

Koordynator: Andrzej FIRLIT

Andrzej BUDZIAK (2), Andrzej FIRLIT (8), Dominik GRYBOŚ (5), Andrzej KULKA (3), Jacek LESZCZYŃSKI (5), Jan MARKOWSKI (5), Janina MOLENDĄ (1), Anna MILEWSKA (4), Mikołaj NOWAK (2, 4), Tomasz SIOSTRZONEK (6), Aneta SAPIŃSKA-ŚLIWA (9), Tomasz ŚLIWA (9), Katarzyna WALCZAK (3), Jerzy WOŁOSZYN (7)

III. Magazynowanie energii

w kontekście transformacji energetycznej – od materiałów po systemy.

Wybrane kierunki badań i zastosowanie oraz współpraca z operatorami sieci i przemysłem

Abstrakt: Magazynowanie energii odgrywa kluczową rolę w procesie transformacji energetycznej, umożliwiając efektywną integrację odnawialnych źródeł energii, zwiększenie elastyczności systemów energetycznych oraz poprawę niezawodności dostaw energii. W artykule przedstawiono wybrane kierunki badań prowadzonych w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie koncentrujących się na zagadnieniach związanych z magazynowaniem energii i funkcjonowaniem magazynów. Część rozdziałów zawiera niezależne opracowania dotyczące szerokiego spektrum zagadnień technologicznych i inżynierskich. Obejmują one aspekty elektrochemiczne, materiałowe, cieplne, geotermalne, mechaniczne oraz elektroenergetyczne. Artykuł ma charakter interdyscyplinarny, aplikacyjny i wdrożeniowy, podkreśla znaczenie prowadzenia badań nad rozwojem i integracją nowoczesnych technologii magazynowania energii oraz innowacyjnych rozwiązań technicznych z potrzebami i wyzwaniem współczesnych systemów elektroenergetycznych.

Słowa kluczowe: magazynowanie energii, magazynowanie wodoru, magazynowanie energii termicznej, grawitacyjny magazyn energii, baterijny system magazynowania energii elektrycznej, magazyn energii w technologii sprężonego powietrza (micro-CAES), podziemne magazyny ciepła w warstwach wodonośnych, otworowe wymienniki i magazyny ciepła, ogniwa nowej generacji, alluaudit, redoks tlenu, ogniwa paliwowe, ogniwa sodowe, akumulatory sodowo-jonowe, akumulatory litowo-jonowe, transformacja energetyczna terenów górniczych, tryb pracy *on-grid* i *off-grid*, stabilizacja napięcia, symetryzacja napięcia, poprawa jakości dostawy energii elektrycznej

Rosnące zapotrzebowanie na energię, postępująca dekarbonizacja systemów energetycznych oraz dynamiczny rozwój odnawialnych źródeł energii sprawiają, że zagadnienia związane z magazynowaniem różnych form energii stają się kluczowym elementem współczesnej transformacji energetycznej. Stabilność sieci elektroenergetycznych, efektywność energetyczna

oraz bezpieczeństwo energetyczne w coraz większym stopniu zależą od dostępności zaawansowanych rozwiązań w zakresie magazynowania energii – zarówno w skali rozproszonej, jak i przemysłowej. W tym kontekście prowadzone są intensywne badania naukowe, projekty i prace rozwojowe, których celem jest opracowanie nowych technologii oraz rozwiązań technicznych dotyczących magazynowania energii w różnych formach, a także ich integracji z systemami elektroenergetycznymi.

Niniejszy artykuł składa się z dziewięciu rozdziałów poświęconych wybranym obszarom działalności naukowo-badawczej i rozwojowo-wdrożeniowej prowadzonej w tej dziedzinie w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Opisane prace koncentrują się na zagadnieniach związanych z magazynowaniem energii i funkcjonowaniem magazynów energii w różnorodnych kontekstach aplikacyjnych. Poszczególne rozdziały poruszają zróżnicowane, lecz komplementarne aspekty tej problematyki – od badań materiałowych i elektrochemicznych, przez wykorzystanie energii cieplnej, grawitacyjnej i sprężonego powietrza, po zagadnienia systemowe, sieciowe oraz analizy wdrożeniowe obejmujące współpracę z przemysłem i operatorami systemów dystrybucyjnych.

Kolejne rozdziały obejmują między innymi następujące zagadnienia:

- projektowanie i opracowywanie funkcjonalnych materiałów oraz procesów dla technologii ogniw litowych i sodowych (w tym inżynieria stanów elektronowych),
- badania materiałowe ukierunkowane na poprawę wydajności magazynowania i przetwarzania energii elektrycznej,
- opracowanie alternatywnych materiałów elektrodowych dla tanich i wysokoenergetycznych akumulatorów nowej generacji,
- rozwój ogniwa sodowego na bazie alluaudytu siarczanowego jako magazynu energii o potencjalnym zastosowaniu komercyjnym,
- mechaniczny magazyn energii w technologii sprężonego powietrza (micro-CAES),
- grawitacyjny magazyn energii wykorzystujący infrastrukturę likwidowanych podziemnych zakładów górniczych,
- badania nad intensyfikacją i ujednolicieniem procesów transportu ciepła w magazynach energii termicznej,
- testowanie i analiza efektów pracy różnych baterijnych systemów magazynowania energii elektrycznej przyłączonych do sieci zasilających,
- podziemne magazynowanie ciepła z wykorzystaniem otworów wiertniczych.

Zaprezentowane zagadnienia obrazują interdyscyplinarny charakter prowadzonych badań, które integrują wiedzę z zakresu elektrochemii, inżynierii materiałowej, mechaniki, procesów termicznych, geoinżynierii, elektroenergetyki, elektroniki przemysłowej, automatyki oraz zarządzania systemami energetycznymi. W niniejszym artykule opisano zarówno prace o charakterze poznawczym, jak i działania o potencjale aplikacyjnym i wdrożeniowym. Wspólnym mianownikiem przedstawionych badań jest ich duże znaczenie dla dalszego rozwoju krajowego sektora energii rozproszonej i magazynowania energii w kontekście transformacji energetycznej, a ich wyniki mogą z powodzeniem być wykorzystywane praktycznie w warunkach rzeczywistych.

1. Magazyny energii w dobie transformacji energetycznej

Technologie ogniw litowych są obecnie najdynamiczniej rozwijającym się obszarem związanym z magazynowaniem i przetwarzaniem energii elektrycznej dla potrzeb urządzeń mobilnych, transportu, energetyki odnawialnej i sieci *smart grids*. Dynamika rozwoju przemysłu bateriowego na świecie nie ma sobie równych. Przewiduje się gigantyczny wzrost rynku ogniw litowych, m.in. w obszarze stacjonarnych magazynów energii oraz samochodów elektrycznych (w tym drugim przypadku nawet o 1000%). Europa, która ma ogromny potencjał naukowy w obszarze elektrochemicznego magazynowania energii, praktycznie nie zbudowała przemysłu bateriowego. W 2017 r. w Brukseli zawieszono sojusz na rzecz baterii – European Battery Alliance, a obecnie Komisja Europejska postrzega produkcję baterii jako strategiczny cel wspólnoty. Na Starym Kontynencie zaplanowano budowę 22 fabryk ogniw litowych. W większości będą to narodowe fabryki wspierane przez Unię Europejską. Inwestycje są rozlokowane zwłaszcza w Niemczech, Francji i Skandynawii. Polska jest białą plamą na mapie rozwoju tego sektora. Mimo to można zauważyć, iż w ostatnim czasie przemysł bateriowy rozwija się także w naszym kraju. Inwestycje te nie korzystają jednak z polskich rozwiązań, a jedynie z taniej, dobrze wykwalifikowanej kadry inżynierskiej. Nowa fabryka baterii LG Energy Solution pracuje na licencji, jednak na etapie jej planowania nie uwzględniono strategicznej możliwości udziału polskich rozwiązań.

W 2018 r. powstało Polskie Konsorcjum Elektrochemicznego Magazynowania Energii PolStorEn. AGH brała udział w jego tworzeniu. Celem było skupienie krajowego potencjału naukowego i podjęcie wspólnych działań w zakresie rozwoju strategicznych dla polskiej gospodarki technologii ogniw litowych i sodowych. Partnerzy konsorcjum dysponują w tym obszarze zarówno rozwiązaniami i technologiami produktowymi, jak i chronionymi patentami i zgłoszeniami patentowymi (polskimi i zagranicznymi). Własna produkcja ogniw litowych i sodowych

do magazynowania energii przyniosłaby korzyści dla polskiej gospodarki w wielu dziedzinach, gwarantując bezpieczeństwo energetyczne w dobie transformacji i strategiczne uniezależnienie od importu. Potencjał rozwiązań naukowo-technicznych PolStorEn-u osiągnął poziom umożliwiający generowanie rozwiązań innowacyjnych w gospodarce. Ostatnio zauważyć można gwałtowne zainteresowanie technologią ogniw Na-ion (z uwagi na powszechną dostępność sodu oraz kurczące się zasoby litu) jako alternatywę dla ogniw Li-ion, zwłaszcza dla wielkoskalowych magazynów energii. W tym zakresie AGH ma ponad 30-letnie doświadczenie. Możliwe jest zbudowanie polskiej fabryki ogniw litowych i sodowych bazującej całkowicie na polskich patentach i własnych technologiach. Mamy do tego odpowiednie surowce i technologię konkurencyjną wobec świata. Brak odpowiedniej strategii rozwoju polskiego przemysłu magazynowania energii uzależni Polskę od zewnętrznych dostawców i obniży konkurencyjność naszej gospodarki. W tej chwili Polska jest zależna od dostaw gazu i ropy. Po transformacji energetycznej, aby efektywnie korzystać ze źródeł energii odnawialnych, potrzebny będzie dostęp do tanich akumulatorów.

W AGH istnieje poważny, potwierdzony na arenie międzynarodowej, potencjał naukowo-badawczy w obszarze projektowania i opracowywania funkcjonalnych materiałów i procesów dla technologii ogniw litowych i sodowych. Rozwijana przez prof. Janinę Molendę nowa dyscyplina naukowa – inżynieria stanów elektronowych – jest skutecznym narzędziem w projektowaniu funkcjonalnych materiałów dla ogniw litowych i sodowych o zwiększonej gęstości energii i podniesionym bezpieczeństwie użytkowania. Opracowany elektronowy model interkalacji elektrochemicznej burzy dotychczasowe poglądy na temat mechanizmów i procesów zachodzących w ogniwach litowych i sodowych oraz zasad projektowania funkcjonalnych właściwości komponentów ogniw. Wskazany problem jest interdyscyplinarny, obejmuje obszar chemii i fizyki ciała stałego, inżynierii materiałowej, a także elektrochemii ciała stałego. Konsekwentne i unikatowe w świecie

badania nad elektronowym aspektem procesu interkalacji litu do związków metali przejściowych, wskazujące na bezpośredni związek pomiędzy strukturą elektronową materiału katodowego a parametrami ogniw litowych (gęstość energii, charakter krzywej rozładowania, gęstość prądu), „stawiają kropkę nad i” w ujawnieniu tej niezmiennie ważnej relacji i stwarzają nowe narzędzie w projektowaniu funkcjonalnych materiałów dla ogniw Li-ion i Na-ion. To uniwersalne odkrycie ma ogromne znaczenie dla projektowania i poszukiwania nowych materiałów elektrodowych dla ogniw Li-ion i przyszłościowych ogniw Na-ion. Prowadzone badania jednoznacznie wskazują, iż wzrost jonowości wiązań chemicznych w materiale katodowym prowadzi do korzystnego wzrostu potencjału katody (wzrost gęstości energii) przy jednoczesnym pogarszaniu się jego właściwości transportowych na skutek lokalizacji stanów elektronowych przy poziomie Fermiego. Prace te udowodniły, iż można poprawić efektywność procesu interkalacji w wysokonapięciowych izolacyjnych materiałach katodowych, stosując je w skali nanometrycznej, co skutecznie skraca drogę dyfuzji litu i zwiększa wydajność procesu elektrochemicznego. Inżynieria stanów elektronowych wnosi nadzieję w obszarze poszukiwania nowych materiałów dla Li-ion i Na-ion ogniw oraz przewidywania i projektowania ich właściwości użytkowych.

AGH stworzyła doskonałe warunki dla rozwoju w Polsce tej nowej dyscypliny związanej z projektowaniem materiałów dla elektrochemicznych źródeł energii. Prof. Molenda wykształciła wysoko wyspecjalizowaną kadrę naukową, wypromowała 20 doktorów w obszarze ogniw Li-ion i Na-ion. Dzięki specjalistycznej infrastrukturze technicznej AGH i stworzeniu Centrum Badawczo-Wdrożeniowego Technologii Ogniw Litowych i Sodowych w Centrum Energetyki AGH zrealizowano ponad 30 projektów naukowo-badawczych (międzynarodowych, NCN), ogłoszono ponad 170 publikacji o obiegu międzynarodowym i zgłoszono 7 patentów polskich i zagranicznych w obszarze ogniw litowych i sodowych. Naukowcy AGH licznie uczestniczyli w prestiżowych

międzynarodowych konferencjach naukowych, co sprawiło, iż dorobek naukowy zespołu prof. Molendy jest bardzo dobrze rozpoznawalny w środowisku międzynarodowym. AGH współorganizuje cykliczne międzynarodowe konferencje Smart Conversion Energy and Storage.

W AGH stworzono rewolucyjny materiał katodowy (strzeżony patentami USA i europejskimi) bazujący na układzie LiFePO_4 , pozwalający produkować bezpieczne i trwałe akumulatory Li-ion dla pojazdów elektrycznych oraz magazynów energii. Materiał ten, otrzymywany w postaci nanometrycznych „płatków” o określonej orientacji krystalograficznej, synergicznie łączy w sobie zalety nanotechnologii i układów kompozytowych, dzięki czemu możliwe jest wykorzystanie praktycznie całej teoretycznej pojemności materiału.

W Akademii opracowano także tanią, ekologiczną metodę niskotemperaturowej syntezy nanometrycznego materiału katodowego $\text{Na}_2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (chronioną patentem polskim) o trójwymiarowej strukturze szkieletowej i obiecujących właściwościach elektrochemicznych dla *Co-free Na-ion batteries*. Materiał katodowy wykazuje najwyższy jak dotychczas potencjał redoks $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, równy 3,7 V względem Na^+/Na . Tak wysoki potencjał w połączeniu z dużą zdolnością do interkalacji sodu prowadzi do szczególnie dużej teoretycznej gęstości energii wynoszącej 456 Wh kg^{-1} . Cechy te umożliwiają projektowanie akumulatorów Na-ion konkurencyjnych w stosunku do analogów Li-ion, co do niedawna wydawało się niemożliwe. Rozwój nowej technologii akumulatorów Na-ion opierający się na inżynierii stanów elektronowych i przyjazne środowisku metale przejściowe mogą rozwiązać problem kosztów i zapewnić wyższą gęstość energii oraz większe bezpieczeństwo użytkowania akumulatorów. Jednocześnie nowa technologia może również stymulować rewolucyjne zmiany w różnych sektorach związanych z dziedzina akumulatorów. Opracowane przez zespół prof. Molendy technologie materiałów dla ogniw litowych i sodowych są niezwykle obiecujące i konkurencyjne w skali świata.

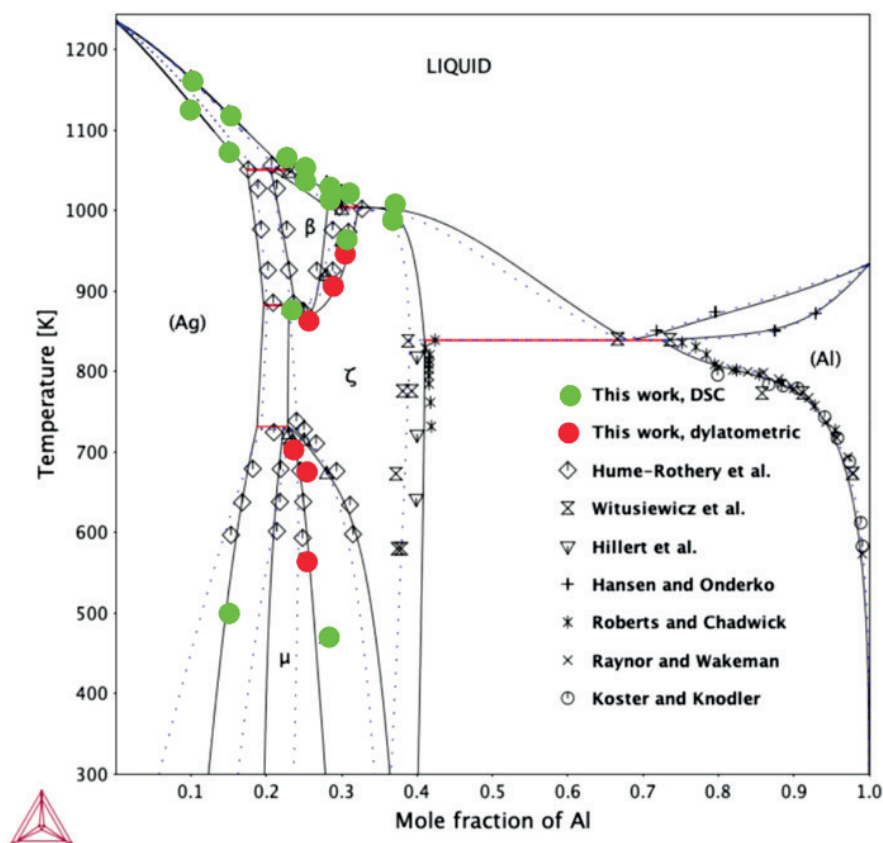
2. Badania nad poprawą wydajności magazynowania i przetwarzania energii elektrycznej

Magazynowanie i poszanowanie energii to jedno z kluczowych zadań, przed jakimi stoi ludzkość. Od efektywnego i zrównoważonego wykorzystania magazynów zależeć będzie jakość naszego życia. Niezwykle ważnym elementem prac badaczy jest poszukiwanie rozwiązań prowadzących do optymalizacji wykorzystania zasobów Ziemi poprzez poprawę wydajności urządzeń związanych z magazynowaniem energii elektrycznej czy magazynów wodoru, który aktualnie uważa się za paliwo przyszłości. Prace prowadzone w tym zakresie w Katedrze Energetyki Wodorowej mają charakter interdyscyplinarny i łączą kompetencje z zakresu chemii, elektrochemii, inżynierii materiałowej oraz fizyki ciała stałego.

