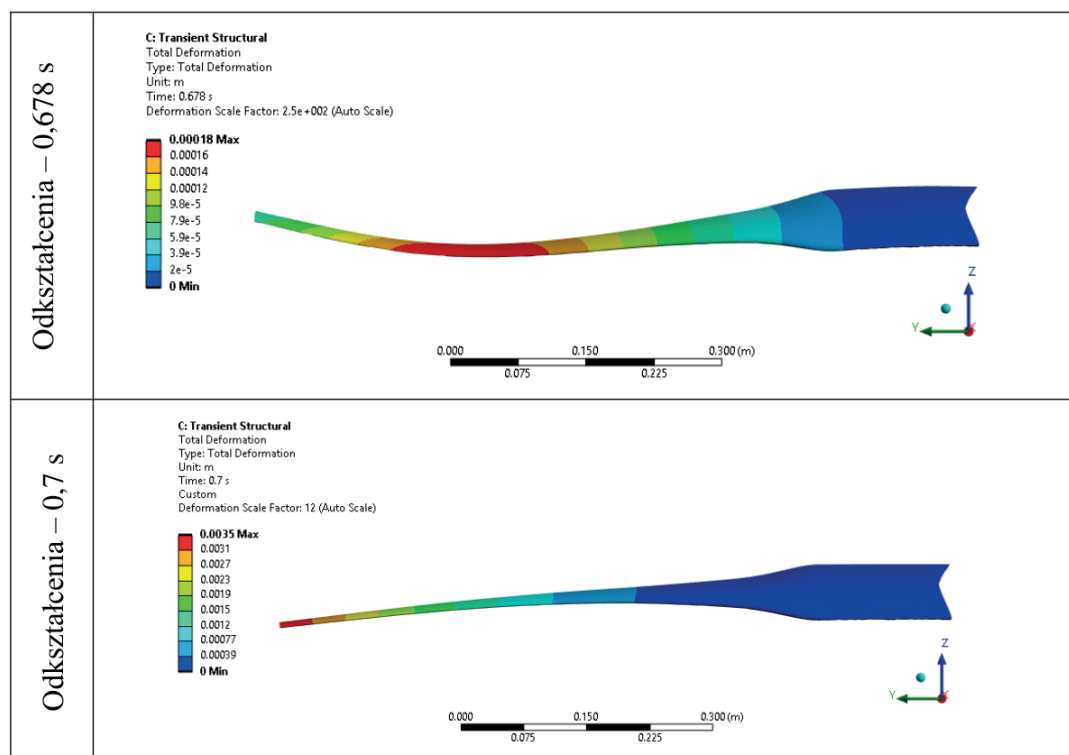
We wspomnianych działaniach wykorzystano narzędzia ANSYS Fluent, CFX, OpenFOAM, Palabos, LBM i algorytmy ML, MATLAB i ParaView.

Ponadto opracowano model turbiny wiatrowej przeznaczony do integracji z modelami systemów energetycznych. Zakres prac w tym obszarze obejmował: modelowanie fizyczne i strukturalne turbiny, symulację przepływu i charakterystyk aerodynamicznych, modelowanie układu napędowego

i generatora, sterowanie dynamiczne i profilowanie warunków pracy, analizę wydajności energetycznej, zintegrowane modelowanie systemowe. Badano także wpływ aeroelastyczności łopaty turbin wiatrowych na moment obrotowy i sprawność w realistycznych warunkach eksploatacyjnych. Wykorzystano sprzężone symulacje CFD-MES uwzględniające przepływ powietrza i deformacje strukturalne łopaty (Rys. 2 i 3).



Rys. 2. Modelowanie systemów energetycznych



Rys. 3. Odształcenia struktury łopat elektrowni wiatrowej

Oferta badawcza zespołu obejmuje prace badawczo-rozwojowe ukierunkowane na analizę i modelowanie złożonych zjawisk przepływowych i akustycznych. W przeprowadzonych pracach opracowano i zweryfikowano zaawansowane modele numeryczne turbin wiatrowych, opracowano model *black-box* umożliwiający odwzorowanie rzeczywistej pracy turbiny, zastosowano sprzężone symulacje do analizy wpływu odkształceń łopat na sprawność układu oraz do identyfikacji warunków rezonansowych, wykorzystywano algorytmy ewolucyjne i metody optymalizacji topologicznej. Analizy umożliwiły identyfikację źródeł hałasu i zaprojektowanie geometrii o zredukowanej emisji akustycznej. Uwzględnienie turbulentnych i zmiennych warunków środowiskowych wykazało, że konieczne jest zastosowanie dynamicznych strategii sterowania. Modele poddano weryfikacji w testach tunelowych i terenowych. Opracowane narzędzia przygotowano do zastosowania w systemach hybrydowych z możliwością dynamicznej optymalizacji pracy w oparciu o dane meteorologiczne w czasie rzeczywistym.

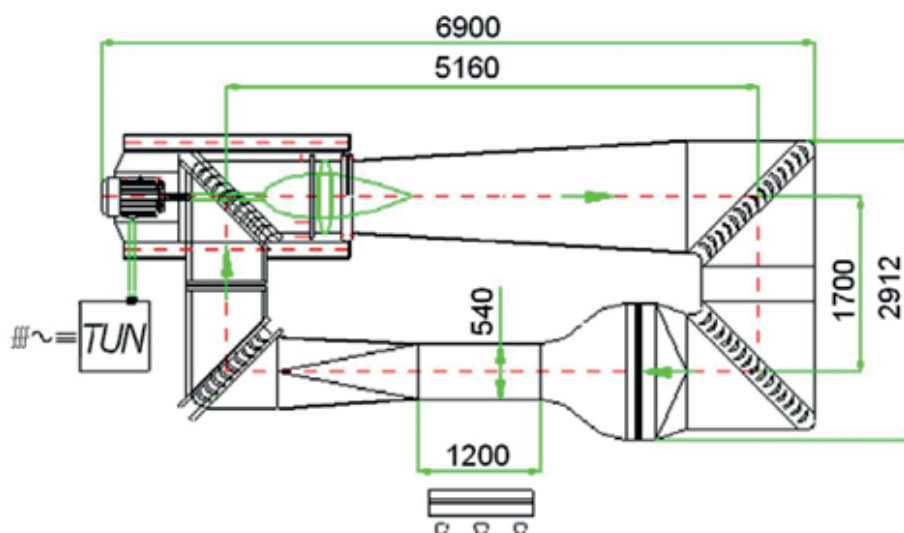
3. Zintegrowane podejście do projektowania i walidacji nowoczesnych turbin wiatrowych

Zespół Przepływów i Akustyki w Systemach Energetycznych Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH prowadzi badania numeryczne i eksperymentalne w zakresie aerodynamiki, akustyki i optymalizacji konstrukcji turbin. Prace obejmują pomiary w tunelu aerodynamicznym, analizę emisji hałasu, wpływ warunków środowiskowych, a także zagadnienia integracji z magazynami energii i instalacjami hybrydowymi. Celem działań jest dostarczenie danych i narzędzi wspierających projektowanie nowoczesnych i zrównoważonych systemów wiatrowych.

W Laboratorium Aerodynamiki i Maszyn Przepływowych prowadzone są badania wykorzystujące otwarty i zamknięty tunel aerodynamiczny. Stano wisko pomiarowe zostało zaprojektowane w celu przeprowadzenia eksperymentalnej analizy sił aerodynamicznych oddziałujących na profile lotnicze, ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowania

w energetyce wiatrowej. Badania umożliwiły generowanie zarówno laminarnych, jak i turbulentnych strumieni powietrza o kontrolowanej prędkości (Rys. 4 i 5). Przestrzeń pomiarowa została wyposażona w przezroczyste ściany, co pozwoliło na obserwację przepływu oraz rejestrację zjawisk wizualnych, takich jak separacja strugi czy powstawanie struktur wirowych. Do pomiaru sił działających na profil zastosowano trójosiowy układ tensometryczny, który umożliwiał jednoczesną rejestrację siły nośnej, siły oporu oraz momentu skręcającego. Układ pomiarowy został uzupełniony o specjalne oprogramowanie.

Dane były eksportowane, co ułatwiało dalszą analizę i integrację z narzędziami symulacyjnymi. W przeprowadzonych badaniach terenowych skupiono się na ocenie skuteczności predykcyjnych algorytmów sterowania turbiną wiatrową oraz na analizie wpływu turbulencji na wytwarzanie mocy w systemach hybrydowych. Szczególną uwagę poświęcono WTB. Klasyczne metody inspekcji, choć skuteczne, są kosztowne i ryzykowne, dlatego coraz większą rolę odgrywają UAV wyposażone w systemy fotogrametrii, LIDAR oraz algorytmy segmentacji obrazu do zdalnego monitorowania stanu technicznego.