2.1. Stopy Ag-Al i Ag-Mg oraz Mg-Ag-Ti

Czyste srebro, wykorzystywane komercyjnie w przemyśle elektrycznym jako styk elektryczny, wykazuje przewodnictwo cieplne i posiada doskonałe właściwości elektryczne. Brakuje mu natomiast zadowalających właściwości mechanicznych. Badania wykazały, że dodatek aluminium do srebra znacząco poprawia parametry fizyczne i mechaniczne. Aby móc szeroko stosować stopy Ag-Al oraz inne stopy wieloskładnikowe na bazie układu Ag-Al, konieczne było poznanie bądź rozszerzenie wiedzy na temat ich właściwości termodynamicznych i fizykochemicznych, takich jak: temperatury przemian fazowych, zakres występowania fazy ciekłej i stałej, temperatury topnienia i krzepnięcia.

Przebadano stopy zawierające od 10 do 37 at. % Al. Badania rozszerzalności cieplnej ujawniły anomalne zachowania podczas rozszerzania niektórych składów stopów, związane z przejściem fazowym. Wartości przewodności elektrycznej ulegały szybkim zmianom, co można wiązać z powstawaniem różnych obszarów fazowych w układzie Ag-Al. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano termodynamiczną reoptymalizację układu podwójnego Ag-Al z wykorzystaniem metody CALPHAD (Rys. 1).

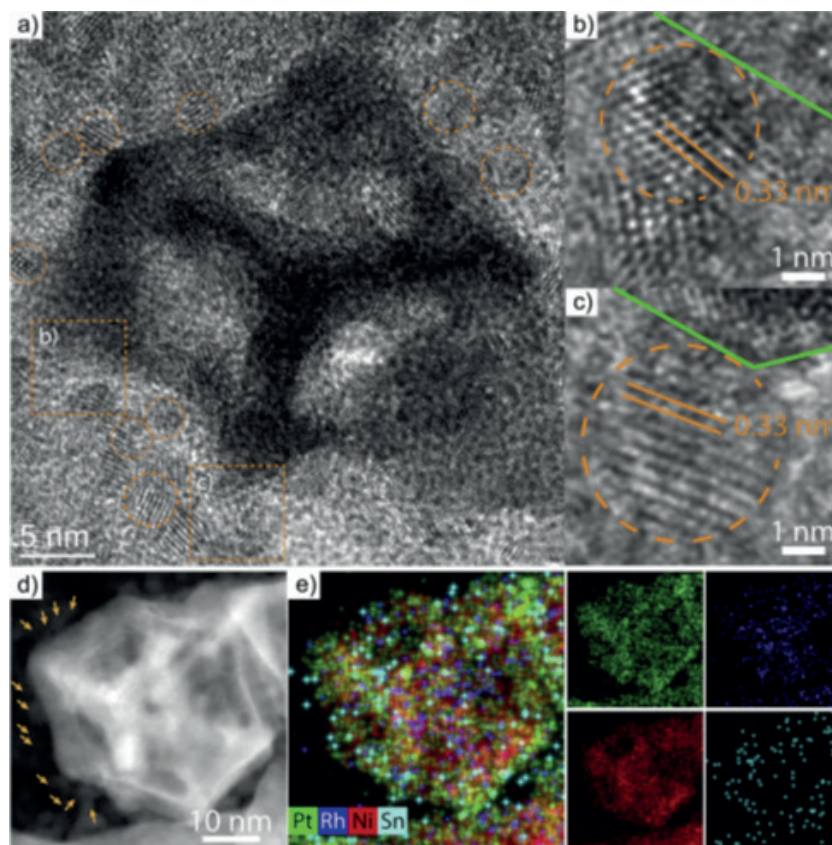


Rys. 1. Obliczony metodą Calphad diagram fazowy Ag-Al (linia ciągła) i model podany przez Witusiewicza (linia przerywana) z nałożonymi danymi eksperymentalnymi. Dla ułatwienia odczytu kolorem czerwonym i zielonym zaznaczono dane z omawianej pracy (Terlicka et al. 2020)

Eksperyment przyniósł interesujące i istotne wyniki dla układu Mg-Ag. Jak wiadomo, czysty magnez ma wysoką masową zdolność do absorpcji wodoru (do 7,6% masy dla MgH_2), jednak ze względu na wolną kinetykę absorpcji/desorpcji oraz wysoką temperaturę desorpcji jest mało praktyczny jako magazyn wodoru. Badania wykazały, że już niewielki dodatek srebra do magnezu poprawia kinetykę absorpcji, a co ważniejsze, reakcja absorpcji i desorpcji wodoru w tym układzie staje się odwracalna. Udowodniono również, że niewielki dodatek magnezu do srebra zwiększa liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej w porównaniu do czystego srebra (Terlicka et al. 2021). Na bazie tych wyników (Ag-Mg), a także wniosków z badań innych układów (Ag-Ti), przebadano po raz pierwszy układ Ag-Mg-Ti. Zaproponowano jego wstępny diagram fazowy oraz wyznaczono entalpię tworzenia (Gozdur et al. 2024). Obecnie prowadzone są badania zdolności sorpcyjnych wodoru przez ten układ.

2.2. Materiały dla ogniów paliwowych: katalizatory do zastosowań w ogniach paliwowych

Przy projektowaniu katalizatorów do zastosowań w ogniach paliwowych zasilanych bezpośrednio etanolem (DEFC) kluczowe jest uwzględnienie czterech głównych parametrów: kształtu, struktury, rozmiaru i składu chemicznego. Na podstawie tej wiedzy przewiduje się, że wielościennie puste nanoramki na bazie Pt z dodatkami Rh i SnO_2 o wielkości poniżej 50 nm mogą być obiecującymi nanokatalizatorami dla anody DEFC. W pracy (Gruzeł et al. 2022) rozpatrywano m.in. dwa różne katalizatory bazujące na nanoramkach PtRhNi/SnO_2 . Pierwszy składał się z nanoramki PtRhNi pokrytej małymi nanocząstkami SnO_2 o średnicy około 3 nm (NPs PtRhNi/SnO_2), natomiast drugi to nanoramki PtRhNi pokryte cienką i niekompletną warstwą SnO_2 (PtRhNi/SnO_2 TL) (Rys. 2).



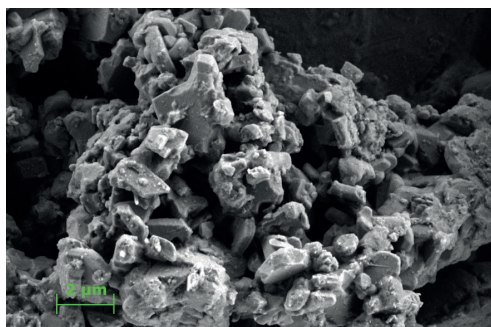
Rys. 2. Obraz TEM o wysokiej rozdzielczości pojedynczej nanoramki PtRhNi z osadzonymi nanocząsteczkami SnO_2 (zaznaczonymi pomarańczowymi kółkami (a); b) i c) powiększone obrazy obszarów zaznaczonych w a), przedstawiające pojedynczą nanocząstkę SnO_2 z wymierzonymi odstępami między siatkami; pomarańczowe kółka odpowiadają obszarowi nanocząstek SnO_2 , granica nanoramki- SnO_2 jest oznaczona zieloną linią; d) obraz HAADF STEM nanoramki PtRhNi z nanocząstkami SnO_2 oznaczonymi pomarańczowymi strzałkami; e) odpowiadające mapy EDS

Oba nanokatalizatory zostały przebadane pod kątem ich aktywności w reakcji utleniania etanolu (EOR) i wykazały wyższą aktywność w porównaniu z nanoramkami PtRhNi bez dodatku SnO_2 oraz komercyjnie stosowanymi nanocząstkami Pt. Szczegółowo zbadano także trwałość elektrochemiczną i stabilność uzyskanych nanokatalizatorów. Wykazano, że oba katalizatory oparte na nanoramkach PtRhNi/ SnO_2 mają zbliżoną masę, aktywność właściwą oraz prawie identyczny potencjał początkowy, jednak ich stabilność znacząco się różni. Okazało się, że katalizator oparty na nanoramkach PtRhNi z cienką warstwą SnO_2 jest podatny na degradację, podczas gdy katalizator składający się z nanoramek PtRhNi pokrytych nanocząstkami SnO_2 wykazuje znacznie większą trwałość i może być skutecznie stosowany jako wydajny katalizator do reakcji EOR.

2.3. Materiały katodowe o wysokiej entropii dla akumulatorów Na-jonowych

W Katedrze Energetyki Wodorowej zsyntetyzowano i porównano trzy materiały katodowe na bazie sodu z grupy tlenków warstwowych o wysokiej entropii: $\text{NaMn}_{0,2}\text{Fe}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Ni}_{0,2}\text{Ti}_{0,2}\text{O}_2$ (HEO-T), $\text{NaMn}_{1/6}\text{Fe}_{1/6}\text{Co}_{1/6}\text{Ni}_{1/6}\text{Ti}_{1/6}\text{Cu}_{1/6}\text{O}_2$ (HEO-TC) oraz $\text{NaMn}_{0,2}\text{Fe}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Ni}_{0,2}\text{Sn}_{0,1}\text{Al}_{0,05}\text{Mg}_{0,05}\text{O}_2$ (HEO-SAM), z których wszystkie wykazują intrygujące właściwości strukturalne i elektrochemiczne (Nowak et al. 2023). Zmontowano ogniwa testowe CR2032 i poddano je testom przy różnych natężeniach prądu, w zakresie od C/10–5 C. Ponadto, aby uzyskać wgląd w mechanizmy rządzące ogniwami opartymi na HEO podczas pracy, przeprowadzono pomiary *operando*-XRD.

Wykazano, że wystąpienie szybkiego przejścia fazowego O3/P3 podczas pracy ogniwa jest kluczowe dla osiągnięcia wysokich i stabilnych wartości wydajności właściwej. Zmontowane półogniwa osiągnęły wysoką właściwą pojemność rozładowania przy natężeniu prądu C/10: 193, 143 i 152 mAh/g odpowiednio dla HEO-T, HEO-TC i HEO-SAM.



Rys. 3. Obrazy SEM proszków HEO-SAM po syntezie

Materiał katodowy HEO-SAM został przetestowany w układzie pełnoogniwowym z materiałem anodowym na bazie Sb i wykazał fascynujące właściwości elektrochemiczne (badania SEM, Rys. 3). Krzywe ładowania i rozładowania bardzo przypominały te w półogniwach i nie zaobserwowano żadnych dodatkowych cech. Co więcej, uzyskane pojemności ładowania/rozładowania były stosunkowo wysokie, konkretnie 149 mAh/g w warunkach C/10. Podczas długotrwałej pracy cyklicznej przy natężeniu prądu 1 C zaobserwowano znaczny spadek pojemności. Jednakże sprawność kulombowska pozostawała niezmiennie wysoka – w ciągu 150 cykli ładowania/rozładowania przekroczyła 99%, co stanowi mocny dowód na to, że podczas pracy ogniwa nie wystąpiły żadne poważniejsze niepożądane reakcje chemiczne. Aby złagodzić lub wyeliminować spadek wydajności, wymagany jest dalszy rozwój materiału katody HEO-SAM w konfiguracjach pełnoogniwowych. Wykazano, że warstwowe materiały o wysokiej entropii są obiecującymi kandydatami na materiały katodowe w akumulatorach Na-jon. Przedstawione wyniki i analiza dostarczają mocnych dowodów na to, że modyfikacja składu chemicznego, szczególnie podsięci M, może znacząco wpłynąć na mechanizm rządzący pracą komórek.

2.4. Badania stopów międzymetalicznych jako stacjonarnych magazynów na wodór z perspektywy przemian fizykochemicznych

Tematyka magazynowania wodoru pozostaje bardzo ważnym aspektem badań naukowych Katedry Energetyki Wodorowej. Szczególną ciekawość budzi zagadnienie wykorzystania stopów międzymetalicznych typu AB_5 (baza $LaNi_5$) czy AB_2 typu fazy Lavesa (bazujące na A: ziemia rzadka, B: metal przejściowy). Opublikowana w listopadzie 2023 r. szeroka przeglądowa praca (Budziak et Szafraniec 2023a) opisująca kompleksowo przemiany strukturalne i magnetyczne w układach typu RMn_2H_x pod wpływem wodoru ukazała się jako rozdział w publikacji (Budziak et Szafraniec 2023b).

Wymienione prace powstały we współpracy m.in. z Instytutem Fizyki Jądrowej PAN, Uniwersytecie Jagiellońskim, Instytutem Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN.

3. Alternatywne materiały elektrodowe dla tanich i wysokoenergetycznych akumulatorów nowej generacji: od elektrod Li-rich NMC po polianionowe materiały dla ogniw sodowych

W ostatnich latach obserwowany jest bezprecedensowy wzrost zapotrzebowania na elektrochemiczne magazynowanie energii, co wynika z dynamicznego rozwoju elektromobilności, popularyzacji urządzeń przenośnych oraz intensywnego wdrażania odnawialnych źródeł energii. Kluczową rolę w tej transformacji odgrywają akumulatory Li-ion, które – dzięki wysokiej gęstości energii oraz długiej żywotności – stały się fundamentem technologii wykorzystywanej w samochodach elektrycznych, elektronice użytkowej, a także w systemach magazynowania energii w nowoczesnych sieciach *smart grid*.

W 2017 r. rynek akumulatorów litowych osiągnął wartość 25 miliardów dolarów, przy średnim rocznym wzroście na poziomie 15%. Jednocześnie dzięki postępowi technologicznemu i optymalizacji procesów produkcyjnych koszt wytworzenia ogniw Li-ion spadł do poziomu 156 \$/kWh, zbliżając się do celu wyznaczonego przez Departament Energii USA (DOE). Mimo znacznych osiągnięć nadal istnieje silna potrzeba dalszego obniżania kosztów akumulatorów, aby umożliwić ich jeszcze powszechniejsze zastosowanie – zarówno w elektromobilności, jak i w energetyce rozproszonej czy dużych systemach magazynowania energii. Należy podkreślić, że największy potencjał redukcji kosztów tkwi w materiałach katodowych, które stanowią około 30–50% całkowitych kosztów produkcji ogniwa. Właśnie dlatego tak wiele uwagi poświęca się rozwojowi nowych, bardziej dostępnych i tańszych materiałów katodowych, a nie obniżaniu ich parametrów użytkowych.

Coraz większe zapotrzebowanie na surowce, w szczególności lit, nikiel i kobalt, oraz konieczność dalszego ograniczania kosztów skłaniają do poszukiwania innowacyjnych rozwiązań w zakresie materiałów elektrodowych oraz do eksplorowania alternatywnych technologii, takich jak akumulatory sodowo-jonowe (Na-ion), które bazują na bardziej dostępnych i tańszych pierwiastkach.

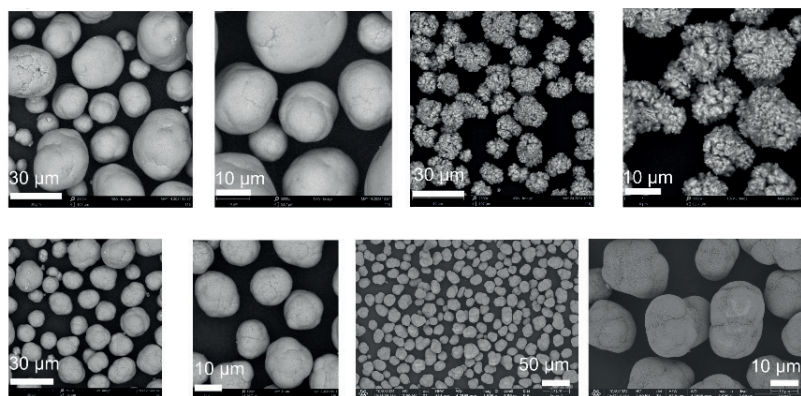
3.1. Akumulatory litowe z elektrodami na bazie katod Li-rich NMC

W odpowiedzi na wyzwania współczesnego rynku i przemysłu, zespół badawczy w Katedrze Energetyki

Wodorowej podjął intensywne prace nad opracowaniem innowacyjnych materiałów katodowych dla akumulatorów litowych (Li-ion), koncentrując się na nowych generacjach związków typu Li-rich NMC ($\text{Li}_{1+x}\text{Ni}_{0,13}\text{Mn}_{0,54}\text{Co}_{0,13}\text{O}_2$) o zwiększonej zawartości manganu i obniżonej ilości niklu oraz kobaltu. Taka kompozycja materiału nie tylko zmniejsza jego negatywny wpływ na środowisko, ale przede wszystkim umożliwia istotne obniżenie kosztów produkcji i ograniczenie zależności od deficytowych oraz kosztownych surowców, co ma ogromne znaczenie w kontekście dalszego rozwoju rynku akumulatorów.