Rys. 4. Tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym

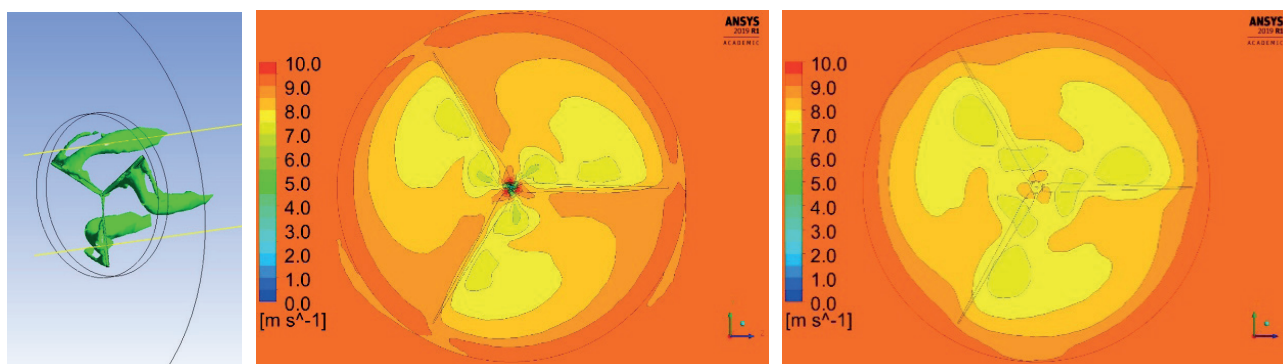


Rys. 5. Przestrzeń pomiarowa tunelu aerodynamicznego

Równolegle prowadzone są prace nad wdrażaniem komplementarnych metod diagnostycznych, takich jak obrazowanie termowizyjne, badania ultradźwiękowe oraz analiza emisji akustycznej, umożliwiających wykrywanie mikropęknięć, warstwień wewnętrznych oraz innych defektów strukturalnych, które mogą prowadzić do degradacji wytrzymałościowej komponentów turbin wiatrowych (Rys. 6). W ramach badań skoncentrowano się również na identyfikacji i charakterystyce mechanizmów generowania hałasu aerodynamicznego. Wykorzystano metody CFD (*computational fluid dynamics*, obliczeniowa dynamika płynów) oraz przeprowadzono modelowanie akustyczne z użyciem algorytmu LBM (*lattice Boltzmann method*, metoda kratowa Boltzmanna). Przeanalizowano wpływ warunków środowiskowych na obciążenia dynamiczne łopat oraz całkowitą sprawność konwersji energii. Zastosowanie EA oraz ML umożliwiło automatyczną optymalizację geometrii profili łopat i strategii sterowania.

Rozwijano także koncepcję hybrydowych układów wytwórczych integrujących turbiny wiatrowe z instalacjami fotowoltaicznymi oraz systemami magazynowania energii. Całość badań wpisuje się w nurt nowoczesnej inżynierii mechanicznej, łącząc zagadnienia mechaniki płynów, akustyki technicznej, materiałoznawstwa oraz automatyzacji procesów decyzyjnych, dzięki czemu możliwe jest opracowanie zrównoważonych i efektywnych rozwiązań dla sektora energetyki wiatrowej.

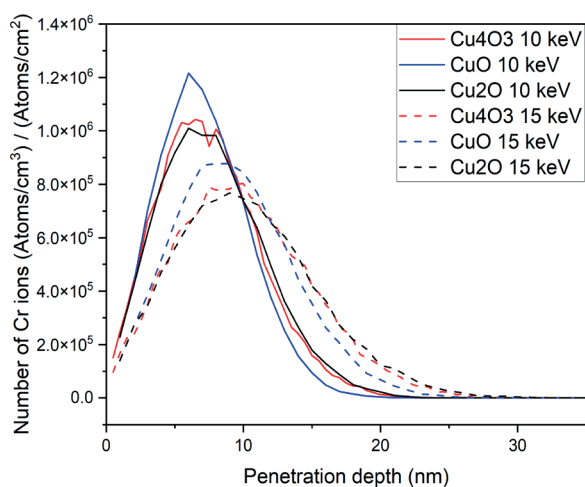
W projektowaniu nowoczesnych turbin wiatrowych szczególne znaczenie przypisuje się korelacji pomiędzy wynikami modelowania numerycznego a wynikami badań eksperymentalnych. W badaniach potwierdzono wysoką zgodność wyników analiz CFD z danymi eksperymentalnymi. Wykazano istotny wpływ sprzężenia CFD-FEM na poprawność odwzorowania obciążeń aeroelastycznych. Zoptymalizowane topologicznie geometrie łopat przyczyniły się do zwiększenia sprawności energetycznej w testach laboratoryjnych. Kalibracja modeli numerycznych na podstawie danych terenowych istotnie podniosła ich wiarygodność. Zarekomendowano stosowanie elastycznych łopat o zmiennej sztywności, dynamiczne sterowanie kątem natarcia oraz modyfikacje profilu w celu minimalizacji hałasu i strat przepływowych. Walidacja sił aerodynamicznych w tunelu potwierdziła zgodność współczynników sił aerodynamicznych z wynikami CFD. Testy ujawniły wpływ deformacji łopat na pojawianie się rezonansów powyżej progowej prędkości wiatru. Zidentyfikowano główne źródła hałasu aerodynamicznego, wskazując na możliwość jego redukcji przez odpowiednie modyfikacje geometryczne. Zmienność lokalnych warunków atmosferycznych wpływała na stabilność momentu i generowanej mocy, co uzasadniało konieczność wdrażania adaptacyjnych algorytmów sterowania. Prace eksperymentalne zespołu stanowią punkt wyjścia dla dalszego rozwoju nowoczesnych układów wiatrowych.



Rys. 6. Symulacja numeryczna pracy turbiny wiatrowej, średnia prędkość w płaszczyźnie pionowej za wirnikiem w odległości odpowiednio: 5 m i 15 m

4. Badania wpływu korpuskularnej części promieniowania kosmicznego na komponenty cienkowarstwowego ogniwa fotowoltaicznego

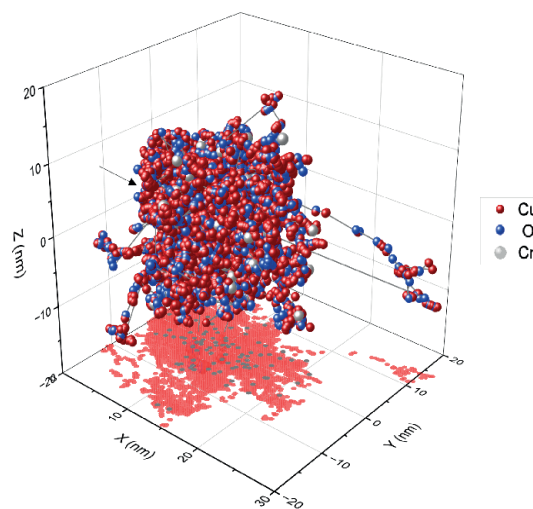
Zespół Fotowoltaiki i Optoelektroniki Cienkowarstwowej działający w Instytucie Elektroniki WIEiT AGH zajmuje się metodami wytwarzania cienkich warstw oraz badaniami ich właściwości w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego i różnych zakresach temperatur. Zarówno warstwy, jak i systemy z nich zbudowane, mogą być stosowane w fotowoltaice naziemnej oraz kosmicznej. Metody używane do depozycji warstw to jonowe reaktywne rozpylanie magnetronowe, jonowe rozpylanie stałoprądowe, depozycja warstw atomowych ALD oraz naparowanie próżniowe. Metodą domieszkowania warstw była implantacja jonowa. Prace implantacyjne wykonano w implantatorze w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie. Proces implantacji poprzedzono obliczeniami symulacyjnymi z użyciem programu SRIMS autorstwa Biersacka i Zieglera. Przykładowe wyniki dla różnych energii implantowanych jonów oraz wybranej ich ilości (dozy) przedstawiono na Rys. 7.



Rys. 7. Profile głębokości wnikania implantowanych jonów

Jak widać, maksymalna liczba implantowanych jonów deponuje się na ok. 10 nm. Aby uzyskać liniowy rozkład gęstości implantu, należy przeprowadzić proces wygrzewania warstwy w celu dyfuzji implantowanych jonów w głąb warstwy.