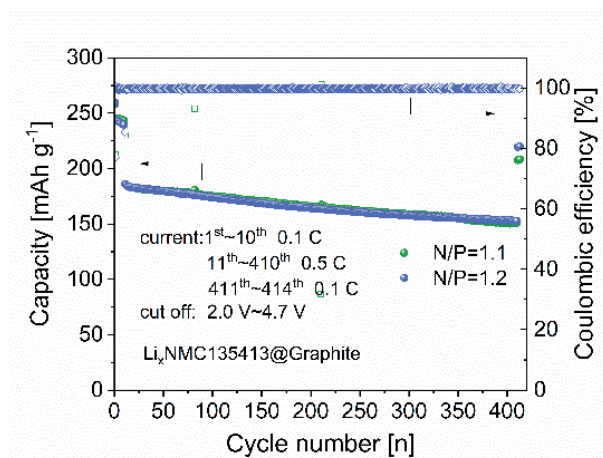
Opracowane w zespole materiały Li-rich NMC wyróżniają się wyjątkowo wysoką pojemnością właściwą, osiągającą około 250 mAh/g przy prądzie C/10 (Kulka et al. 2025, Redel et al. 2020, Redel et al. 2021), co znacznie przewyższa parametry standardowych katod, takich jak $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$. Tak korzystne rezultaty są efektem zastosowania mechanizmu reakcji redoks tlenu, w którym aniony tlenu aktywnie uczestniczą w wymianie elektronów podczas procesu ładowania i rozładowania. Dzięki temu możliwe jest osiągnięcie bardzo wysokiej gęstości energii na poziomie 595 Wh/L przy jednoczesnym utrzymaniu kosztów materiału katodowego na poziomie porównywalnym do najtańszych dziś rozwiązań, jakimi są ogniwa LiFePO_4 .

Prace zespołu nie ograniczały się jedynie do opracowania składu materiałów, ale objęły również szeroko zakrojone badania nad architekturą i morfologią opisanych wcześniej materiałów (Rys. 4).



Rys. 4. Mikrofotografie SEM materiałów uzyskanych metodą kontrolowanego współstrącania

Zastosowanie nowoczesnych metod syntezy, takich jak kontrolowane współstrącanie, pozwoliło precyzyjnie kształtować strukturę i wielkość ziaren, a w konsekwencji uzyskać sferyczne cząsteczki sprzyjające szybkiemu i równomiernemu transportowi jonów litu i elektronów w materiale. Dodatkowo w ramach prac zespołu opracowano innowacyjne powłoki powierzchniowe zawierające związki aluminium i niobu, które skutecznie chronią materiał katodowy przed degradacją i rozpuszczaniem się jonów metali przejściowych, co znacząco wpłynęło na stabilność katod po długim czasie eksploatacji (Rys. 5).



Rys. 5. Pojemność rozładowania oraz efektywność kulombowska w funkcji numeru cyklu dla ogniwa bazującego na katodzie Li-rich NMC

Kolejnym ważnym aspektem badań była optymalizacja interfejsu katoda/elektrolit oraz dobór odpowiednich dodatków do elektrolitu – m.in. TTSPi, które przyczyniają się do wydłużenia żywotności ogniw i zwiększenia ich bezpieczeństwa. W ramach prac badawczych opracowano rozwiązania, które zostały objęte ochroną patentową, a ich skuteczność potwierdzono w skali demonstracyjnej we współpracy z partnerami przemysłowymi, poprzez udzielenie licencji firmie The Batteries (Rys. 6). Zrealizowane testy akumulatorów z wykorzystaniem opracowanych materiałów katodowych w konfiguracji z komercyjnymi anodami grafitowymi pokazały, że można osiągnąć gęstość energii przekraczającą 800 mWh/g oraz retencję pojemności sięgającą 90% po 100 cyklach ładowania i rozładowania.



Rys. 6. Ogniwa typu pouch-cell: a) elementy składowe ogniw; b) kompletne ogniwa

3.2. Perspektywy i wyzwania w rozwoju akumulatorów sodowo-jonowych (Na-ion)

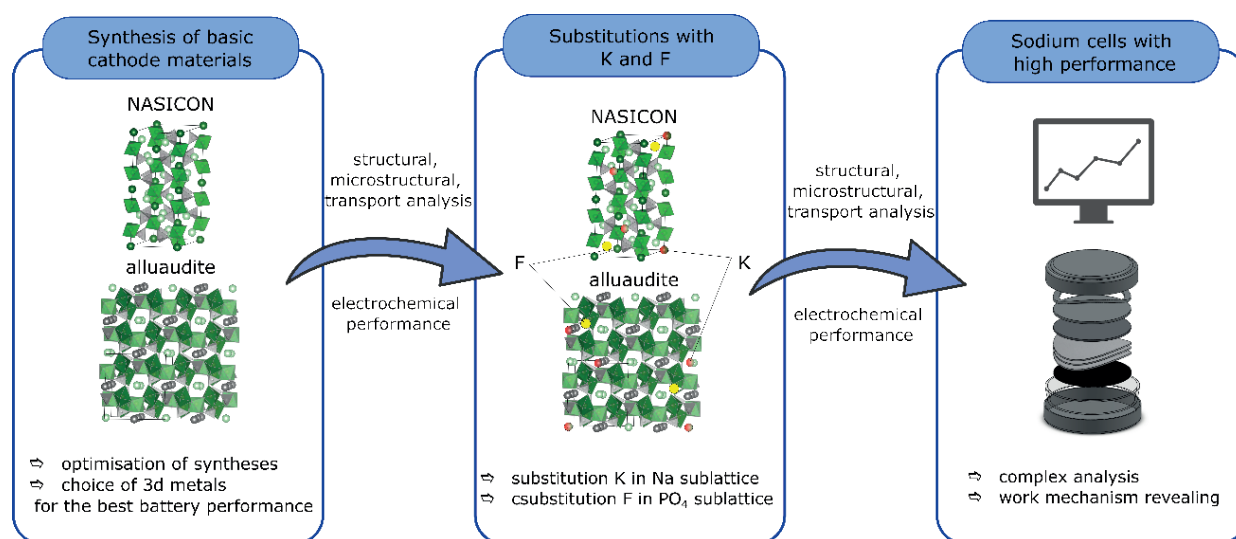
Zespół prowadzi również intensywne prace nad rozwojem alternatywnych technologii magazynowania energii, odpowiadając tym samym na światowe wyzwania związane z dostępnością litu, niklu czy kobaltu oraz rosnącymi kosztami ich pozyskania. W związku z tym coraz większą uwagę w badaniach zespołu poświęca się akumulatorom sodowo-jonowym (Na-ion), które stanowią atrakcyjną alternatywę dla konwencjonalnych ogniw litowych. Sód, jako pierwiastek powszechnie dostępny i znacznie tańszy od litu, daje realną szansę na opracowanie rozwiązań dla wielkoskalowych magazynów energii, które umożliwią bilansowanie podaży i popytu w nowoczesnej energetyce.

Choć akumulatory te charakteryzują się niższą gęstością energii i mocy w porównaniu do ogniw Li-ion, ich atutem są wyraźnie niższe koszty produkcji oraz łatwość pozyskiwania surowców. Podejmowane prace badawcze dotyczą przezwyciężenia problemów związanych z dużym promieniem jonowym sodu oraz jego wysoką masą atomową, co ogranicza pojemność gravimetryczną i dynamikę transportu jonów w strukturze materiałów elektrodowych. Działania koncentrują się na opracowaniu nowoczesnych materiałów katodowych dla ogniw Na-ion, w szczególności z grupy NASICON ($\text{Na}_3\text{M}_2(\text{PO}_4)_3$) oraz alluaudite ($\text{Na}_2\text{M}_3(\text{PO}_4)_3$), gdzie M to metal przejściowy, najczęściej wanad, żelazo, mangan lub miedź. Struktury te, będące przedmiotem badań zespołu, cechują się wysoką stabilnością termiczną i chemiczną, choć ich niska przewodność elektryczna w dalszym ciągu uniemożliwia ich szeroką adaptację. W związku z tym, w celu poprawy właściwości transportowych i elektrochemicznych powyższych materiałów, badania dotyczą m.in. materiałów, w których w podsieci M znajduje się jeden lub kilka metali przejściowych, a także podstawień potasu w podsieci sodu czy fluoru w podsieci tlenu. Takie zabiegi mogą prowadzić do poprawy transportu jonów sodowych, poprawy stabilności chemicznej i termicznej materiałów, a co za tym idzie – do zwiększenia pojemności właściwej i żywotności ogniw. Schematyczne

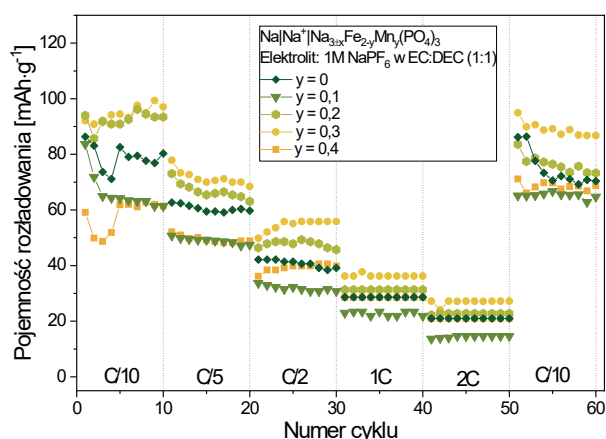
przedstawienie powyższych prac badawczych pokazano na schemacie na Rys. 7.

Badania zespołu w tym zakresie obejmują szeroki wachlarz eksperymentów: od optymalizacji metody syntezy (m.in. zol-żel) i modyfikacji składu chemicznego materiałów, po dobór odpowiedniego elektrolitu i organicznych dodatków poprawiających właściwości elektrochemiczne ogniw. Metody badawcze wykorzystywane w powyższych pracach skupiają się na strukturalnych i mikrostrukturalnych właściwościach otrzymanych materiałów (XRD, spektroskopia ramanowska, SEM/EDS), które mają bezpośredni wpływ na właściwości transportowe i elektrochemiczne ogniw na ich bazie. Skonstruowane ogniwa są poddawane testom elektrochemicznym polegającym na cyklicznym ładowaniu i rozładowywaniu, woltamperometrii cyklicznej, pomiarach spektroskopii impedancyjnej czy *operando*-XRD pozwalającym określić mechanizm transportu jonów sodu podczas powyższych procesów.

Dotychczas w ramach prac nad materiałami katodowymi dla ogniw Na-ion udało się uzyskać grupy materiałów bazujące na strukturach polianionowych zawierające tylko ekologiczne i tanie pierwiastki, które odznaczają się stabilną pojemnością właściwą oraz poprawioną w stosunku do wyników literaturowych długością życia ogniwa (Rys. 8) (Walczak et al. 2019a, 2019b).



Rys. 7. Schematyczne przedstawienie prac badawczych w zakresie materiałów dla ogniw Na-ion



Rys. 8. Pojemność rozładowania w funkcji numeru cyklu dla materiałów z grupy NASICON-ów

3.3. Podsumowanie

Prace zespołu w zakresie rozwoju technologii akumulatorów koncentrują się zarówno na optymalizacji istniejących rozwiązań (takich jak materiały Li-rich NMC dla ogniw Li-ion), jak i na poszukiwaniu alternatyw w postaci elektrod dla ogniw sodowych. Nowe materiały katodowe, innowacyjne podejście do architektury elektrod oraz szczegółowa analiza mechanizmów reakcji elektrodowych pozwalają na opracowanie ogniw o coraz wyższej wydajności, bezpieczeństwie i konkurencyjności kosztowej. Badania bazujące zarówno na litie, jak i na sodzie, mają potencjał, by wspierać dalszy rozwój elektromobilności i integrację odnawialnych źródeł energii w skali globalnej. Najnowsze osiągnięcia w takich obszarach jak kontrola reakcji redoks (w tym redoksu tlenu), optymalizacja interfejsów i architektura materiałów mogą przyczynić się do powstania akumulatorów przyszłości – trwałych, wydajnych i zrównoważonych.

Prace badawcze zrealizowane zostały w ramach projektu LIDER XI finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) o numerze LIDER/36/0131/L-11/19/NCBR/2020. Prace badawcze są realizowane w ramach projektu SONATA o numerze: 2023/51/D/ST5/00480/R, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN).

4. Ogniwa sodowe na bazie alluaudyty siarczanowej jako magazyny energii o potencjalnych zastosowaniach komercyjnych

Współczesne wyzwania energetyczne XXI wieku wymagają opracowania efektywnych technologii magazynowania energii na dużą skalę. Jest to szczególnie istotne w kontekście integracji odnawialnych źródeł energii z sieciami elektroenergetycznymi i stanowi jeden z kluczowych problemów współczesnej nauki o materiałach. Obecnie stosowane akumulatory litowo-jonowe (Li-ion), mimo swojej dominacji w zastosowaniach przenośnych i pojazdach elektrycznych, napotykają na znaczące limitacje związane z ograniczoną dostępnością litu oraz rosnącymi kosztami surowców.

4.1. Akumulatory sodowo-jonowe jako alternatywa dla technologii litowo-jonowej

W odpowiedzi na te ograniczenia akumulatory sodowo-jonowe (Na-ion) zyskują na znaczeniu jako jedna z najbardziej obiecujących alternatyw dla litowo-jonowych. Wykorzystanie sodu – szóstego najliczniej występującego pierwiastka w skorupie ziemskiej – daje znaczące korzyści ekonomiczne i środowiskowe. Jest pod tym względem skuteczniejszy niż lit, którego wydobycie jest ryzykowne geopolitycznie, ponieważ jego największe światowe złoża koncentrują się w niestabilnych politycznie regionach, takich jak Argentyna, Boliwia czy Chile. W kontekście współczesnych konfliktów zbrojnych szczególnie istotna staje się dywersyfikacja źródeł dostaw surowców krytycznych, aby uniknąć uzależnienia gospodarek od niestabilnych politycznie regionów. Dodatkową zaletą ogniw Na-ion jest możliwość wyeliminowania kobaltu (stosowanego w materiałach katodowych w ogniwach Li-ion) i zastąpienia go tanimi i powszechnie występującymi związkami żelaza oraz manganu. Kobalt charakteryzuje się wysoką toksycznością, a jego pozyskiwanie

odbywa się głównie w Demokratycznej Republice Konga, w małych, niebezpiecznych kopalniach, powodując szkodliwe skutki zdrowotne dla lokalnych społeczności, w szczególności dla dzieci. Mimo że akumulatory Na-ion charakteryzują się niższą gęstością energii niż ich litowe odpowiedniki, to ich potencjał w zakresie magazynowania energii na dużą skalę jest niezaprzeczalny ze względu na korzystniejszy stosunek zgromadzonej energii do kosztów materiałów.

4.2. Materiały katodowe na bazie polianionu

Materiały polianionowe typu *alluaudite* stanowią jedną z najbardziej obiecujących grup katod dla akumulatorów Na-ion ze względu na swoją unikalną geometrię struktury krystalicznej. Związki tego typu można przedstawić wzorem ogólnym: $AA'BM_2(XO_4)_3$, gdzie jony sodu zajmują trzy różne pozycje krystalograficzne: A (Na2), A' (Na3) i B (Na1), a pozycja M jest obsadzana metalami przejściowymi, takimi jak żelazo, mangan czy nikiel. W strukturze występują charakterystyczne tunele, które stanowią ścieżki dyfuzji dla jonów Na^+ . Wytrzymała i sztywna struktura trójwymiarowa znacząco zmniejsza zmiany strukturalne podczas interkalacji/deinterkalacji jonów sodu ze względu na silne wiązania kowalencyjne X-O (gdzie X = S, P, Si), co przekłada się na niewielkie starty pojemności w kolejnych cyklach ładowania/rozładowania. Wśród materiałów polianionowych szczególnie wyróżniają się siarczany, jak np. $Na_{2+2x}Fe_{2-x}(SO_4)_3$, charakteryzujące się jednym z najwyższych dotychczas zaobserwowanych potencjałów redoks Fe^{3+}/Fe^{2+} wynoszącym 3,8 V względem Na/Na⁺ (Oyama et al. 2016). Ta wartość przekłada się na teoretyczną gęstość energii przekraczającą 450 Wh kg⁻¹ (Barpanda et al. 2014). Badania nad materiałami z częściowym podstawieniem w podsieci żelaza doprowadziły do syntezy szeregu związków o wzorze: $Na_{2+2x}M_{2-x}(SO_4)_3$, gdzie M reprezentuje różne metale przejściowe. Wprowadzenie manganu, niklu czy kobaltu w miejsce żelaza umożliwia modulację właściwości elektrochemicznych i dostęp do dodatkowych par redoks w wyższych potencjałach (Wei et al. 2016).

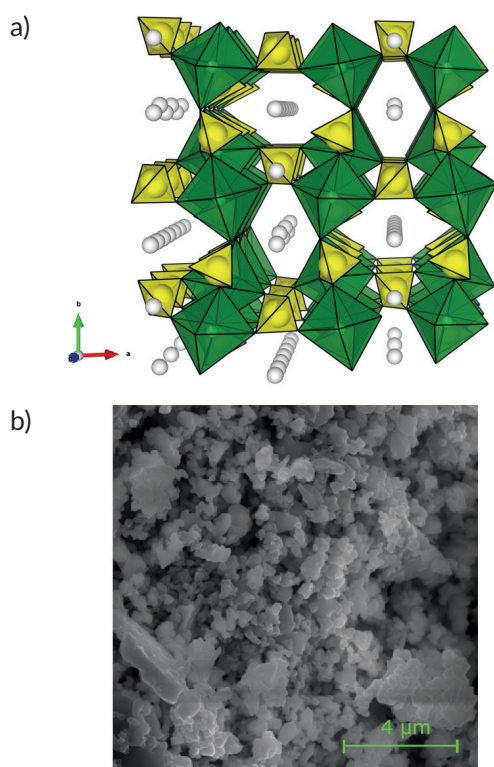
4.3. Wyzwania, ograniczenia i strategie optymalizacji

Mimo obiecujących właściwości badane materiały polianionowe napotykać na charakterystyczne ograniczenia typowe dla tej klasy związków. Niska przewodność elektryczna oraz relatywnie niska pojemność są głównymi wyzwaniami ograniczającymi ich rozwój. Dodatkowo synteza stechiometrycznych faz krystalicznych, szczególnie w przypadku siarczanych, wymaga precyzyjnej kontroli warunków reakcji ze względu na tendencję do rozkładu termicznego lub powstawania zanieczyszczeń pogarszających pracę materiału w ogniwach Na-ion (Oyama et al. 2015). Współczesne strategie badawcze koncentrują się na kilku kluczowych kierunkach: modyfikacji powierzchni cząstek przez powlekanie przewodzącymi materiałami węglowymi, kontroli morfologii i rozmiaru ziaren oraz optymalizacji składu chemicznego w celu maksymalizacji pojemności przy zachowaniu stabilności strukturalnej. Szczególną uwagę poświęca się również rozwojowi metod syntezy umożliwiających otrzymywanie materiałów o kontrolowanej stechiometrii i minimalnej zawartości faz wtórnych.

4.4. Rezultaty prowadzonych badań

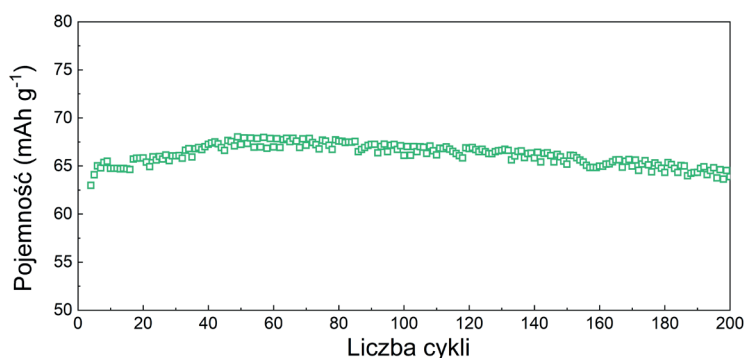
Związek $Na_{2,0}Fe_{2,0}(SO_4)_3$ wprowadzony do badań jako materiał katodowy w ogniwach sodowych w 2014 r. (Barpanda et al. 2014), wzbudził spore zainteresowanie. Istotną przeszkodą w praktycznym zastosowaniu $Na_{2,0}Fe_{2,0}(SO_4)_3$ okazały się jednak trudności w syntezie czystej, jednofazowej postaci tego związku, wolnej od niepożądanych zanieczyszczeń (Oyama et al. 2015). W obliczu tych wyzwań zdecydowano się na zbadanie związków o zmodyfikowanej stechiometrii, w szczególności $Na_{2+2x}Fe_{2-x}(SO_4)_3$. Dane literaturowe sugerują, iż zmiana stechiometrii, prowadząca do materiału o składzie $Na_{2,5}Fe_{1,75}(SO_4)_3$, pozwala na znaczące ograniczenie poziomu zanieczyszczeń. W strukturze $Na_{2,5}Fe_{1,75}(SO_4)_3$ zachowanie obojętności ładunku jest realizowane poprzez podstawienie jonów żelaza jonami sodu w stosunku jeden do dwóch, przy czym nadmiarowe jony sodu zajmują pozycje krystalograficzne Na2 i Na3

(Nishimura et al. 2016). W rezultacie uzyskuje się związek o wzorze sumarycznym $[\text{Na}1]_{1,0}[\text{Na}2]_{0,71}[\text{Na}3]_{0,54}[\text{Fe}_{0,875}\text{Na}_{0,125+2}](\text{SO}_4)_3$. W ramach prac prowadzonych w Katedrze Energetyki Wodorowej opracowano efektywną metodę syntezy $\text{Na}_{2,5}\text{Fe}_{1,75}(\text{SO}_4)_3$ w stanie stałym, umożliwiającą otrzymanie materiału jednofazowego. Na Rys. 9 przedstawiono wizualizację struktury krystalicznej alluaudydu (a) oraz jego charakterystykę morfologiczną (b).

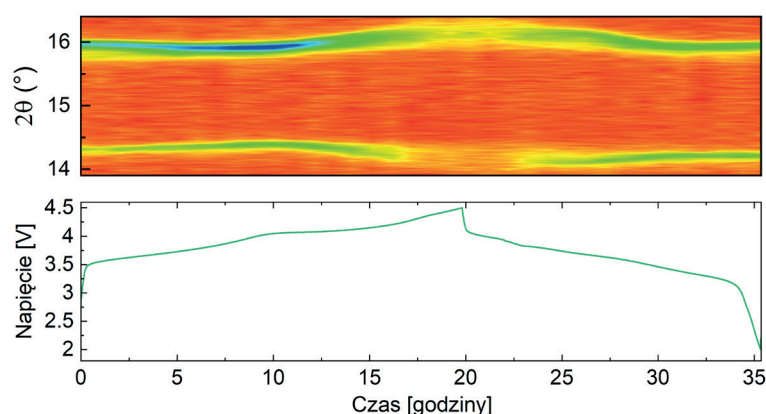


Rys. 9. Efektywna metoda syntezy: a) wizualizacja struktury krystalicznej alluaudydu (kolor: zielony – żelazo, żółty – siarka, biały – sód, atomy tlenu pominięto dla czytelności); b) obraz SEM proszku o składzie $\text{Na}_{2,5}\text{Fe}_{1,75}(\text{SO}_4)_3$

W celu kompleksowej charakterystyki materiału katodowego oraz analizy jego zmian strukturalnych i fazowych podczas procesów interkalacji i deinterkalacji jonów sodu przeprowadzono zaawansowane badania z wykorzystaniem szerokiego spektrum technik pomiarowych. Interdyscyplinarne badania łączyły kompetencje z zakresu chemii, elektrochemii, inżynierii materiałowej oraz fizyki ciała stałego. Zastosowano następujące techniki i metody badawcze: dyfrakcję rentgenowską (XRD) typu *in situ*, *ex situ* i *operando*, spektroskopię Mössbauerowską, spektroskopię fotoelektronów wzbudanych promieniowaniem rentgenowskim (XPS), pomiary właściwości transportowych metodą spektroskopii impedancyjnej (EIS), testy elektrochemiczne w konfiguracji ogniw, analizę pojemności różnicowej (dQ/dV), a także różnicową kalorymetrię skaningową (DSC). Badania eksperymentalne wsparto obliczeniami teoretycznymi struktury elektronowej wykonanymi z wykorzystaniem teorii funkcjonału gęstości (DFT). Analiza stanu walenyjnego żelaza w otrzymanym proszku $\text{Na}_{2,5}\text{Fe}_{1,75}(\text{SO}_4)_3$, przeprowadzona za pomocą spektroskopii Mössbauera izotopu ^{57}Fe , jednoznacznie potwierdziła występowanie jonów żelaza na +2 stopniu utlenienia. W próbkach poddanych częściowej deinterkalacji sodu stwierdzono elektrochemiczną aktywność jonów żelaza. Wyniki te znalazły potwierdzenie w badaniach XPS oraz w spektroskopii Ramana. Na rysunku Rys. 10 zaprezentowano pojemności rozładowania ogniwa o schemacie $\text{Na}|\text{Na}^+|\text{Na}_{2,5-x}\text{Fe}_{1,75}(\text{SO}_4)_3$ przy obciążeniu prądem C/5 w zakresie napięć 2,0 do 4,5 V. Testy elektrochemiczne wykazały wysoką sprawność, stabilność ogniwa oraz niewielką utratę pojemności.



Rys. 10. Pojemność rozładowania dla ogniwa o schemacie $\text{Na}|\text{Na}^+|\text{Na}_{2,5-x}\text{Fe}_{1,75}(\text{SO}_4)_3$ przy obciążeniu prądem C/20



Rys. 11. Ewolucja dyfraktogramów XRD zarejestrowanych metodą *operando* dla ogniwa $\text{Na}|\text{Na}^+|\text{Na}_{2.5-x}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$ podczas pierwszego cyklu pracy przy prądzie C/20

W celu dogłębnego zbadania mechanizmu magazynowania jonów sodu w strukturze $\text{Na}_{2.5}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$ materiał poddano szczegółowym badaniom dyfrakcji rentgenowskiej w konfiguracjach *in situ*, *ex situ* oraz *operando*. Rys. 11 ilustruje ewolucję dyfraktogramów XRD zarejestrowanych dla ogniwa $\text{Na}|\text{Na}^+|\text{Na}_{2.5-x}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$ podczas pierwszego cyklu pracy dla prądu C/20.

Obserwowane zmiany parametrów sieci krystalicznej a , b i c nie mają charakteru monotonicznego w funkcji postępu procesu interkalacji/deinterkalacji, jednakże są odwracalne. Podczas deinterkalacji (ładowania) dochodzi do zmniejszenia objętości komórki elementarnej oraz do pewnego zniekształcenia sieci krystalicznej. Punkt przegięcia widoczny w przebiegu zmian parametru sieciowego b jest odzwierciedleniem interesującego zjawiska, które polega na wyprowadzeniu części jonów sodu z pozycji Na1 i dyfuzji Fe^{2+} w miejsca powstałych wakancji po jonach sodu. Efekt ten ma charakter nieodwracalny i przejawia się wyłącznie podczas pierwszego cyklu ładowania ogniwa. Podobne zjawisko było obserwowane również w innych pracach badawczych poświęconych temu związkowi (Oyama et al. 2016). Należy zaznaczyć, że w przypadku materiałów katodowych opartych na alluaudytach podstawianych manganem, ze względu na ich niższe pojemności, tego typu zjawisko nie jest obserwowane. Obliczenia wykonane metodą DFT dostarczyły cennych informacji dotyczących struktury elektronowej badanego związku, determinującej jego właściwości transportowe i elektrochemiczne. W odróżnieniu od

wcześniej analizowanych materiałów katodowych z grupy tlenków warstwowych wyniki obliczeń DFT dla $\text{Na}_{2.5-x}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$ ujawniły znaczący wkład atomów sodu do całkowitej gęstości stanów elektronowych (DOS). Badania potwierdziły różną aktywność elektrochemiczną jonów sodu pochodzących z różnych pozycji krystalograficznych, zależną od stopnia naładowania (zawartości sodu) w ogniwie $\text{Na}|\text{Na}^+|\text{Na}_{2.5-x}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$. Podjęto też próby dalszej optymalizacji właściwości $\text{Na}_{2.5-x}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$ przez częściowe podstawienie żelaza manganem. Inicjatywy te nie przyniosły jednak oczekiwanych rezultatów. Związek $\text{Na}_{2.5}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$ charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami transportowymi, mniejszą polaryzacją omową oraz wyższą pojemnością i wydajnością w porównaniu z jego manganowymi analogami. Stwierdzono, że mangan w tej strukturze jest nieaktywny elektrochemicznie i nie uczestniczy w procesach wymiany ładunku, co prowadzi do obniżenia teoretycznej pojemności materiału katodowego. Krzywe napięcia obwodu otwartego (OCV) uzyskane dla ogniwa z katodami $\text{Na}_{2.5}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$, $\text{Na}_{2.5}(\text{Fe}_{2/3}\text{Mn}_{1/3})_{1.75}(\text{SO}_4)_3$ oraz $\text{Na}_{2.5}\text{Fe}_{0.875}\text{Mn}_{0.875}(\text{SO}_4)_3$ wykazują silniejszą zależność napięcia od zawartości sodu w przypadku materiałów domieszkowanych manganem. Konsekwencją opisanych zjawisk są niższe praktyczne pojemności uzyskiwane z ogniwa bazujących na alluaudycie podstawianym manganem. W katedrze prowadzone są dalsze badania nad strukturami alluaudyty podstawianymi niklem oraz kobaltem.

4.5. Podsumowanie

Akumulatory Na-ion budzą rosnące zainteresowanie jako tańsza alternatywa dla technologii Li-ion, zwłaszcza w zastosowaniach stacjonarnych. Kluczowe wyzwanie stanowi opracowanie stabilnych materiałów katodowych, umożliwiających szybki i odwracalny transport jonów sodu. Szczególnie obiecujące są związki o strukturze alluaudyty, dzięki otwartej sieci kanałów sprzyjających interkalacji. W ramach prac prowadzonych w Katedrze Energetyki Wodorowej przebadano związek $\text{Na}_{2.5}\text{Fe}_{1.75}(\text{SO}_4)_3$, skupiając się na mechanizmie interkalacji/deinterkalacji jonów sodu oraz wpływie struktury elektronowej na aktywność elektrochemiczną. Materiał otrzymano metodą syntezy w stanie stałym i scharakteryzowano za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej oraz spektroskopii Mössbauera. Stwierdzono, że atomy sodu mają istotny udział w gęstości stanów elektronowych, co sugeruje ich wpływ na procesy redoks. Różnice w aktywności pozycji krystalograficznych sodu wskazują na złożony mechanizm pracy materiału. Podczas ładowania zaobserwowano wieloetapową deinterkalację jonów Na⁺ oraz utlenianie jonów Fe. Materiał wykazał pojemność rozładowania 91,8 mAh/g przy obciążeniu C/20 i średnie napięcie 3,4 V względem sodu. Analiza dQ/dV ujawniła wieloetapowe reakcje redoks oraz nieodwracalny pik przy 4,1 V, przypisany migracji jonów Fe. Zoptymalizowany materiał wykazał wysoką stabilność cykliczną 97,5% pojemności po 300 cyklach dla prądu C/5, co potwierdza jego potencjał do zastosowań w komercyjnych ogniwach Na-ion.

Prace badawcze zostały zrealizowane w ramach: projektu OPUS 22 LAP (nr 2021/43/I/ST8/01125), finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, działania 4 (nr 9805) Inicjatywy Doskonałości – Uczelnia Badawcza AGH, projektu nr 504885810 finansowanego przez Niemiecką Fundację Badawczą (DFG) oraz dzięki wsparciu Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (FNP) w ramach programu START, nr 047.2023.

Opisane badania były prowadzone we współpracy m.in. z Wydziałem Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, Wydziałem Fizyki, Astronomii i Informatyki

Stosowanej UJ oraz Instytutem Fizyki Uniwersytetu Technicznego w Chociebużu-Senftenbergu (Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg).

5. Badania efektywności energetycznej mechanicznego magazynu energii w powietrzu sprężonym micro-CAES

Transformacja sektora energetycznego w kierunku zrównoważonego rozwoju wiąże się ze zwiększeniem udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w miksie energetycznym. Jednym z rozwiązań wspomagających integrację OZE oraz rozwiązaniem problemu intermitentnej generacji energii są systemy magazynowania energii (Saadat et al. 2015). Charakteryzujący się mocą do 1 MW system micro-CAES (*micro compressed air energy storage*) umożliwia magazynowanie nadmiaru energii odnawialnej w okresach niskiego zapotrzebowania i oddawanie jej w momentach szczytowego zużycia, co wspomaga stabilizację sieci lokalnych (Chen et al. 2016). Micro-CAES składa się z następujących elementów: sprężarki, ekspandera, zbiorników powietrza oraz zasobników ciepła (Rufer 2017). Podczas wysokiej generacji energii przez OZE powietrze jest sprężane, a następnie magazynowane w zbiorniku do momentu pojawienia się wysokiego zapotrzebowania na energię. Uzyskanie energii elektrycznej odbywa się przez układ ekspander-generator. Liniowy ekspander zasilany sprężonym powietrzem przemieszcza się ruchem posuwistym przekształcanym w ruch obrotowy wału za pomocą układu korbowego. Wał poprzez przekładnię planetarną napędza generator generujący energię elektryczną. Głównymi zaletami systemów mikro-CAES są niskie koszty inwestycyjne i operacyjne, trwałość instalacji, elastyczność w zakresie punktu pracy oraz wielkości generowanej mocy.

W niniejszej pracy zaprezentowano infrastrukturę badawczą grupy EECS (*energy efficiency in complex systems*) do badań związanych z dynamiką gazu w instalacji magazynowania powietrza sprężonego oraz wyniki symulacji komputerowych. Badania realizowane są na stanowiskach pomiarowych pozwalających na analizę procesu rozprężania w różnych konfiguracjach.