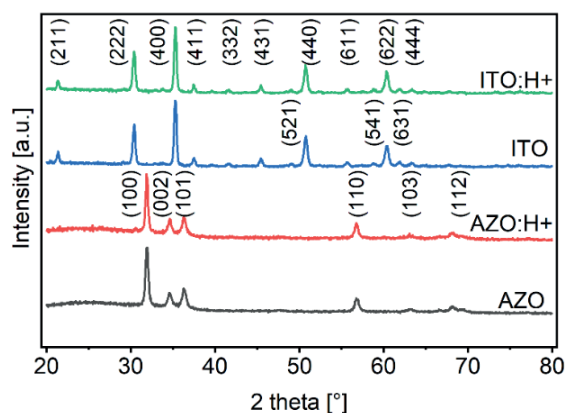
Rozkłady przestrzenne wynikające z kolizji z atomami sieci wewnątrz warstwy przedstawiono na Rys. 8. Liczbę zaimplantowanych jonów na ilustracji ograniczyła rozdzielczość graficzna. W rzeczywistości wynosiła ona miliony atomów na centymetr kwadratowy. Po implantacji warstwy były wygrzewane w celu uzyskania jednnorodnej koncentracji domieszki w całej objętości. Przeprowadzone po wygrzewaniu profile stężenia domieszkowanych jonów chromu wykazały ich liniowe stężenie w całej objętości domieszkowanej warstwy tlenku miedzi. Przebadano właściwości strukturalne, optyczne i elektryczne wszystkich komponentów wchodzących w skład ogniwa fotowoltaicznego.



Rys. 8. Obraz kaskady implantowanych jonów Cr do warstwy CuO

Badania przeprowadzono zarówno przed, jak i po bombardowaniu warstw protonami o energii 226,5 MeV. Przykład rentgenogramów dla warstw elektrodowych tlenku indu domieszkowanego cyna (ITO) oraz tlenku cynku domieszkowanego glinem (AZO) przedstawiono na Rys. 9. Otrzymane wyniki nie wykazały różnic wynikających z bombardowania, mimo że użyta doza osiągnęła wartość ok. 100 lat przebywania na niskiej orbicie okołoziemskiej. Jak

widać na dyfraktogramie, zmianie nie uległy ani pozycja, ani amplitudy pików.

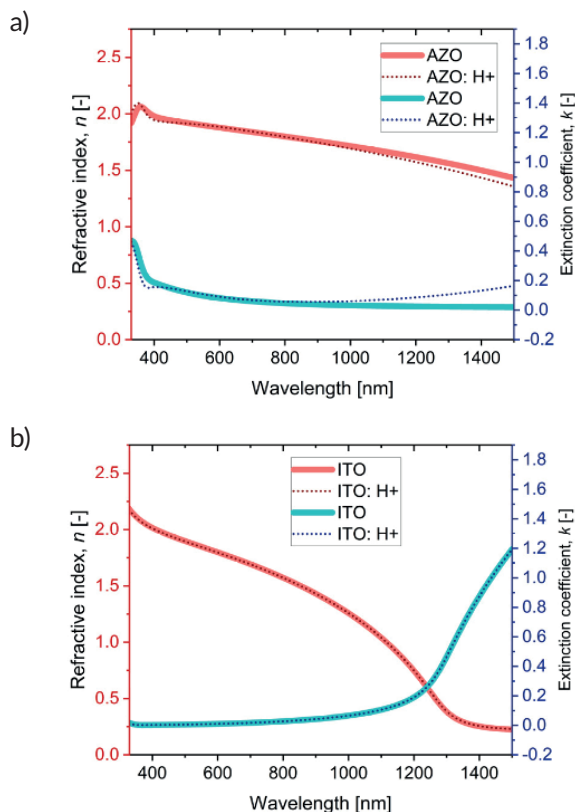


Rys. 9. Dyfraktogramy warstw elektrodowych przed bombardowaniem i po nim protonami o energii 226,5 MeV

Przeprowadzono również badania właściwości optycznych, takich jak współczynnik załamania i współczynnik ekstynkcji, metodą elipsometrii spektroskopowej dla warstw tlenku cynku domieszkowanego glinem AZO i tlenku indu domieszkowanego cyną ITO, zarówno przed, jak i po bombardowaniu protonami o energii 226,5 MeV. Podobnie jak w przypadku badań strukturalnych nie stwierdzono różnic we właściwościach warstw spowodowanych bombardowaniem. Wyniki badań elipsometrycznych przedstawiono na Rys. 10. Linia ciągła reprezentuje wyniki przed bombardowaniem protonami, a linia kropkowa po bombardowaniu.

Przeprowadzono depozycje wszystkich komponentów cienkowarstwowego tlenkowego ogniwa fotowoltaicznego. Wytworzono również kompletne ogniwo cienkowarstwowe naniesione na różnorodne podłoża. Przebadano właściwości wszystkich komponentów ogniwa, zarówno przed, jak i po bombardowaniu protonami o energii 226,5 MeV. Skontrolowano również charakterystyki prądowo-napięciowe otrzymanych ogniw. Przeprowadzone badania wpisują się w bieżące problemy rozwoju fotowoltaiki, szczególnie że budowa elektrowni fotowoltaicznych na orbicie wiąże się z koniecznością wywiezienia tam dużej liczby ogniw. Powszechnie wiadomo, że transport każdego kilograma na orbitę wiąże się z poważnymi kosztami.

Dlatego prowadzone są intensywne badania ogniw cienkowarstwowch ze względu na ich znikomą masę i możliwość depozycji na elastyczne podłoża.

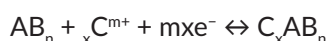


Rys. 10. Stałe optyczne: współczynnik załamania i współczynnik ekstynkcji dla warstw a) AZO; b) ITO przed bombardowaniem i po nim protonami o energii 226,5 MeV

5. Elektrochromowe filtry cienkowarstwowe do zastosowań w oknach statków kosmicznych

Niniejszy rozdział przedstawia badania Zespołu Fotowoltaiki i Optoelektroniki Cienkowarstwowej nad systemami elektrochromowymi. Należą one do grupy tak zwanych systemów inteligentnych (*smart materials*), ponieważ wykazują widoczne zmiany właściwości optycznych (w tym barwy) w odpowiedzi na zewnętrzne bodźce, takie jak przyłożenie niewielkiego napięcia elektrycznego. Kluczowym mechanizmem działania systemów elektrochromowych jest wprowadzanie

jonów do warstwy elektrochromowej, co prowadzi do silnej absorpcji światła w zakresie widzialnym i podczerwonym. Odwrócenie polaryzacji potencjału elektrycznego umożliwia przywrócenie pierwotnych właściwości optycznych warstwy. Co więcej, systemy te wykazują efekt pamięci, co oznacza, że mogą utrzymywać swój stan (przezroczysty lub zabarwiony) nawet po odcięciu źródła zasilania, pod warunkiem, że nie dochodzi do przepływu ładunku. Ta cecha, w połączeniu z coraz szerszym zastosowaniem w życiu codziennym, czyni systemy elektrochromowe niezwykle atrakcyjnymi. Mechanizm elektrochemicznej koloryzacji dla tlenków metali opisany jest w równaniu poniżej:

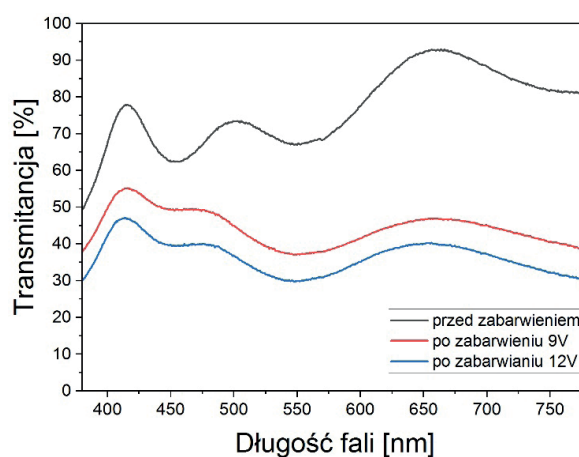
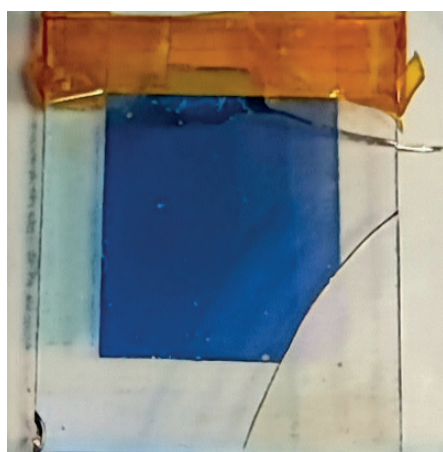


System elektrochromowy składa się z szeregu cienkich warstw. Składniki jego ogólnej struktury to: transparentna elektroda przewodząca/warstwa elektrochromowa/warstwa przewodnika jonowego/warstwa barierowa/transparentna elektroda przewodząca. Warstwy zaprezentowane w pracy zostały naniesione takimi metodami próżniowymi jak jonowe rozpylanie magnetronowe oraz naparowywani próżniowe. Na Rys. 11 przedstawiono zabarwioną na ciemnoniebieski kolor warstwę tlenku wolframu (WO_3) oraz charakterystykę zmian transmisji w obszarze widzialnym zachodzących pod wpływem niewielkiego napięcia stałego.