5.1. Metodyka badawcza.

Modelowanie matematyczne, model 0-wymiarowy

W celu przeprowadzenia symulacji komputerowych i pozyskania parametrów koniecznych do zaprojektowania instalacji wykonano model matematyczny opisujący procesy termodynamiczne oraz mechanikę instalacji micro-CAES. Model bazuje na równaniach różniczkowych pierwszego rzędu uwzględniających bilanse masy i energii. Szczegółowy opis modelu, jego walidacja oraz analiza wrażliwości systemu micro-CAES zostały przedstawione w artykule Leszczyńskiego i współautorów (Leszczyński et al. 2023).

Poniższy układ równań prezentuje dynamikę napędu liniowego połączonego z generatorem:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} \cdot J = T_D - T_B - T_G \\ L_g \frac{dl}{dt} = N_{pb} \omega \Psi - (R_O + R_g) I \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: ω – prędkość obrotowa, J – moment bezwładności, T_D – moment napędowy, T_B – moment hamujący, T_G – moment elektromagnetyczny, L_g – indukcyjność generatora, I – natężenie prądu, t – czas, N_{pb} – liczba biegunów, R_O – rezystancja obciążenia, R_g – rezystancja generatora.

5.2. Infrastruktura badawcza – stanowiska eksperymentalne

W celu weryfikacji poprawności działania modelu opracowano zestaw stanowisk eksperymentalnych. Podstawowe pomiary wykonano na stanowisku jednotłokowym oraz podczas rozładowania zbiornika. Finalnym rezultatem prac eksperymentalnych było zaprojektowanie i budowa trójcyldrowego ekspandera tłokowego. Instalację wyposażono w czujniki pomiarowe, elektrozawory oraz sterownik PLC zapewniający precyzyjne sterowanie i rejestrację wyników. Na Rys. 12 przedstawiono zdjęcie pełnej instalacji.



Rys. 12. Trójcyldrowy ekspander powietrza

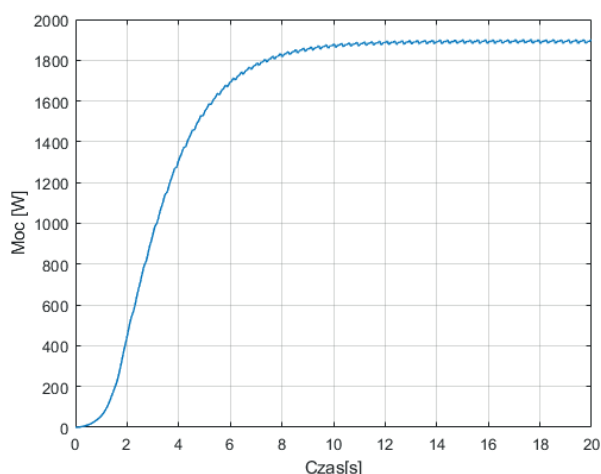
Zespół badawczy planuje wykonywać również badania w warunkach rzeczywistych, dzięki pozyskaniu mobilnej stacji micro-CAES, której wizualizacja pokazana jest na Rys. 13. Nowoczesne i unikalne narzędzie badawcze o mocy 10 kW, sprawności ponad 60% i pojemności 10 kWh umożliwi realizację badań plenerowych w skali przemysłowej.



Rys. 13. Wizualizacja mobilnej stacji micro-CAES. Planowana dostawa: czerwiec 2026 r. Zgoda udzielona przez Enairys Ltd.

5.3. Wyniki badań

W ramach przeprowadzonych symulacji komputerowych uzyskano wyniki dla 3-tłokowego ekspandera zasilanego sprężonym powietrzem o ciśnieniu 5 barów (Rys. 14). Siłowniki o parametrach geometrycznych: skok tłoka 500 mm, średnica cylindra 50 mm, były sterowane za pomocą opracowanej przez grupę badawczą funkcji intermitentnego zasilania PWM o współczynniku wypełnienia 0,5.



Rys. 14. Wyniki symulacji komputerowych: moc elektryczna w czasie 20 s

Ekspander osiągnął maksymalną moc elektryczną 1,9 kW przy sprawności całkowitej na poziomie 65%. Wyniki te potwierdzają skuteczność sterowania impulsowego w podnoszeniu efektywności energetycznej konwersji energii sprężonego powietrza na pracę mechaniczną w warunkach zbliżonych do technicznych.

5.4. Podsumowanie

Grupa badawcza EECS prowadzi wielokierunkowe badania nad efektywnością energetyczną złożonych systemów. Skonstruowana infrastruktura badawcza pozwala na walidację modeli matematycznych. Otrzymane wyniki symulacji pokazują, że zastosowanie metody zasilania PWM umożliwia optymalizację cyklu ekspansji i efektywne zarządzanie energią w systemach micro-CAES. To podejście badawcze będzie stanowiło podstawę do dalszych badań eksperymentalnych i wdrożeniowych w zakresie hybrydowych magazynów energii.

Praca została zrealizowana w ramach subwencji badawczej na podstawie umowy nr 16.16.210.476, wspieranej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Polską Narodową Agencję Wymiany Akademickiej w ramach Programu Partnerstwa Strategicznego, projekt nr BPI/PST/2021/1/00023. Projekt badawczy był dodatkowo wspierany przez program „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” na

Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, w ramach grantów nr 6236, 10505, 10494 oraz 10486. Ponadto badania były częściowo finansowane przez Narodowe Centrum Nauki (NCN), nr grantu DEC-2024/08/X/ST8/00046.

6. Grawitacyjne magazyny energii wykorzystujące infrastrukturę likwidowanych podziemnych zakładów górniczych

Problem magazynowania energii jest jednym z najważniejszych wyzwań, którego skuteczne rozwiązanie będzie stanowiło istotny wkład w dalszy rozwój cywilizacyjny. Transformacja energetyczna, pełne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii oraz eliminacja paliw kopalnych zależą w dużej części od tego, czy uda się skutecznie zmagazynować energię w różnej formie. Likwidacja jednej gałęzi przemysłu powoduje powstawanie szans na rozwój innej. Tak się dzieje w przypadku likwidacji kopalń, gdzie na terenach prowadzonej wcześniej eksploatacji może powstać zupełnie nowy rodzaj działalności, a infrastruktura może znacząco ułatwić to przekształcenie (Siostrzonek 2023, Siostrzonek et al. 2025).

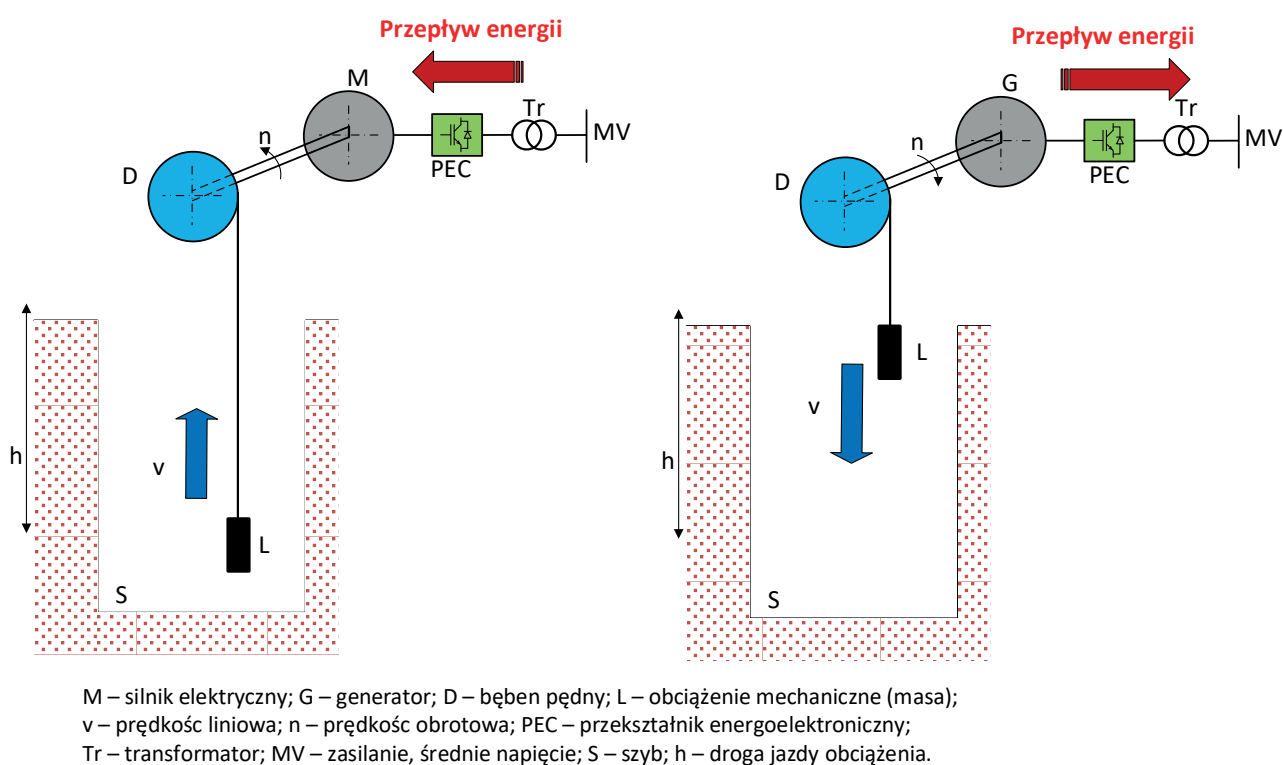
Na przestrzeni ostatnich pięćdziesięciu lat liczba kopalń węgla kamiennego w Polsce zmniejszyła się z 77 do 20. W latach 1991–2005 przeprowadzono największą w krajach europejskich likwidację kopalń, co spowodowało zmniejszenie ich liczby z 70 w 1996 r. do 36 w 2003 r., a roczne zdolności wydobywcze w tym okresie ograniczono o ok. 100 mln ton. Od 1989 r. branża wydobywcza w Polsce znajduje się w permanentnej restrukturyzacji, a w ostatnich latach – w likwidacji. Proces ten prowadzony był w taki sposób, że wznowienie wydobycia w zlikwidowanych zakładach lub wykorzystanie infrastruktury stało się niemożliwe. Dlatego tak ważne jest określenie możliwości zaadaptowania elementów wyposażenia zakładów górniczych do transformacji energetycznej.

Cennymi elementami tej infrastruktury są szyby kopalniane. W czasie likwidacji części podziemnej to one zasypywane są jako ostatnie, a w niektórych przypadkach pozostawia się je w celu technicznej obsługi wyrobisk sąsiednich funkcjonujących kopalń. W wyniku przeprowadzonej operacji zamykania kopalń zlikwidowano 392 szyby. Szacunkowa wartość odtworzenia tej części infrastruktury przekracza 190 mld zł.

Celem podjętych w AGH prac badawczych jest budowa wysokosprawnego skalowalnego grawitacyjnego magazynu energii w szybie kopalnianym. Zakładane do osiągnięcia parametry tego magazynu to duża pojemność oraz długi czas ładowania i rozładowania. Rozwiązanie to umożliwi pełne wykorzystanie infrastruktury likwidowanych zakładów górniczych w transformacji energetycznej terenów pokopalnianych. Najlepszym rozwiązaniem pozwalającym na zachowanie szybów jest zakładanie w nich układów magazynowania energii. Analiza dostępnych rozwiązań nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, że taki układ można zrealizować. Ograniczenia wynikają np. z przyczyn ekonomicznych. Kwestia możliwości

realizacji wymaga jednak szczegółowych analiz całej infrastruktury szybowej oraz energetycznej, co jest niezbędne do zapewnienia zasilania w energię elektryczną z punktu widzenia realizacji nowych inwestycji na terenach pokopalnianych.

W grawitacyjnym magazynie przechowywana jest energia potencjalna, którą ma obciążnik o masie m podniesiony na wysokość h (droga jazdy w szybie). Maszyna wyciągowa zainstalowana w szybie również jest magazynem energii, a jej przepływ w kierunku sieci zasilającej realizowany jest podczas hamowania naczynia wyciągowego. Oczywiście w tym przypadku magazynowanie nie ma uzasadnienia ekonomicznego z uwagi na zbyt małe ilości energii magazynowanej. W magazynie grawitacyjnym silnik i układ przekształtników stanowią interfejs pomiędzy układem mechanicznym i siecią zasilającą, a równocześnie są przetwornikiem energii elektrycznej na mechaniczną podczas podnoszenia masy oraz mechanicznej na elektryczną podczas jej opuszczania. Przepływ energii i oznaczenie sposobu pracy maszyny elektrycznej pokazano na Rys. 15.



Rys. 15. Zasada działania grawitacyjnego magazynu energii

Prace badawcze prowadzone są w kierunku budowy systemu grawitacyjnego magazynu energii o czasie działania powyżej 8 h (ładowanie/rozładowanie). Łącznie system będzie spełniał kilka funkcji:

- magazynowanie energii,
- kompensacja mocy biernej (wykorzystane zostaną np. istniejące prądnice z układu Leonarda oraz statyczne baterie kondensatorów – nadajny system kompensacji mocy biernej),
- stabilizacja częstotliwości,
- reakcja na wahania napięcia oraz zapady napięcia.

Nadrzędny mechanizm sterowania układem będzie odpowiedzialny za prawidłowe działanie całego systemu w zależności od uwarunkowań zewnętrznych (pogoda, ceny energii, potrzeby wynikające z konsumpcji energii itp.).

Elementy górniczych wyciągów szybowych (koła linowe, linopędnie, wieże szybowe itd.) zgodnie z obowiązującymi przepisami są projektowane dla danych parametrów ruchowych, takich jak prędkość czy obciążenie. Aby zrealizować grawitacyjne magazyny energii w analizowanych szybach, konieczne będzie sprawdzenie obliczeniowe wszystkich obecnie używanych elementów górniczych wyciągów szybowych (liny, koła, wieże itp.) pod kątem ich potencjalnego wykorzystania dla zmienionych parametrów ruchowych. Proces projektowania i budowy grawitacyjnego magazynu energii musi zostać ściśle powiązany z harmonogramem likwidacji zakładu górniczego.

W czasie dalszego działania szybów z nowymi funkcjonalnościami potencjalnie do wykorzystania pozostaje dodatkowa działająca obecnie infrastruktura, którą tworzą:

- rozdzielnice średniego napięcia,
- układy zasilania (przekształtniki energoelektroniczne),
- przetwornice układu Leonarda,
- kompensatory statyczne (baterie kondensatorów),
- kable 6 kV (zidentyfikowano wyłożone nowe kable średniego napięcia).

Odpowiadając na potrzeby rynkowe w zakresie przygotowania i prowadzenia przedsięwzięć związanych z transformacją energetyczną, w AGH powstał zespół zajmujący się tą problematyką. Grupa Badawcza Procesów Transformacji Energetycznej Energochłonnych Zakładów Przemysłowych zrzesza osoby o wysokich kwalifikacjach w zakresie nowoczesnych źródeł energii, magazynowania energii, energoelektroniki, napędu elektrycznego, górnictwa, ochrony środowiska, inżynierii mechanicznej, analizy danych, ekonomii i finansów. Jej członkowie prowadzą badania nad możliwością zastosowania nowoczesnych metod pozyskiwania, przetwarzania i magazynowania energii w rejonach poddawanych procesom głębokiej transformacji energetycznej. W pracach grupy badawczej biorą udział pracownicy sześciu jednostek AGH:

- Centrum Energetyki,
- Wydziału Elektrotechniki Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej,
- Wydziału Inżynierii Ładowej i Gospodarki Zasobami,
- Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
- Wydziału Energetyki i Paliw,
- Wydziału Zarządzania.

Grupa korzysta w swoich działaniach z Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej.

7. Badania procesów transportowych w magazynach energii termicznej

W praktycznych zastosowaniach najpoważniejszym problemem źródeł energii odnawialnej – nie wliczając geotermii – jest ich sezonowy i losowy charakter. Wzajemne dopasowanie wydajności źródła energii do również zmiennego zapotrzebowania na nią – to właściwie problem efektywnego magazynowania energii. Jednym z ważnych kierunków prac badawczych rozwijanych w Europie i na świecie są działania mające na celu rozwiązanie problemu magazynowania różnych form energii. Przy coraz

powszechniejszym wykorzystaniu odnawialnych źródeł zagadnienie optymalnego wytwarzania, konwersji i magazynowania energii nabiera istotnego znaczenia. Sposobem na magazynowanie w systemach o względnie dużej gęstości energii oraz eksploatowanych w cyklach dobowych jest zastosowanie materiałów fazowo-zmiennych (*phase change material*, PCM). Natomiast mocno rozwijanym w gospodarce przykładem sezonowego magazynowania energii są podziemne otworowe magazyny energii termicznej (*borehole thermal energy storage*, BTES). Tematyka działań naukowych w tym obszarze jest bardzo istotna, ponieważ zapewnienie właściwego, adekwatnego do potrzeb poziomu dostaw energii jest niezbędnym czynnikiem warunkującym niezależność i prawidłowy rozwój danego kraju.

Główną wadą PCM jest ich niska przewodność cieplna, dlatego często konieczne jest stosowanie technik intensyfikacji wymiany ciepła. Poprawę jego transportu można osiągnąć poprzez zmianę parametrów geometrycznych (np. zwiększenie powierzchni wymiany ciepła), parametrów eksploatacyjnych (np. zwiększenie różnicy temperatur między czynnikiem grzewczym a PCM), zwiększenie efektywnej przewodności cieplnej lub poprzez poprawę jednorodności procesu.

7.1. Metodyka i częściowe cele badań

W ramach prac badawczych opisanych w publikacjach (Wołoszyn et al. 2021) oraz (Wołoszyn et Szopa 2023) wykazano, że głównym ograniczeniem większości badań jest indywidualne podejście do analizy różnych metod intensyfikacji procesu wymiany ciepła. Problem jest jednak bardziej złożony i wymaga podejścia holistycznego. Ze względu na mnogość rozpatrywanych wariantów zdecydowano o przeprowadzeniu badań numerycznych. Układ równań różniczkowych bilansu masy, pędu i energii opisujący transport ciepła w magazynie energii z PCM uzupełniono o model „entalpia-porowatość”, który pozwolił na określenia frontu przemiany fazowej w czasie oraz detaliczne porównanie zaproponowanych konstrukcji magazynu. Do

obliczeń zastosowano metodę objętości skończonych oraz oprogramowania Ansys Fluent z wykorzystaniem superkomputerów ACK-Cyfronet AGH. Porównano przypadki o konstrukcji poziomej, pionowej, helikalnej, helikalnej-stożkowej, helikalnej z żebrami spiralnymi, helikalnej-stożkowej z żebrami spiralnymi, pionowej-stożkowej, helikalnej z prostymi żebrami oraz helikalnej z prostymi żebrami umieszczonymi w dolnej części modułu.

Rzadko poruszany do tej pory w literaturze polskiej i światowej sposób intensyfikacji wymiany ciepła polega na dodaniu przegród i przewodnic we wnętrzu zbiornika. W przeprowadzonych badaniach (Czerwiński et Wołoszyn 2024, Wołoszyn et Czerwiński 2023) stwierdzono, że analiza wpływu położenia przegród na czas topnienia w płaszczowo-rurowym systemie magazynowania energii nie była do tej pory rozpatrywana. Skupiono się zatem na wypełnieniu tej luki badawczej. Głównym celem była analiza wpływu wprowadzenia różnych typów przegród – poziomych, pionowych i diagonalnych – wewnątrz prostokątnego modułu na czas przemiany fazowej, rozkład frakcji ciekłej oraz temperatury. W pracy zaproponowano również nową strukturę z podwójną przegrodą diagonalną jako rozwiązanie o wysokiej efektywności termicznej, mające na celu redukcję czasu topnienia i krzepnięcia w magazynach energii termicznej z wykorzystaniem PCM.

Potwierdzenie tezy, że prostokątne konstrukcje mogą stanowić wartościową alternatywę dla układów cylindrycznych opisano w pracy (Wołoszyn et Szopa 2023). Stwierdzono tam, że badanie kształtów osłon w strukturach typu płaszczowo-rurowych stanowi interesujący kierunek badań w kontekście intensyfikacji wymiany ciepła. Temat ten nie został jednak dotąd szeroko omówiony, a kompleksowe porównanie proponowanych kształtów osłon wciąż pozostaje niewyczerpane. Postanowiono wypełnić tę lukę badawczą. Porównano czasy topnienia i krzepnięcia, frakcję ciekłą, rozkłady temperatury, średni strumień ciepła oraz entalpię właściwą dla różnych kształtów osłon, w tym: kołowych, półkołowych, kwadratowych, prostokątnych, eliptycznych,

trójkątnych, sześciokątnych, ośmiokątnych i trapezowych – każdy w dwóch orientacjach. Przeprowadzono zatem obliczenia dla siedemnastu konfiguracji, zarówno procesu topnienia, jak i krzepnięcia, ponieważ niektóre techniki intensyfikacji wymiany ciepła skracają czas topnienia, ale jednocześnie znacznie wydłużają czas krzepnięcia. Tego typu analiza porównawcza ma również kluczowe znaczenie przy projektowaniu kompaktowych modułowych systemów o wysokiej gęstości energetycznej. Kontynuacją tych prac była analiza poziomej prostokątnej periodycznej płaszczowo-rurowej struktury w ramach badań opisanych w pracy (Wołoszyn et Szopa 2024). Celem działań było uzupełnienie wiedzy w obszarze transportu ciepła z przemianą fazową dla periodycznych struktur typu *shell-and-tube*. Przeprowadzono analizy uwzględniające wymianę ciepła nie tylko pomiędzy rurą zawierającą czynnik grzewczy a materiałem zmiennofazowym (PCM), lecz także pomiędzy sąsiednimi jednostkami. Zaproponowano poziomą periodyczną strukturę płaszczowo-rurową jako wydajną jednostkę magazynowania energii. Uzyskane wyniki obliczeń dla pojedynczej komórki w strukturze periodycznej porównano z wynikami referencyjnych jednostek, dla których przyjęto adiabatyczne warunki wymiany ciepła na powierzchni obudowy. Analiza obejmowała również ocenę wpływu kształtu obudowy prostokątnej (współczynnik wydłużenia) na efektywność procesu wymiany ciepła oraz na czasy topnienia i krzepnięcia.

7.2. Analiza wyników badań

Zastosowanie techniki kombinowanej (Wołoszyn et Szopa 2023, Wołoszyn et al. 2021) uwzględniającej zalety wynikające z rozwiniętej powierzchni wymiany ciepła (tj. spiralne żebra, kształt geometryczny – kształt helisy i stożka oraz odpowiedni iloraz wymiarów) pozwoliło na redukcję czasu topnienia PCM o 76% względem konfiguracji pionowej oraz 66% względem konfiguracji poziomej. Jednocześnie zapewniono redukcję czasu krzepnięcia PCM o 26% względem konfiguracji pionowej oraz 21% względem

konfiguracji poziomej. To bezpośrednio przekłada się na większą moc magazynu podczas ładowania oraz rozładowania. Wyniki badań przedstawione w pracach (Czerwiński et Wołoszyn 2024, Wołoszyn et Czerwiński 2023) potwierdzają, że niezależnie od sposobu ułożenia, dodanie przegród w pojedynczym module magazynu korzystnie wpływa na proces topnienia i krzepnięcia PCM. W odniesieniu do konfiguracji z pojedynczą rurą wymiennika czas topnienia zredukowano o 64%. Dodatkowo dodanie przegrody poziomej i diagonalnej znacząco poprawia jednorodność rozkładu temperatury w module magazynu energii. Na etapie porównania kształtów obudowy (Wołoszyn et Szopa 2023) wykazano, że najkrótszy czas topnienia, a zatem moc magazynowania, osiągnięto dla półokrągłej powłoki w pozycji skierowanej w dół, co stanowi redukcję o 44% w porównaniu do referencyjnego przypadku o kształcie kołowym. Obudowa o kształcie poziomego prostokąta miała natomiast o 30,9% krótszy czas topnienia niż powłoka kołowa i charakteryzowała się największą redukcją czasu topnienia spośród kształtów wielokątnych. Wykazano, że wszystkie powłoki o kształtach wielokątnych mają potencjał do dalszych badań jako systemy wielomodułowe ze względu na ich potencjalnie wyższą gęstość energii. Periodyczna pozioma struktura typu *shell-and-tube* (Wołoszyn et Szopa 2024) okazała się natomiast wydajną jednostką magazynowania energii, charakteryzującą się krótkimi czasami topnienia i krzepnięcia. Dla porównania w przypadku nieperiodycznym, w którym przewodnictwo cieplne w płaszczu zostało pominięte, czasy topnienia i krzepnięcia wzrosły odpowiednio o 213,8% i 21%. Najkrótsze zarejestrowano dla przypadku z periodyczną poziomą strukturą typu *shell-and-tube* oraz współczynnikami kształtu płaszcza wynoszącymi odpowiednio 0,44 i 1.

7.3. Podsumowanie

Przeprowadzone badania, w których skupiono się na nietrywialnych technikach intensyfikacji procesów transportowych w magazynach energii z PCM,

pozwalają nie tylko na poprawę warunków transportu ciepła, ale również na ujednorodnienie tego procesu w całej objętości magazynu. To w konsekwencji redukuje czas przemiany fazowej i jednocześnie zwiększa moc magazynowania. Intensyfikacja lub zmniejszenie skutków konwekcji naturalnej poprzez odpowiednią orientację przegród lub przewodnic to zatem interesujące kierunki badań. Z praktycznego punktu widzenia zastosowanie przegród lub prostokątnych kształtów obudowy jest znacznie mniej problematyczne niż wykorzystanie złożonych struktur w postaci żeber, takich jak np. struktury drzewiaste. Użycie prostokątnej obudowy umożliwia łatwy montaż modułów w większe jednostki, co jest trudne do osiągnięcia w przypadku obudów cylindrycznych. Takie podejście konstrukcyjne stanowi istotny krok naprzód w obszarze projektowania płaszczo-rozpraszających magazynów energii termicznej.

8. Analiza pracy baterijnych systemów magazynowania energii elektrycznej przyłączonych do sieci zasilających – zagadnienia wybrane

Istotnym elementem transformacji energetycznej jest m.in. rozwój rozproszonych, w tym odnawialnych źródeł energii (RZE, OZE). Obserwowany jest ciągły przyrost ich udziału w produkcji energii elektrycznej – w niektórych regionach czy krajach znaczący. Niewątpliwie pozytywnym efektem tego procesu jest dekarbonizacja wynikająca z ograniczenia produkcji z konwencjonalnych źródeł. Jednak coraz częściej dochodzi do sytuacji, w której nadmiar produkcji energii stanowi poważny problem dla lokalnych, a nawet krajowych systemów elektroenergetycznych. Wynika to z braku zapotrzebowania na energię w okresie produkcji i w konsekwencji przekroczenia możliwości przepustowych sieci dystrybucyjnych, a nawet przesyłowych. Taka sytuacja stanowi realne zagrożenie dla stabilnej pracy systemu elektroenergetycznego.

Również stany znaczącego obniżenia generacji, a szczególnie jej braku, są źródłem problemów. Pojawia się istotne wyzwanie, jak pokryć zapotrzebowanie na moc i energię w danej chwili przy braku źródeł wytwórczych. W skrajnych przypadkach stany zbyt dużej lub zbyt małej produkcji mogą doprowadzić do utraty stabilności systemu elektroenergetycznego, co może skutkować poważnymi konsekwencjami technicznymi i ekonomicznymi oraz problemami związanymi z przekroczeniem dopuszczalnych poziomów wskaźników jakości energii elektrycznej, do utrzymania których zobowiązani są operatorzy OSD i OSP. Praca OZE bezpośrednio związana jest z warunkami pogodowymi, które charakteryzują się dużą zmiennością, co skutkuje niepożądanymi fluktuacjami generacji. Ponadto mamy do czynienia z wysokim współczynnikiem jednoczesności produkcji w danym regionie, szczególnie dla instalacji fotowoltaicznych. W celu uniknięcia negatywnych scenariuszy i zachowania poprawnej i stabilnej pracy lokalnego oraz krajowego systemu elektroenergetycznego czasami konieczna jest redukcja generacji z OZE. Określane jest to jako nierynkowe redysponowanie jednostek wytwórczych, skutkujące stratami dla właścicieli OZE i obniżeniem efektów dekarbonizacji (Hanzelka et Fir-lit 2015, Hanzelka et Piątek 2024, „Energetyka Rozproszona”).

Często stosownym w elektroenergetyce sposobem rozwiązywania sygnalizowanych problemów technicznych jest rozbudowa infrastruktury dystrybucyjnej, jednakże jest to proces długotrwały, kosztowny i nie zawsze możliwy do realizacji. Jego rezultaty bywają niesatysfakcjonujące. Alternatywnym wyjściem może być zastosowanie odpowiednio dobranego kondycjonera energii elektrycznej. W niektórych przypadkach konieczne może być równoczesne zastosowanie kilku rozwiązań technicznych.

Na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej w Katedrze Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii funkcjonuje Zespół Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej (JiEUEE, poprzednio Zespół Jakości Energii Elektrycznej). Koordynator

niniejszego artykułu oraz członkowie zespołu od lat prowadzą badania dotyczące analizy warunków zasilania oraz różnych rozwiązań technicznych stosowanych do poprawy jakości dostawy energii elektrycznej (Baggini 2008, Baggini et al. 2021, „Energetyka Rozproszona”, Firlit et al. 2015, 2023a, 2023b, Gmina Ochotnica Dolna 2022, 2025, Hanzelka 2013, Hanzelka et Firlit 2015, Hanzelka et Piątek 2024, Projekt KlastER, Projekt OTE, Serwatka et Firlit 2023, Topolski et al. 2020a, 2020b) uczestniczą m.in. w badaniach i testach bateryjnych systemów magazynowania energii elektrycznej (BSMEE) oraz prowadzą analizy dotyczące sposobu pracy sieci zasilających, do których zostały przyłączone. Prace realizowano m.in. w ramach następujących projektów NCBR.

- OTE – Obserwatorium Transformacji Energetycznej jako instrument wspierania społeczno-gospodarczego rozwoju Polski, program GOSPOSTRATEG IX,
- KlastER – Rozwój energetyki rozproszonej w klastrach energii, program GOSPOSTRATEG I,
- RELflex – Renewable Energy and Load Flexibility in Industry – Generacja rozproszona i elastyczne struktury popytu na energię w przemyśle, ERA. Net Smart Grids Plus (projekt międzynarodowy).

Działania przeprowadzono w rzeczywistych warunkach pracy sieci elektroenergetycznych (*in situ*) oraz w laboratoriach Zespołu JiEUEE na stanowiskach testowych. Nawiązano współpracę z operatorami OSD (TAURON Dystrybucja, ENEA Operator, PGE Dystrybucja), z producentami BSMEE (m.in. APATOR, ZPUE, ELSTA i ELSTA Elektronika, FIDELTRONIK) oraz z wieloma innymi firmami i instytucjami, m.in. Polskim Stowarzyszeniem Magazynowania Energii PSME oraz portalem e-magazyny.pl. Należy podkreślić bardzo dobrą i owocną współpracę z Urzędem Gminy Ochotnica Dolna oraz OSD TAURON Dystrybucja, dzięki której stworzono polowe laboratorium (*in situ*) do badania BSMEE oraz kondycjonerów energii elektrycznej.

8.1. Wybrane badania i testy bateryjnych systemów magazynowania energii elektrycznej (BSMEE)

Na Rys. 16 pokazano zdjęcia badanych i testowanych BSMEE o mocach od 5 kW do 2,1 MW i pojemnościach od 5 kWh do 4,2 MWh. W Tab. 1. zebrano główne informacje dotyczące zakresu wykonanych badań, testów i analiz oraz funkcjonalności BSMEE.

Zespół Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej – AGH, Wydział EAIiB



Rys. 16. Zdjęcia badanych i testowanych BSMEE (moce: od 5 kW do 2,1 MW, pojemności: od 5 kWh do 4,2 MWh)

Tab. 1. Zestawienie głównych informacji dotyczących zakresu wykonanych badań, testów i analiz oraz funkcjonalności BSME

Nr	Badane, testowane i analizowane funkcjonalności BSME	Miejsce działań	Sposób instalacji
1.	poprawa wartości skutecznej napięć: ograniczanie zakresu zmian i symetryzacja, poprawa warunków zasilania odbiorców (klientów) OSD – zob. Rys. 17, Rys. 18.	połowe laboratorium (prace <i>in situ</i>) w Ochotnicy Dolnej, APATOR 50 kW, 138 kWh, ZPUE 50 kW, 180 kWh, ELSTA i ELSTA ELEKTRONIKA 50 kW, 120 kWh, FIDELTRONIK 2×30 kW, 2×60 kWh	instalacja przedlicznikowa, po stronie OSD
2.	przejście do pracy wyspowej (<i>off-grid</i>) i prowadzenie systemu – wzorzec napięcia i częstotliwości (praca autonomiczna) – zob. Rys. 18.	PGE GPZ Rzepedź (prace <i>in situ</i>) 2,1 MW, 4,2 MWh, 15 kV Gryfin Group Energy Powerpack Tesla	instalacja przedlicznikowa, po stronie OSD
3.	zastosowanie na rzecz prosumenta: poprawa bilansu energetycznego, <i>on-grid</i> , <i>off-grid</i>	Miasteczko Studenckie AGH (FIDELTRONIK, 20 kW, 24 kWh – dwie instalacje) Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej AGH (FIDELTRONIK 10 kW, 10 kWh, BYD 5 kW, 5 kWh)	instalacja zalicznikowa, odbiorca, prosument
4.	współpraca z mikrosiecią: <i>on-grid</i> , <i>off-grid</i> , poprawa bilansu energetycznego – zob. Rys. 20, Rys. 21, Rys. 22	Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej w AGH – projekt RELflex (BYD, FIDELTRONIK, FONALION IMPACT – sumarycznie: 45 kW, 40 kWh)	instalacja zalicznikowa, odbiorca przemysłowy
5.	współpraca z siecią trakcyjną prądu stałego – pętla tramwajowa: ograniczenie zakresu zmienności napięcia, odzysk energii w trakcie hamowania tramwajów – rekuperacja, wsparcie sieci, np. w trakcie ruszania tramwaju	w ramach studiów podyplomowych Rozproszone źródła i magazyny energii – klastry energii (Tramwaje Śląskie – Zabrze Biskupice, My-SOFT/ Elektrotim, 660 V _{DC} , 0,6/1,2 MW, 345 kWh)	instalacja zalicznikowa, odbiorca przemysłowy

8.2. Analiza wybranych przypadków

Charakter artykułu nie pozwala na szczegółowe omówienie każdego z badanych i analizowanych przypadków zastosowania BSME, tym bardziej że testy trwały od kilku tygodni do kilku miesięcy. W dalszej części zamieszczono podstawowe informacje oraz przedstawiono wybrane pomiary i rejestracje dla trzech przypadków – Tab. 1, pozycje/wiersze nr 1, 2 i 3. Do długoterminowych pomiarów i rejestracji wykorzystano analizatory jakości energii elektrycznej (klasy A wg normy PN-EN 61000-4-30).