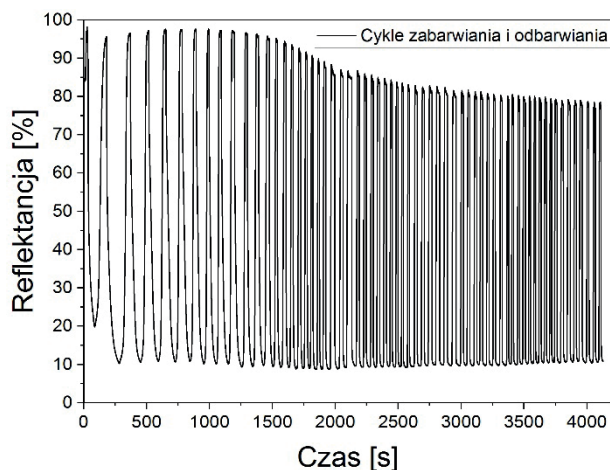
Systemy takie mogą być używane jako filtry optyczne zarówno w stacjach kosmicznych, jak i w budynkach

mieszkalnych na ziemi. Dzieje się tak z dwóch powodów. Pierwszy to ograniczenie transmisji światła przechodzącego przez taki filtr z kilkudziesięciu do kilku procent. Drugi to odbicie promieniowania elektromagnetycznego w zakresie podczerwieni. Oznacza to, że filtry mogą być używane do regulacji przepływu ciepła przez okna i pełnić ważną funkcję w systemie ogrzewania pomieszczeń. Zmiany odbicia przed zabarwieniem i po nim dla kilkudziesięciu cykli barwienia/odbarwiania przedstawiono na Rys. 12. Dodatkowo system wykazuje efekt pamięci i może przez dłuższe okresy pozostawać w stanie zabarwionym lub niezabarwionym bez poboru energii, co pozwala na jej zaoszczędzenie.

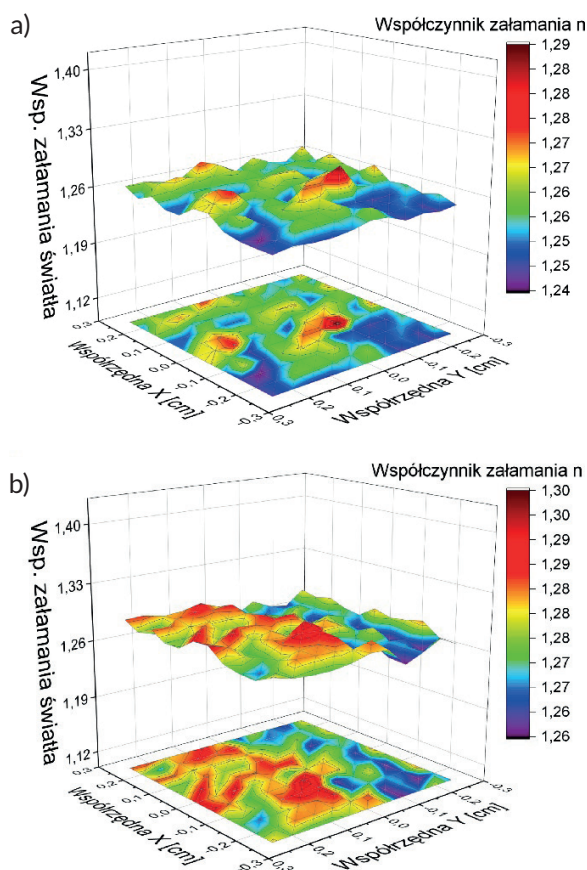
Cienkowarstwowe systemy elektrochromowe wykazują potencjał do zastosowania w oknach statków kosmicznych ze względu na znikomą masę i możliwość depozycji na wszelakich (także elastycznych) podłożach. Stwarza to możliwości ich montażu na dowolnie wybranym elemencie, który wymaga kontroli światła i ciepła. Prezentowane w pracy systemy zostały przebadane na cyklotronie typu Proteus C-235 na oddziaływanie wiązki protonów o energii 226,5 MeV. Zastosowana dorażna protonów odpowiada przebywaniu systemu elektrochromowego na niskiej orbicie okołoziemskiej przez ok. 100 lat. Właściwości systemu oraz cienkich warstw wchodzących w jego skład zostały przebadane zarówno przed bombardowaniem, jak i po nim. Przykładowe wyniki w postaci map jednorodności współczynnika załamania światła zaprezentowano na Rys. 13.



Rys. 11. Widok zabarwionego i niezabarwionego systemu elektrochromowego oraz charakterystyka transmisji w obszarze widzialnym



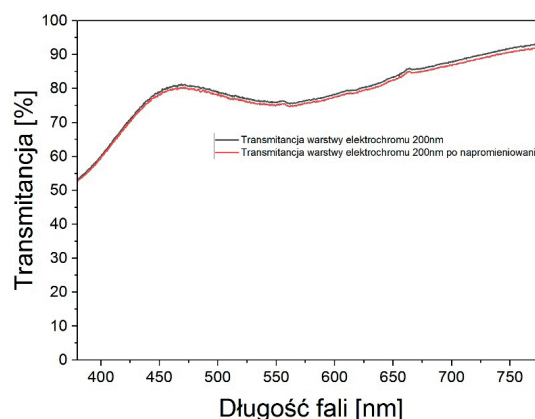
Rys. 12. Zmiana refleksyjności w funkcji czasu dla wielu cykli przełączania



Rys. 13. Mapy jednorodności współczynnika załamania światła: a) przed napromieniowaniem; b) po napromieniowaniu protonami o energii 226,5 MeV

Przebadano właściwości strukturalne, optyczne i elektryczne komponentów przed bombardowaniem protonami i po nim. Charakterystykę transmitancji warstwy WO_3 w zakresie promieniowania widzialnego przebadanej przed bombardowaniem protonami i po

nim przedstawiono na Rys. 14. Sprawdzone również właściwości kompletnego systemu elektrochromowego przed bombardowaniem i po nim. Takie oddziaływanie nie poskutkowało zmianami ani dla komponentów, ani dla systemu.



Rys. 14. Widmo zależności transmitancji warstwy elektrochromowej WO_3 od długości fali w zakresie światła widzialnego (380–780 nm) przed bombardowaniem protonami i po nim

Badania systemów elektrochromowych prowadzone w Zespole Fotowoltaiki i Optoelektroniki Cienkowarstwowej stanowią wkład w rozwój metod optymalizacji zużycia energii cieplnej w pomieszczeniach posiadających okna, zarówno w budynkach mieszkalnych, jak i na statkach kosmicznych. Otwiera to obiecujące perspektywy na zredukowanie zużycia paliw kopalnych i zaoszczędzenie energii.

6. Modyfikacje warstw aktywnych do zastosowań w fotowoltaicznych ogniwach organicznych

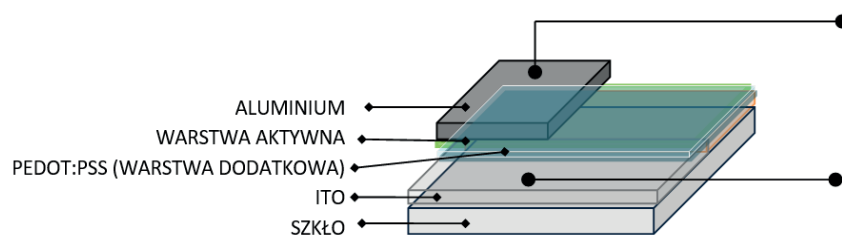
Najnowsza technologia w fotowoltaice, tzw. fotowoltaika trzeciej generacji, wykazała w ostatnich latach znaczny przyrost wydajności. Ogniwa barwnikowe (*dye synthesized solar cells*, DSSC), ogniwa perowskitowe oraz ogniwa organiczne są intensywnie rozwijane zarówno w laboratoriach, jak i do zastosowań praktycznych. Zajmują się nimi m.in. członkowie Zespołu Fotowoltaiki i Optoelektroniki Cienkowarstwowej AGH.