Na Rys. 17 pokazano wartości skuteczne napięć i prądów dla okresu włączenia i wyłączenia BSME. W tym przypadku BSME został przyłączony do wiejskiej sieci dystrybucyjnej ze znaczącą liczbą fotowoltaicznych instalacji prosumenckich. Sterowanie i zarządzanie zostało tak skonfigurowane, aby system magazynowania pełnił funkcję kondycjonera napięcia zasilającego (Tab. 1, nr 1). Praca BSME umożliwia ograniczenie zakresu zmian (stabilizację) oraz symetryzację napięć, a więc poprawę warunków zasilania

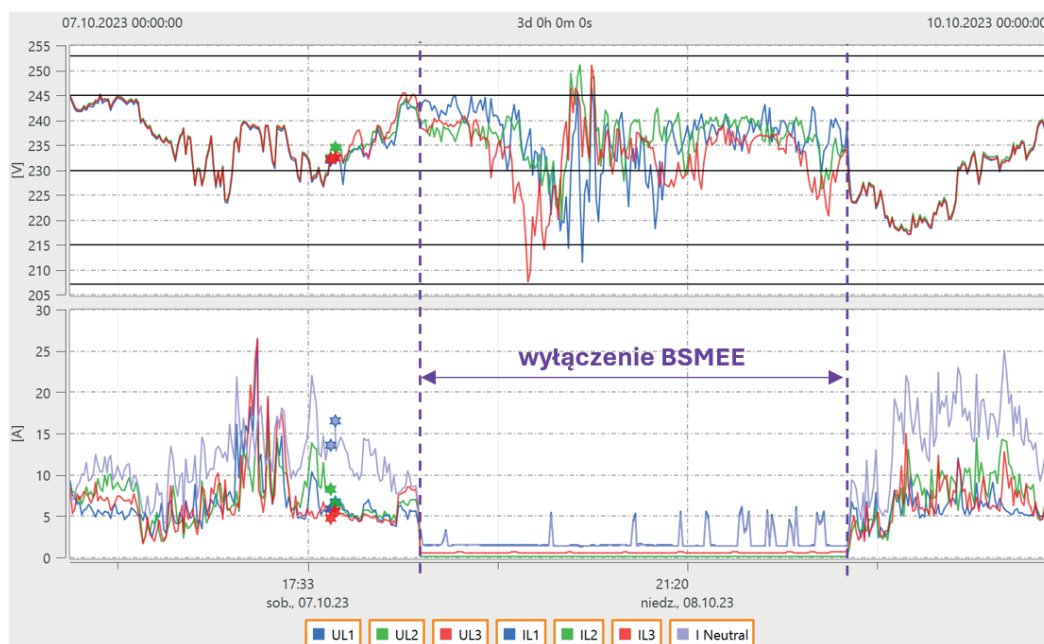
odbiorców. Według rozporządzenia systemowego wartość skuteczna napięcia powinna mieścić się w przedziale 207–253 V (Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r.). Szczegółowszą analizę przedstawiono w publikacji (Firlit et al. 2023).

Na Rys. 18 pokazano wpływ BSME na asymetrię napięć zasilających dla tego samego okresu jak na Rys. 17. Wartości współczynników asymetrii napięcia K_{2u} (dla składowej przeciwnej) i K_{0u} (dla składowej zerowej) w okresie wyłączenia wzrastają w znaczący sposób, osiągając poziomy powyżej 3,0% i 7,0%. W rozporządzeniu systemowym wartość graniczna dla K_{2u} określona została na poziomie 2,0% (Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r.).

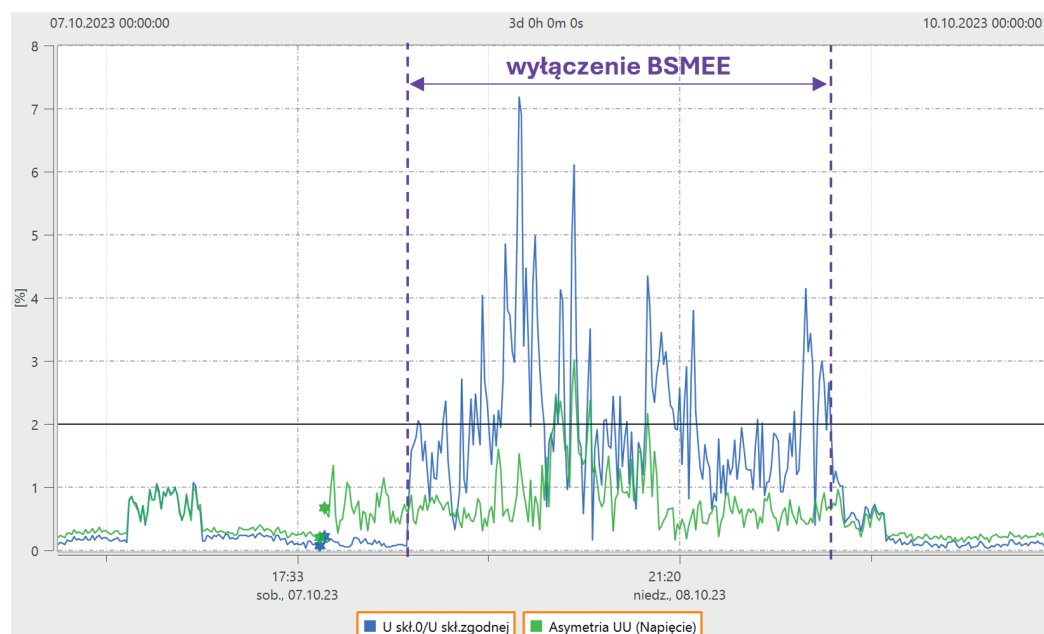
Na Rys. 19 pokazano proces przejścia BSME do pracy wyspowej (*off-grid*) i powrót do zasilania w trybie *on-grid*. W tym przypadku system magazynowania został przyłączony w GPZ do 15 kV (Tab. 1, nr 2). Celem instalacji było przesunięcie w czasie nakładów inwestycyjnych na budowę linii 110 kV oraz poprawa pewności i ciągłości zasilania dla obszaru

ok. 4000 km² z ok. 86 tys. mieszkańców. Rys. 19a zawiera przebiegi wartości skutecznych napięcia U_{12} , całkowitą moc czynną P_{total} i bierną QV_{total} (dla 50 Hz), jakie związane są z pracą całego systemu. W trybie *off-grid* BSME jest wzorcem napięcia i częstotliwości i autonomicznie prowadzi system elektroenergetyczny, zasilając odbiorców od napięcia średniego 15 kV do niskiego 400/230 V (Serwatka et

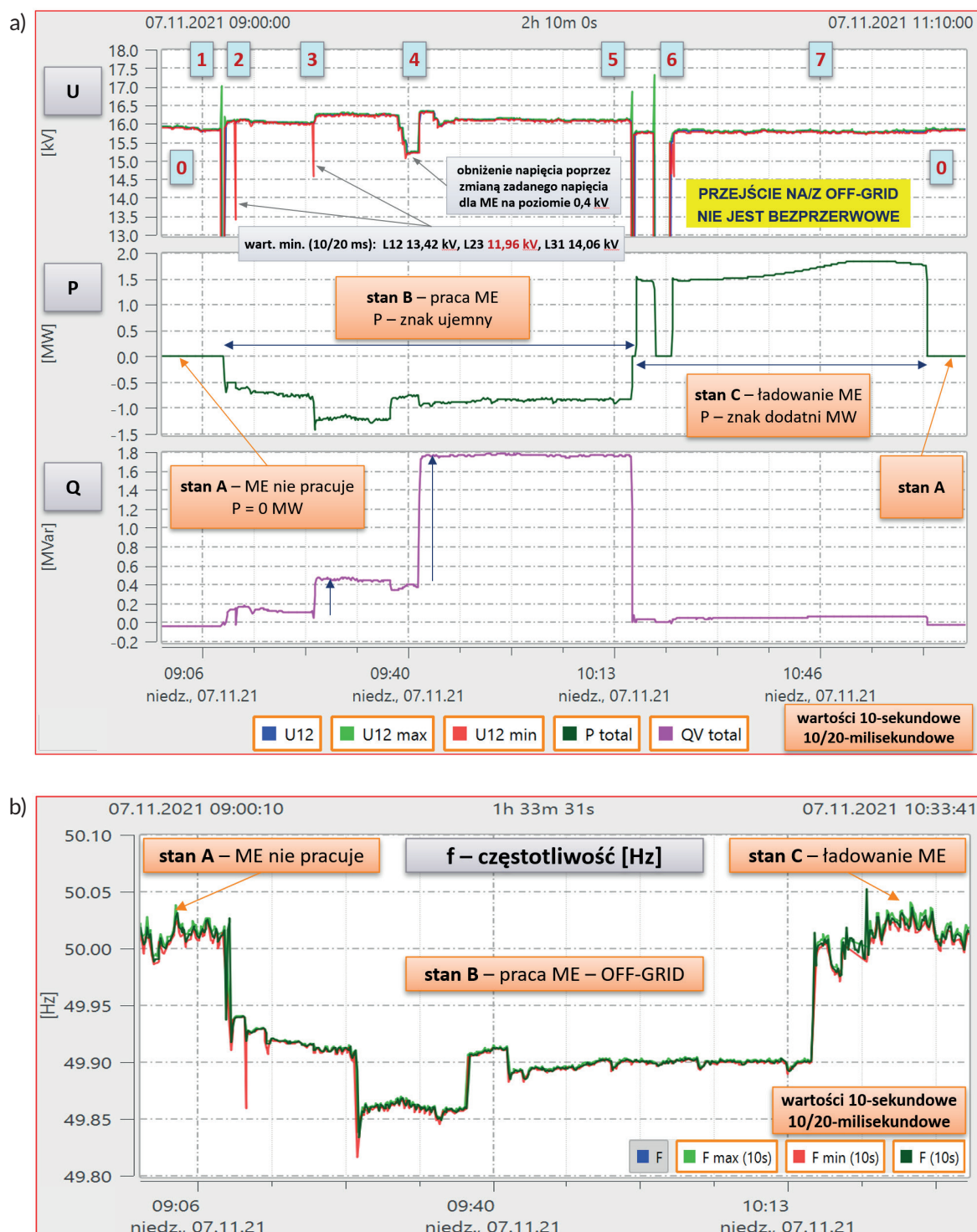
Firlit 2023). Rys. 19b przedstawia przebieg wartości częstotliwości dla trybów *on-grid* i *off-grid*. Zarejestrowano obniżenie wartości częstotliwości w trybie pracy wyspowej 49,80–49,94 Hz, jednakże BSME utrzymał częstotliwość w dopuszczalnym zakresie zmian 49,50–50,50 Hz zgodnie z rozporządzeniem (Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r.).



Rys. 17. Przebiegi napięć i prądów, wartości skuteczne 10-minutowe, dla stanu włączenia i wyłączenia BSME – Tab. 1, nr 1



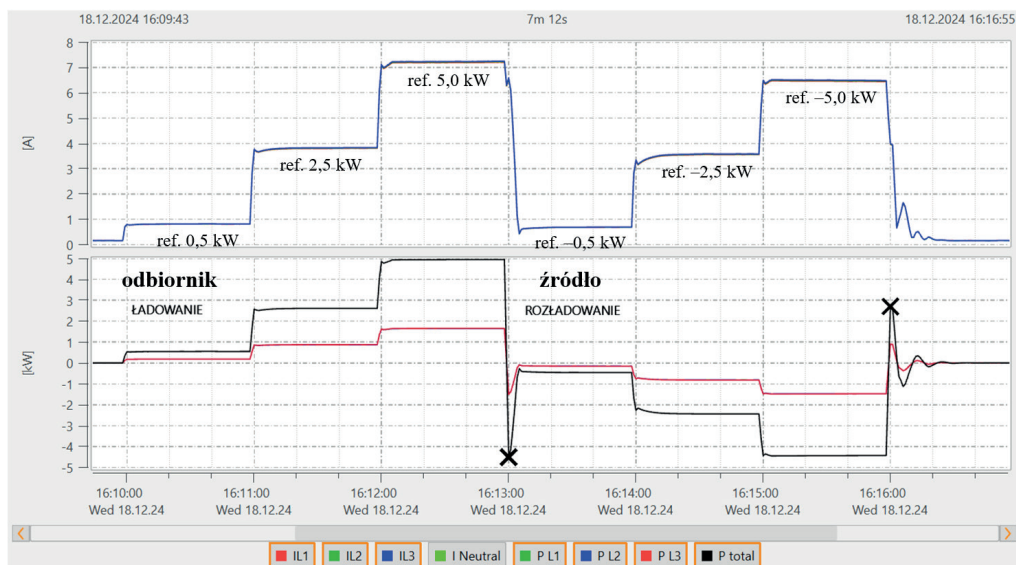
Rys. 18. Przebiegi współczynników asymetrii napięcia K_{2u} (linia zielona) i K_{0u} (linia niebieska) dla stanu włączenia i wyłączenia BSME (Rys. 17, Tab. 1, nr 1) – wartości 10-minutowe



Rys. 19. Proces przejścia BSME (GPZ 15 kV, Tab. 1, nr 2) do pracy wyspowej (*off-grid*) i powrót do zasilania w trybie sieciowym (*on-grid*): a) napięcie międzyfazowe U_{12} , całkowita moc czynna P_{total} i bierna QV_{total} (dla 50 Hz); b) częstotliwość f

Kolejny przypadek dotyczy prosumenckiej instalacji PV z hybrydowym przekształtnikiem oraz BSME (5 kW, 5 kWh) – Tab. 1, nr 3. Na Rys. 20 pokazano przebiegi prądów i mocy czynnej zarejestrowane dla

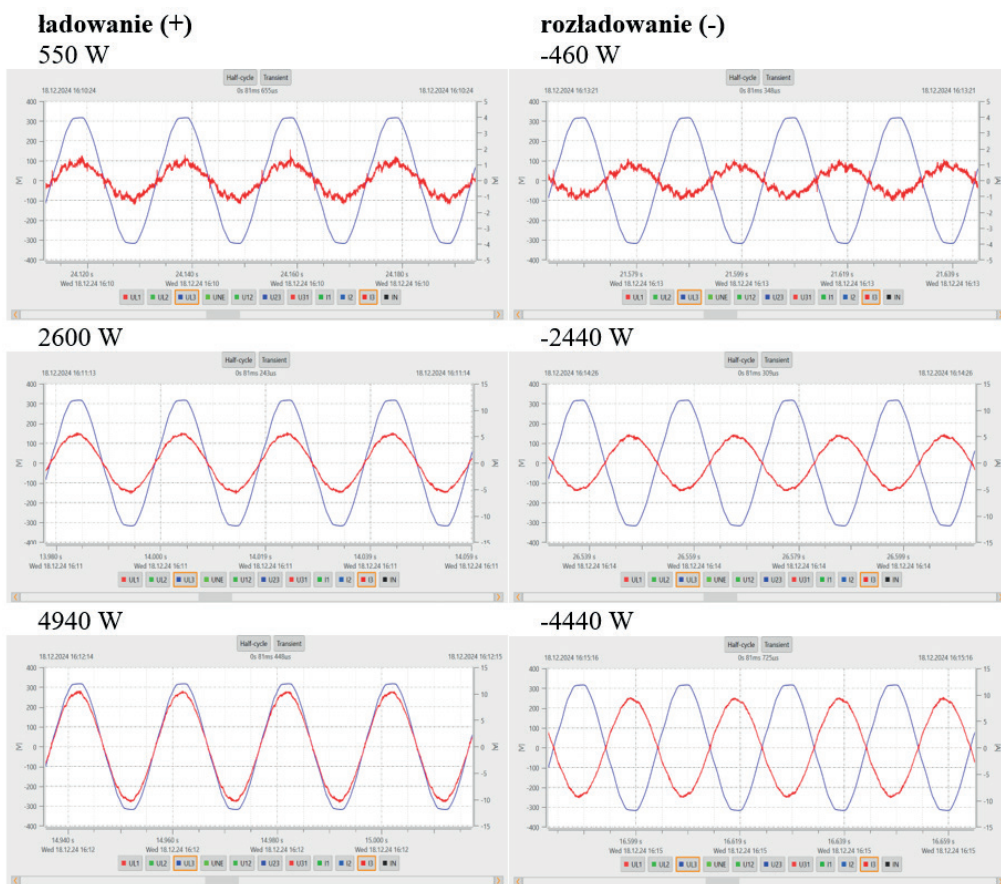
sześciu zadanych (referencyjnych) poziomów ładowania i rozładowania – tryb pracy *on-grid*. W pierwszej fazie testu BSME pracuje jako odbiornik, a w drugiej jako źródło energii elektrycznej.



Rys. 20. Przebiegi prądów i mocy czynnej zarejestrowane dla sześciu zadanych (referencyjnych) poziomów ładowania i rozładowania w prosumenckiej instalacji PV z BSME 5 kW, 5 kWh – Tab. 1, nr 3

Przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów, które odpowiadają poziomom ładowania i rozładowania z Rys. 20, zaprezentowano na Rys. 21. Warto podkreślić, że kształty przebiegów prądów są zbliżone do

przebiegu sinusoidalnego, zatem mają niski poziom odkształcenia (dla najniższych wartości ulegają pogorszeniu, ale jest to typowe ze względu na niekorzystny punkt pracy).