Badania dotyczące ogniw organicznych dotyczą testowania ogniw wielowarstwowych (w tym hybrydowych), nowych architektur ogniw oraz wytwarzania warstw zewnętrznych dodatkowych (m.in. ochronnych lub antyrefleksyjnych), poszukiwaniu lepszych materiałów na elektrody, a także syntezy nowych materiałów używanych w warstwach aktywnych oraz domieszek i dodatków poprawiających wydajność ogniwa. W badaniach prowadzonych przez zespół koncentrowano się na tzw. potrójnych ogniwach organicznych (*ternary solar cells*). Architektura takiego ogniwa została przedstawiona na Rys. 15.

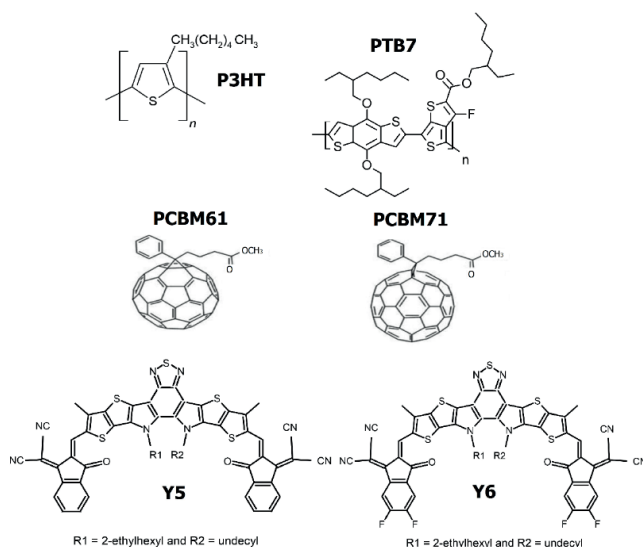
Najistotniejszą częścią struktury jest warstwa aktywna, w której odbywa się proces fotowoltaiczny. Warstwa aktywna stanowi mieszaninę materiału donorowego i akceptorowego. Ogniwa potrójne składają się z trzech głównych komponentów w warstwie aktywnej: 1) dwóch typu donor (D1 i D2), 2) akceptora (A) lub jednego donora (D) i 3) dwóch materiałów typu

akceptor (A1 i A2). Dzięki trzem materiałom ogniwo jest w stanie pochłaniać promieniowanie w szerszym zakresie długości fal, od UV po IR, co zwiększa ilość energii, którą może przekształcić w elektryczność. Dopasowanie orbitali molekularnych badanych materiałów pozwala na zwiększenie transportu ładunku oraz redukcję rekombinacji. W ogniwach organicznych pojawia się również dodatkowy, kaskadowy transport ładunku, co zwiększa prąd zwarcia. Udowodniono również pozytywny wpływ na morfologię warstwy.

W badaniach został użyty sprawdzony układ donor–akceptor poli(3-heksylofien-2,5-dyilu) (P3HT) i akceptor ester metylowy kwasu [6,6]-fenylo-c61-maślowego (PCBM61) (Lewińska et al. 2025b) (Rys. 16). Jako domieszki przebadane zostały materiały bazujące na pochodnych chinolin o helicznej strukturze: 2-metoksy-m,n-dimetylo-6-fenyl-6H-5,6,7-triazadibenzo[f,h] nafto[3,2,1-cd]azulenu (m,n ¼ 8,9; 8,10; 9,10) (oznaczane jako SP).

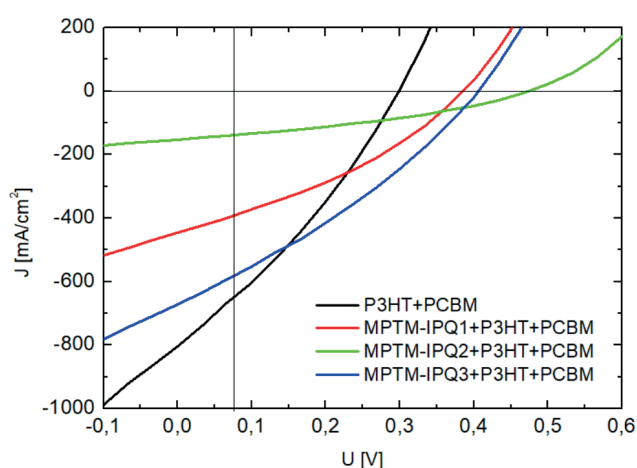


Rys. 15. Przykładowa architektura ogniwa organicznego



Rys. 16. Wzory chemiczne materiałów donorowych (polimery P3HT, PTB7), akceptorów fullerenowych: PCBM61, PCBM71, akceptorów niefullerenowych: Y5, Y6

Z tych materiałów wykonano pierwsze ogniwa na bazie helicenów, zarówno podwójne, jak i potrójne, odpowiednio o architekturach: ITO/P3HT:SP/PEDOT:PSS/Al oraz ITO/P3HT:SP:PCBM/PEDOT:PSS/Al. Zbliżone chemicznie materiały małowcząsteczkowe, których możliwości aplikacji w fotowoltaice również dowiedziono, to pochodne metoksyfenyloindenopirazolochinoliny (ozn. MPTM-IPQ). Charakterystyki prądowo-napięciowe dla ogniw ITO/MPTM-IPQ:P3HT:PCBM/Al zostały przedstawione na Rys. 17.



Rys. 17. Charakterystyki prądowo-napięciowe dla ogniwa o architekturze ITO/ MPTM-IPQ:P3HT:PCBM/Al

Przebadano również materiały barwnikowe (dyes) oznaczone jako dye 131, dye 149, dye 205, dye 385. Celem eksperymentu było określenie, czy dodatek tych barwników może poprawić działanie ogniw słonecznych. Wszystkie badane barwniki wykazują szerokie spektrum absorpcji w zakresie promieniowania słonecznego, co czyni je potencjalnie użytecznymi w roli dodatkowego donora. Analiza morfologii cienkich warstw wykazała, że barwnik D205 nie jest odpowiedni ze względu na brak homogeniczności warstwy. Pozostałe barwniki tworzą warstwy jednorodne. Struktura poziomów energetycznych badanych związków jest korzystna dla transportu ładunków w ogniwach słonecznych. Dodatek trzeciego składnika barwiącego, z wyjątkiem D205, zmniejsza chropowatość warstwy.

Właściwości badanych związków wskazują na ich dużą przydatność w organicznych trójskładnikowych ogniwach słonecznych.

Poprawę wydajności względem ogniw referencyjnych otrzymano poprzez domieszanie do warstwy aktywnej kropek kwantowych typu core-shell CdSe/ZnS. Dodanie badanych materiałów do ogniw słonecznych poprawiło ich wydajność o około 1–2 punkty procentowe, co oznacza wzrost o 10–20% w porównaniu do referencyjnego ogniwa.

Fotowoltaika polimerowa oraz perowskitowa są najdynamiczniej rozwijającymi się obecnie obszarami fotowoltaiki. W okresie ostatnich dziesięciu lat wzrost wydajności ogniw wykonanych w tych technologiach dogonił efektywność konwersji ogniw krzemowych, natomiast koszty produkcji są znacząco niższe. Badania nad ogniwami potrójnymi dynamicznie się rozwijają, a głównym celem jest dalsze zwiększanie wydajności i wytrzymałości ogniw, głównie przez lepsze zrozumienie i kontrolę morfologii, transportu ładunków i mechanizmów optycznych. Dzięki temu jesteśmy w stanie kontrolować parametry ogniw, zwiększając ich wydajność.

7. Alternatywne technologie energetyczne

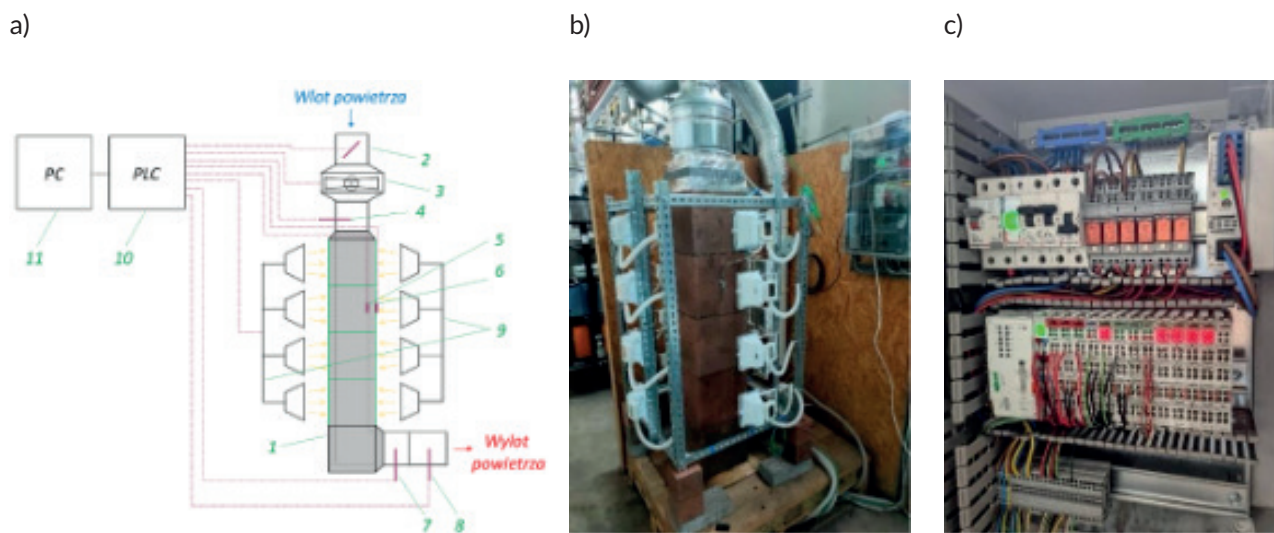
Alternatywne technologie energetyczne (ATE) to technologie służące do wytwarzania energii, które stanowią alternatywę dla tradycyjnych rozwiązań bazujących na wykorzystaniu paliw kopalnych. Do ATE zaliczają się w szczególności moduły fotowoltaiczne (PV), kolektory słoneczne, turbiny wiatrowe, turbiny wodne, pompy ciepła i instalacje geotermalne, kotły na biomasę, biogazownie oraz ogniwa paliwowe. Rozwój oraz wdrażanie ATE odgrywa kluczową rolę w transformacji energetycznej, gdyż ich implementacja do praktycznych zastosowań wpływa na poprawę efektywności energetycznej, ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko przyrodnicze oraz zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego.

W niniejszym artykule zostały przedstawione przykładowe aktywności badawcze realizowane przez Zespół Alternatywnych Technologii Energetycznych działający przy Katedrze Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego (Wydział Energetyki i Paliw AGH). Zarysowano między innymi przebieg i efekty badań nad prototypami następujących elementów: komin słoneczny z akumulacją ciepła, układ wodnego chłodzenia i czyszczenia modułów PV oraz oraz wysokotemperaturowy magazyn ciepła ze złożem stałym. Problematyka badawcza w każdym z omawianych przypadków skupia się na projektowaniu, testowaniu i wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań, zarówno pod kątem racjonalnego wytwarzania, magazynowania i wykorzystania energii, jak i na potrzeby poprawy efektywności dostępnych na rynku technologii i systemów, w tym systemów energetyki rozproszonej.

7.1. Materiały i metody

Dla celów badawczych Zespół Alternatywnych Technologii Energetycznych wykorzystuje profesjonalne narzędzia komputerowe (w tym m.in. ANSYS, Matlab oraz Revit), a także buduje prototypy wykorzystywane

następnie w badaniach laboratoryjnych i polowych. Symulacje numeryczne realizowane są w środowisku ANSYS Workbench z użyciem solverów ANSYS Fluent oraz ANSYS CFX. Opracowywane modele termiczne i przepływowe (tworzone dla warunków ustalonych lub nieustalonych) charakteryzują się precyzyjnym odwzorowaniem rzeczywistych okoliczności pracy analizowanych urządzeń oraz umożliwiają optymalizację ich parametrów operacyjnych. Walidacja modeli matematycznych następuje z wykorzystaniem specjalnie projektowanych i tworzonej stanowisk kontrolno-pomiarowych wyposażonych w programowalne sterowniki logiczne (PLC), programatory (komputery z oprogramowaniem służącym do tworzenia algorytmów działania, wizualizacji graficznych oraz akwizycji danych), a także odpowiednio dobrane zestawy elementów pomiarowych i wykonawczych (specjalistyczne czujniki, przetworniki, regulatory itp.). Przykład stanowiska kontrolno-pomiarowego opracowanego na potrzeby badania prototypu kominu słonecznego z akumulacją ciepła został pokazany na Rys. 18. Podobne stanowiska, różniące się jedynie konfiguracją, stopniem zaawansowania i przeznaczeniem, zostały stworzone równolegle na potrzeby realizacji innych prac badawczych.

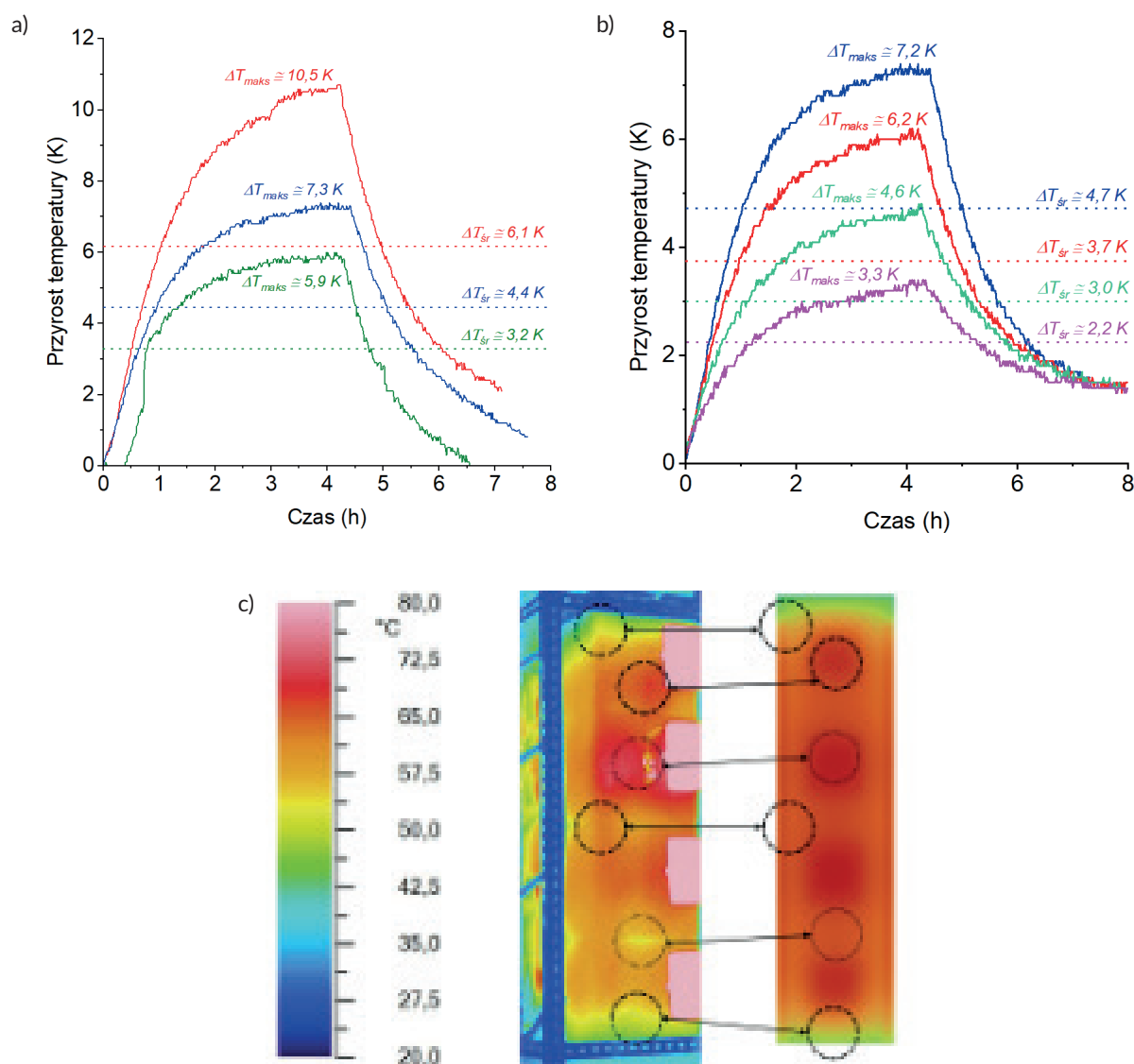


Rys. 18. Przykład stanowiska kontrolno-pomiarowego: a) schemat stanowiska pomiarowego; b) widok rzeczywisty stanowiska pomiarowego; c) wyposażenie szafy kontrolno-pomiarowej; 1 – moduły akumulacyjne, 2 – przepustnica powietrzna, 3 – wentylator, 4, 5, 6, 7 – czujniki temperatury, 8 – termoanemometr, 9 – źródło ciepła, 10 – szafa sterownicza z modułowym sterownikiem PLC i zestawem przekaźników oraz elementów zabezpieczających, 11 – komputer z oprogramowaniem CoDeSys

7.2. Badania prototypu komina słonecznego z akumulacją ciepła

Prototyp komina słonecznego z akumulacją ciepła został wykonany z betonu wytwarzanego na bazie kruszywa ceramicznego o podwyższonej zawartości tlenków żelaza i manganu, który odznacza się wysoką pojemnością cieplną. Zastosowana organizacja przepływu powietrza umożliwia magazynowanie części ciepła docierającego do powierzchni przegrody w ciągu dnia i wykorzystanie go po zachodzie słońca. Wyniki badań przeprowadzonych w warunkach

laboratoryjnych potwierdziły znaczący potencjał opracowanego rozwiązania. Maksymalny przyrost temperatury powietrza przepływającego przez testowaną przegrodę o wysokości 1 m, w zależności od symulowanych parametrów operacyjnych, osiągnął poziom od 3,3 do 10,5 K (Rys. 19a, Rys. 19b). Ponadto kontur temperaturowy otrzymany podczas symulacji numerycznych został porównany z termogramami wykonanymi za pomocą kamery termowizyjnej (Rys. 19c), co umożliwiło przeprowadzenie szeregu analiz wariantowych obejmujących m.in. alternatywne długości komina słonecznego.



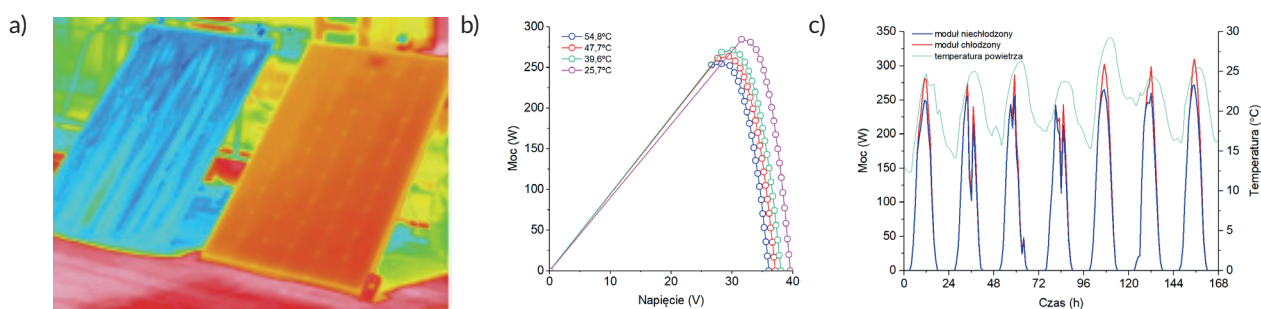
Rys. 19. Prototyp komina słonecznego z akumulacją ciepła: przyrost temperatury powietrza przepływającego przez testowaną przegrodę o wysokości 1 m, w zależności od: a) strumienia powietrza; b) konfiguracji pracy; c) porównanie konturu temperaturowego otrzymanego podczas symulacji numerycznych i pomiarów eksperymentalnych

7.3. Badania prototypu wodnego układu chłodzenia i czyszczenia modułów fotowoltaicznych

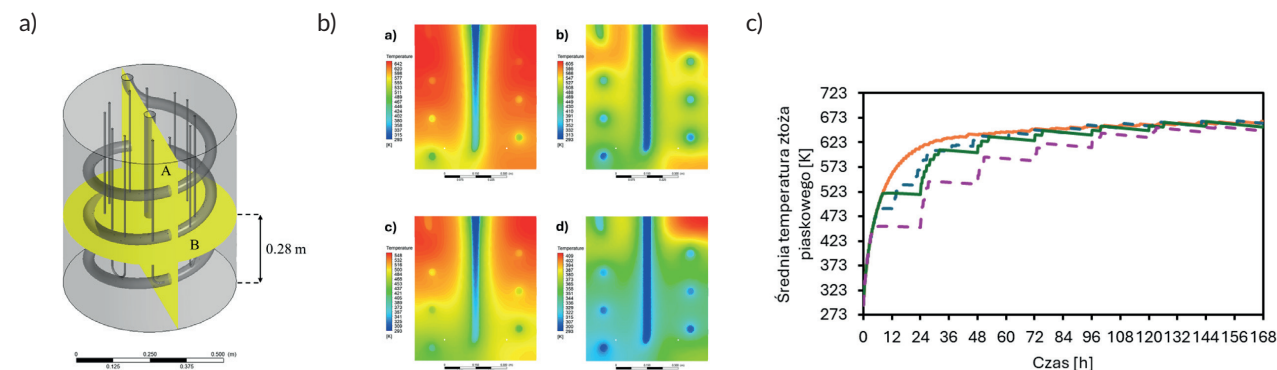
Prototyp systemu wodnego chłodzenia i czyszczenia modułów PV został zaprojektowany w postaci układu zamkniętego z możliwością częściowego zasilania wodą odpadową oraz odzysku ciepła odebranego od powierzchni modułów i wykorzystania go do wstępnego podgrzewu wody użytkowej. W toku dotychczasowych badań wzrost mocy generowanej w testowanym module PV wyniósł w warunkach laboratoryjnych od 8% do 11%, podczas gdy w warunkach zewnętrznych – w czasie losowo wybranych siedmiu dni w lipcu – osiągnął średnią wartość 7,5% (Rys. 20). Jednocześnie średni przyrost temperatury wody chłodzącej w czasie prac laboratoryjnych wahał się od 1,6 K do 8,4 K. Na podstawie wyników prac przygotowane zostały modele matematyczne pod kątem realizacji symulacji dynamicznych.

7.4. Badania prototypu wysokotemperaturowego magazynu ciepła ze złożem stałym

Prototyp wysokotemperaturowego magazynu ciepła ze złożem piaskowym został stworzony i przetestowany w skali laboratoryjnej. Wyniki uzyskane w ramach prac eksperymentalnych umożliwiły walidację modelu numerycznego, a następnie realizację analiz obejmujących różne konfiguracje magazynu oraz wybrane scenariusze ładowania i rozładowania złoża, w tym scenariusze bazujące na wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego oraz energii pobieranej z sieci elektroenergetycznej (Rys. 21). Na podstawie wyników dotychczasowych prac wyodrębniono parametry wpływające na kluczowe aspekty funkcjonowania magazynu. Potwierdzono także potencjał dalszego rozwoju magazynów wysokotemperaturowych pod kątem sezonowej akumulacji ciepła w układach energetyki rozproszonej.



Rys. 20. Prototyp systemu wodnego chłodzenia i czyszczenia modułów PV: a) termogram ilustrujący różnice w temperaturze powierzchni modułu niechłodzonego i chłodzonego; b) charakterystyki pracy testowanego modułu; c) przebieg zmian mocy generowanej w niechłodzonym i chłodzonym module fotowoltaicznym oraz temperatury powietrza zewnętrznego w wybranym tygodniu lipca



Rys. 21. Prototyp wysokotemperaturowego magazynu ciepła ze złożem piaskowym: a) model komputerowy laboratoryjnego prototypu wysokotemperaturowego magazynu ciepła; b) rozkład temperatury w obrębie złoża piaskowego uzyskany w toku symulacji numerycznych; c) przebieg średniej temperatury złoża piaskowego w czasie nagrzewania z wykorzystaniem różnych scenariuszy operacyjnych

7.5. Wnioski

Prowadzone przez Zespół Alternatywnych Technologii Energetycznych prace, w tym działania przedstawione w niniejszym artykule, potwierdzają wysokie znaczenie technologii generacji rozproszonej w kontekście transformacji energetycznej. Dalszy rozwój rozwiązań bazujących na zastosowaniu alternatywnych źródeł energii, w tym źródeł odnawialnych współpracujących z magazynami energii, jest kluczowy z punktu widzenia poprawy efektywności energetycznej i redukcji zużycia paliw kopalnych.

Lista publikacji zespołu autorskiego:

- Barszcz T. (2008), *Advanced Methods for Condition Monitoring of Machinery in Distributed Online Monitoring and Diagnostic Systems*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom.
- Barszcz T. (2019), *Vibration-Based Condition Monitoring of Wind Turbines*, Springer Cham, Switzerland.
- Dao P.B., Barszcz T., Staszewski W.J. (2024), *Anomaly Detection of Wind Turbines Based on Stationarity Analysis of SCADA Data*, „Renewable Energy” 232: 121076.
- Dyndał K., Lewińska G., Kluska S., Sahraoui B., Marszałek K.W. (2022), *Nitrogen-Modified a-C:H Layers Applied for Light Emitting Diodes*, „Vacuum” 205: 111481.
- Lewińska G. (2024), *Ternary Organic Solar Cells – Simulation-Optimization Approach*, „Electronic Materials Letters” 20 (4): 440–449.
- Lewińska G., Jeleń P., Kanak J., Walczak Ł., Socha R.P., Sitarz M., Sanetra J., Marszałek K.W. (2021), *Investigation of Dye Dopant Influence on Electrooptical and Morphology Properties of Polymeric Acceptor Matrix Dedicated for Ternary Organic Solar Cells*, „Polymers” 13 (23): 4099.
- Lewińska G., Sosna D., Kanak J., Danel K., Sanetra J., Sahraoui B., Marszałek K.W. (2022), *The Role of Small Molecules and Quantum Dots Doping on the Morphology of Layers for Potential Applications in Ternary Solar Cells*, „Optical Materials” 134 (A): 113056.
- Lewińska G., Kanak J., Danel K.S., Sanetra J., Marszałek K.W. (2023), *Effect of Benzene-Based Dyes on Optothermal Properties of Active Layers for Ternary Organic Solar Cells*, „Applied Surface Science” 641: 158535.
- Lewińska G., Jeleń P., Kucia Z., Sitarz M., Walczak Ł., Szafraniak B., Sanetra J., Marszałek K.W. (2024), *CdSe/ZnS Quantum Dots as a Booster in Dispersed Ternary Organic Photovoltaics Active Layer*, „The Beilstein Journal of Nanotechnology” 15: 144–156.
- Lewińska G., Karout H., Danel K.S., Marszałek K.W., Sahraoui B. (2025a), *Some Selected Binary and Ternary Organic Thin Films for Nonlinear Optical Applications*, „Journal of Materials Science: Materials in Electronics” 36 (12): 753.
- Lewińska G., Kanak J., Sanetra J., Marszałek K.W. (2025b), *Optothermal Properties of Donor-Acceptor Layers, Including PTB7, PT-B7th, Y5, and Y6, for Organic Photovoltaic Cell Applications*, „Materials” 18 (8): 1841.
- Marszałek K.W., Dyndał K., Lewińska G., Sanetra J. (2022), *Photovoltaics*, AGH University, Kraków.
- Rybak J., Marszałek K.W. (2022), *Deposition and Optical Properties Investigations of WO₃ Thin Films for Electrochromic Device Applications*, „Przegląd Elektrotechniczny” 9: 139319.
- Rybak J., Marszałek K.W. (2023), *Deposition and Optical Properties Investigation of Components for Multilayer Electrochromic System*, „Journal of Vacuum Science and Technology. B, Microelectronics and Nanometer Structures” 41 (6): 063401.
- Rybak J., Marszałek K.W. (2025), *Investigation of the Cosmic Radiation Effects on the Components of a Thin-Film Electrochromic System*, „Przegląd Elektrotechniczny” 101 (2): 169–172.
- Urbanek J., Barszcz T. (2008), *Monitorowanie i diagnostyka maszyn wirnikowych: praktyczny podręcznik wibrodiagnostyki*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom.
- Urbanek J., Barszcz T., Jabłoński A. (2016), *Application of Angular-Temporal Spectrum to Exploratory Analysis of Generalized Angular-Temporal Deterministic Signals*, „Applied Acoustics” 109: 27–36.
- Ungeheuer K., Marszałek K.W. (2023), *Optical Properties of Copper Oxide Thin Films Implanted with Chromium Ions*, „Journal of Vacuum Science and Technology. B, Microelectronics and Nanometer Structures” 41 (6): 062208.
- Ungeheuer K., Marszałek K.W., Mitura-Nowak M., Jeleń P., Perzanowski M., Marszałek M., Sitarz M. (2022a), *Cuprous Oxide Thin Films Implanted with Chromium Ions – Optical and Physical Properties Studies*, „International Journal of Molecular Sciences” 23 (15): 8358.
- Ungeheuer K., Marszałek K.W., Mitura-Nowak M., Perzanowski M., Jeleń P., Marszałek M., Sitarz M. (2022b), *Influence of Cr Ion Implantation on Physical Properties of CuO Thin Films*, „International Journal of Molecular Sciences” April 23 (9): 4541.
- Ungeheuer K., Marszałek K.W., Mitura-Nowak M., Rydosz A. (2023), *Spectroscopic Ellipsometry Modelling of Cr + Implanted Copper Oxide Thin Films*, „Scientific Reports” 13 (1): 22116.
- Ungeheuer K., Marszałek K.W., Tokarz W., Perzanowski M., Kąkol Z., Marszałek M. (2024), *DFT Electronic Structure Investigation of Chromium Ion-Implanted Cupric Oxide Thin Films Dedicated for Photovoltaic Absorber Layers*, „Scientific Reports” 14: 19830.
- Ungeheuer K., Rybak J., Bocirnea A.E., Pikulski D.A., Galca A.C., Marszałek K.W. (2025), *Influence of Proton Irradiation on Thin Films of AZO and ITO Transparent Conductive Oxides – Simulation of Space Environment*, „Applied Sciences” 15 (2): 754.
- Zespół Badawczy Przepływów i Akustyki w Systemach Energetycznych: <https://badap.agh.edu.pl/autorzy/zespoły/przeplywy-w-i-akustyki-w-systemach-energetycznych> [dostęp: 3.07.2025].
- Zghal B., Graja O., Dziedzic K., Chaari F., Jabłoński A., Barszcz T., Haddar M. (2019), *A New Modeling of Planetary Gear Set to Predict Modulation Phenomenon*, „Mechanical Systems and Signal Processing” 127: 234–261.

Distributed energy sources

Abstract: The presented chapter presents the results of the work carried out by the wind energy team and thin-film and organic photovoltaics, as well as alternative energy technologies. It discusses methods for supporting the operation of distributed energy systems, modeling components of wind power plants, designing and validating modern wind turbines, and the outcomes of research on innovative technologies such as microscale solar installations (a solar chimney with heat storage, photovoltaic modules equipped with water-based cooling and cleaning systems), and high-temperature heat storage. The chapter also covers methods of modifying absorbers in organic cells and the fabrication and testing of thin film oxide cells and optical electrochromic filters for space applications.

Keywords: wind power, thin-film and organic photovoltaics, space applications, alternative energy technologies, clean energy technologies

dr hab. inż. Konstanty Marszałek, prof. AGH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
marszale@agh.edu.pl



Autorzy poszczególnych części:

1. Cyfryzacja i wsparcie utrzymania ruchu urządzeń energetyki rozproszonej

prof. dr hab. inż. Tomasz Barszcz,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr hab. inż. Adam Jabłoński, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr hab. inż. Kajetan Dziedziech, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH

2. Modelowanie elementów elektrowni wiatrowych

dr hab. inż. Ireneusz Czajka, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr hab. inż. Krzysztof Kołodziejczyk, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr hab. inż. Krzysztof Pytel, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr inż. Roman Filipek,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr inż. Katarzyna Suder-Dębska,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
Jędrzej Minda,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH

3. Zintegrowane podejście do projektowania i walidacji nowoczesnych turbin wiatrowych

dr hab. inż. Ireneusz Czajka, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr hab. inż. Krzysztof Kołodziejczyk, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr hab. inż. Krzysztof Pytel, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr inż. Roman Filipek,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
dr inż. Katarzyna Suder-Dębska,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
Jędrzej Minda,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH

4. Badania wpływu korpuskularnej części promieniowania kosmicznego na komponenty cienkowarstwowego ogniwa fotowoltaicznego

dr hab. inż. Konstanty Marszałek, prof. AGH,
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH
dr inż. Katarzyna Ungeheuer,
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH

5. Elektrochromowe filtry cienkowarstwowe do zastosowań w oknach statków kosmicznych

dr hab. inż. Konstanty Marszałek, prof. AGH,
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH
Janusz Rybak,
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH

6. Modyfikacje warstw aktywnych do zastosowań w fotowoltaicznych ogniwach organicznych

dr hab. inż. Konstanty Marszałek, prof. AGH,
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH
dr inż. Gabriela Lewińska,
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH

7. Alternatywne technologie energetyczne

dr hab. inż. Krzysztof Sornek, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Marcin Jankowski,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Maksymilian Homa,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Jakub Katerla,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Karolina Papis-Frączek,
Wydział Energetyki i Paliw AGH