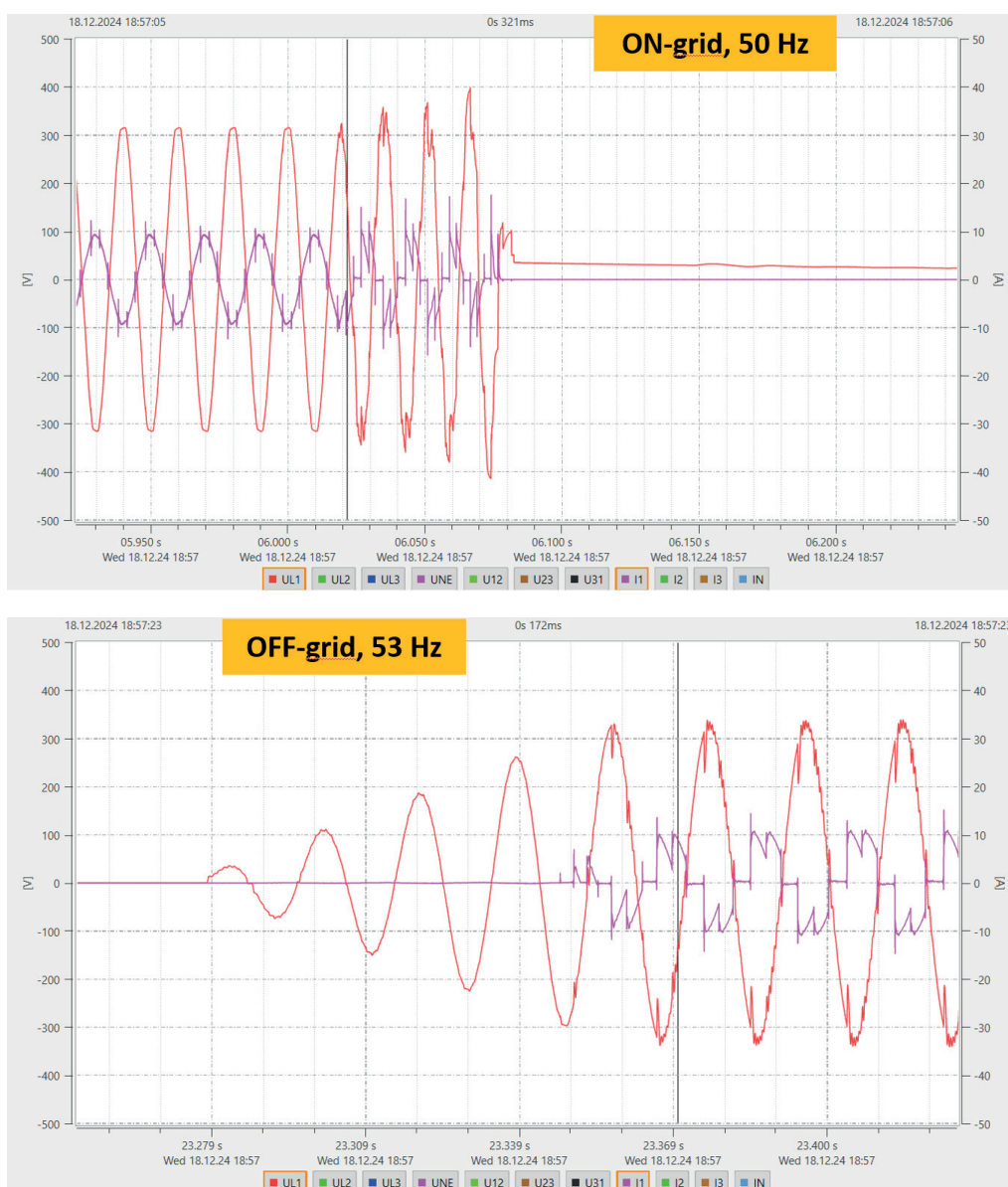


Rys. 21. Przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów odpowiadające poziomom ładowania i rozładowania z Rys. 20

Na Rys. 22 pokazano przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów w prosumenckiej instalacji PV z BSMEE (Tab. 1, nr 3) w trakcie stanu przejścia z pracy *on-grid* (zasilanie z sieci OSD) na *off-grid* (praca wyspowa), pod obciążeniem. W tym przypadku proces przełączenia nie jest bezprzerwowo, przełączenie trwa ok. 19 sekund. W trakcie pracy wyspowej hybrydowy przekształtnik fotowoltaiczny celowo utrzymuje częstotliwość napięcia zasilającego 53 Hz, aby odróżnić ten stan od trybu *on-grid* z 50 Hz. Można zaobserwować, że nieliniowy

odbiornik zaburza przebieg napięcia zasilającego w trybie *off-grid*; dzieje się tak, ponieważ pracujemy w warunkach tzw. słabej sieci, czyli niskiej mocy zwarciowej.

Materiał zgromadzony przez Zespół JiEUEE pozwala na zdecydowanie obszerniejszą i szczegółowszą analizę pracy testowanych BSMEE. Prace naukowo-badawcze są dalej kontynuowane, m.in. w ramach projektu OTE (Projekt OTE) oraz we współpracy z producentami (Gmina Ochotnica Dolna 2025) i podmiotami zainteresowanymi zakupieniem.



Rys. 22. Przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów – z jednej fazy, w prosumenckiej instalacji PV z BSMEE w trakcie stanu przejścia z pracy *on-grid* (zasilanie z sieci OSD) na *off-grid* (praca wyspowa)

8.3. Podsumowanie

Tematyka właściwego stosowania i efektywnego użytkowania bateryjnych systemów magazynowania energii elektrycznej (BSMEE) w różnych systemach zasilania jest bieżącym i istotnym wyzwaniem. BSMEE z technicznego i technologicznego punktu widzenia są bardzo ciekawymi urządzeniami, które w połączeniu z odpowiednim systemem sterowania i zarządzania oferują szereg funkcjonalności dla użytkownika. Między innymi z tego powodu Zespół Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej AGH podjął różnego rodzaju prace naukowo-badawcze i eksperymentalno-rozwojowe związane z BSMEE. Zostały one zrealizowane w ramach projektów NCBR (OTE, KlastER, RELflex) oraz we współpracy z operatorami OSD, producentami BSMEE oraz z wieloma innymi firmami i instytucjami. W czerwcu 2024 r. Urząd Regulacji Energetyki opublikował pierwszy raport poświęcony magazynowaniu energii elektrycznej (Raport URE 2024). W dokumencie stwierdzono, że budowa magazynów stanowi istotny element transformacji energetycznej. Określono poniższe potencjalne funkcje magazynów energii elektrycznej:

- ograniczanie czasu przerw w dostawie energii elektrycznej,
- poprawa parametrów jakości dostarczanej energii,
- pozytywny wpływ na współpracę sieci dystrybucyjnej z lokalnymi OZE,
- alternatywa dla droższych i bardziej czasochłonnych inwestycji w rozbudowę klasycznych linii i stacji elektroenergetycznych.

Przedstawiona lista stanowi potwierdzenie zasadności podjętych prac naukowo-badawczych i eksperymentalno-rozwojowych. Warto podkreślić, że BSMEE mogą przyczynić się istotnie do podniesienia elastyczności pracy systemu elektroenergetycznego w skali mikro i makro (Firlit et al. 2023). Stanowią niezbędny element mikrosieci przemysłowych i lokalnych (na poziomie osiedli, wsi i gmin). Ich budowa pozwala

na autonomizację fragmentów sieci elektroenergetycznych. Tematyka staje się istotnym zagadnieniem w kontekście bezpieczeństwa energetycznego kraju, napotyka jednak na wyzwania techniczne, organizacyjne i ekonomiczne. Niestety cena BSMEE jest wysoka, dlatego trwa poszukiwanie odpowiednich modeli biznesowych i ekonomicznych uzasadniających ich stosowanie.

9. Podziemne

magazynowanie ciepła i energii z wykorzystaniem otworów wiertniczych

Przykładem podziemnego sezonowego systemu magazynowania ciepła, który może być stosowany zarówno w małych, jak i dużych instalacjach, jest system BTES (*borehole thermal energy storage*). Technologia ta sprawdza się szczególnie dobrze w miejscach, gdzie występują znaczne różnice temperatur pomiędzy latem a zimą. Polskie warunki klimatyczne sprzyjają efektywnemu i opłacalnemu wykorzystaniu tego typu magazynów energii.

Tworzenie systemu BTES wymaga holistycznego podejścia, które obejmuje analizę warunków geologicznych, ocenę sprawności energetycznej, spełnienie wymagań technicznych oraz uwzględnienie aspektów środowiskowych. Odpowiednio zaplanowany i zrealizowany system może stanowić skuteczną metodę sezonowego magazynowania ciepła, zwłaszcza gdy współpracuje z odnawialnymi źródłami energii. Szczegółowsze informacje dotyczące przedstawionej w rozdziale tematyki można znaleźć w publikacjach (Sapińska-Śliwa et al. 2016, 2019, 2020, Śliwa et Gonet 2005, Śliwa et Kotyza 2003, Śliwa et Rosen 2015, 2017, Śliwa et al. 2012, 2014, 2016, 2018, 2019, 2021a, 2021b, 2021c, 2022, 2024, 2025).

Otworowe podziemne magazyny ciepła to rozwiązania umożliwiające gromadzenie energii cieplnej w głębszych warstwach ziemi poprzez wykorzystanie

właściwości termicznych skał. Systemy te działają poprzez akumulowanie nadmiaru ciepła – najczęściej pochodzącego z okresu letniego – w strukturach geologicznych, z których energia jest następnie odzyskiwana w chłodniejszych miesiącach, gdy zapotrzebowanie na ogrzewanie rośnie. Magazynowanie może odbywać się zarówno w sposób jawny (*sensu stricto*), jak i utajony (z wykorzystaniem przemian fazowych).

System BTES składa się z zestawu pionowych odwiertów o głębokości od kilkudziesięciu do kilkuset metrów. W tych otworach umieszczane są rury, przez które krąży czynnik grzewczy – najczęściej wodny roztwór glikolu lub woda – przekazując ciepło do otaczającego górotworu lub odbierając je w celu późniejszego wykorzystania. Coraz częściej stosuje się rozwiązania z odwiertami ukośnymi (GRD – *geothermal radial drilling*), a nawet poziomymi, wykorzystując technologię przewiertów sterowanych (HDD – *horizontal directional drilling*) znaną z geoinżynierii.

Źródła energii dostarczanej do magazynu mogą być różnicowane – od kolektorów słonecznych, przez nadmiar ciepła z procesów przemysłowych, chłodzenia (np. serwerowni), aż po pompy ciepła i odpadowe źródła ciepła. W okresach niższego zapotrzebowania na ogrzewanie energia cieplna jest akumulowana w górotworze – poprzez jego ogrzewanie (magazynowanie jawne, związane ze wzrostem temperatury) lub przemiany fazowe materiałów (magazynowanie utajone, bez zmiany temperatury).

W sezonie grzewczym zgromadzone wcześniej w górotworze ciepło jest odzyskiwane za pomocą tego samego układu rur zainstalowanych w odwiertach i przekazywane do systemów grzewczych budynków. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie zużycia tradycyjnych, zewnętrznych źródeł energii. Skały tworzące górotwór charakteryzują się wysoką zdolnością do długotrwałego magazynowania ciepła, co pozwala na efektywne wykorzystanie energii nawet po kilku miesiącach – na przykład wtedy, gdy została zgromadzona latem, a potrzebna jest zimą.

Systemy BTES pozwalają na efektywne zagospodarowanie nadwyżek ciepła, co prowadzi do ograniczenia zużycia paliw kopalnych i innych konwencjonalnych źródeł energii w sezonie grzewczym. Tego typu rozwiązania są przyjazne dla środowiska, zwłaszcza gdy współpracują z odnawialnymi źródłami energii, takimi jak instalacje solarne, ciepło odpadowe czy energia pochodząca z procesów chłodzenia. Magazynowanie ciepła na miejscu pozwala również uniezależnić się częściowo od zewnętrznych dostawców energii, a w porównaniu z paliwami kopalnymi znacząco zmniejsza emisję szkodliwych substancji do atmosfery.

Wdrożenie systemu BTES wiąże się jednak z relatywnie wysokimi kosztami początkowymi, głównie ze względu na konieczność wykonania głębokich odwiertów (nawet do kilkuset metrów) oraz instalację sieci rur pełniących funkcję wymienników ciepła. Ponadto projektowanie i realizacja takiego systemu muszą być ściśle dostosowane do lokalnych warunków geologicznych, co w niektórych miejscach może stanowić wyzwanie zarówno techniczne, jak i logistyczne.

Projektowanie otworowych podziemnych magazynów ciepła (BTES) wymaga starannego uwzględnienia szeregu aspektów technicznych i środowiskowych, aby zapewnić ich wysoką efektywność energetyczną, minimalny wpływ na środowisko, opłacalność inwestycji, niezawodność działania oraz długoterminową trwałość systemu.

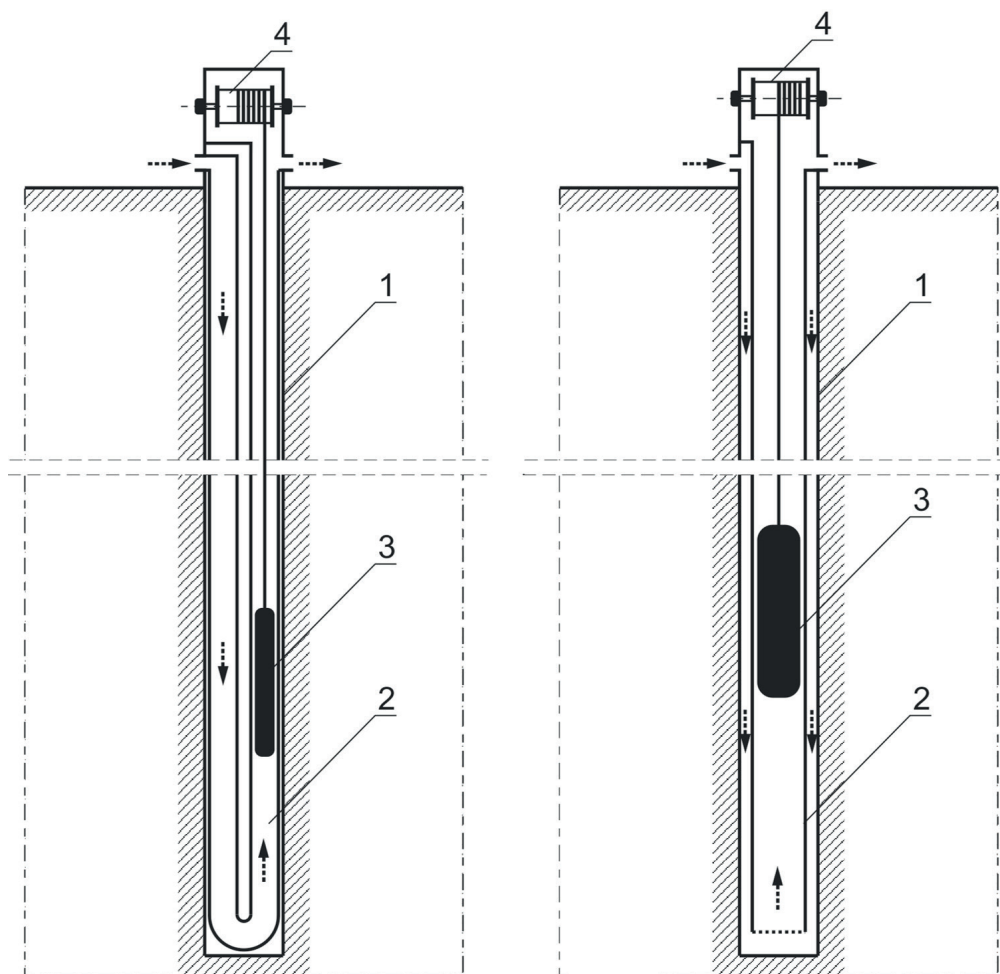
Drugą grupę instalacji do podziemnego magazynowania ciepła (UTES – *underground thermal energy storages*) stanowią układy zaliczane do ATES (*aquifer thermal energy storages*). Ich działanie magazynowe polega na właczaniu do warstwy (lub warstw) wodonośnej wody o podwyższonej temperaturze przy magazynowaniu ciepła lub o temperaturze obniżonej (wody lodowej) przy magazynowaniu chłodu. Tego typu systemy wymagają najczęściej jednego otworu produkującego wodę i jednego otworu iniekcyjnego. Instalacja taka nazywana jest dubletem studni lub otworów. Dublet studni działa w AGH w Krakowie od 2023 roku.

Magazynowanie energii (najczęściej nadmiarowej) może być realizowane w otworowych grawitacyjnych magazynach energii (OGME lub BGES – *borehole gravity energy storages*). Instalacja wykorzystuje pionowy otwór wiertniczy, w którym istnieje możliwość przemieszczania się obciążnika. Jego podnoszenie kosztem dostarczonej energii (np. elektrycznej z kolektorów fotowoltaicznych) odpowiada ładowaniu magazynu. Wzrasta energia potencjalna obciążnika, osiągając pełny stan naładowania, gdy obciążnik znajdzie się przy powierzchni terenu. Proces jego opuszczania jest równoznaczny z przekazywaniem energii potencjalnej w celu jej zamiany, np. na energię elektryczną, która nocą może zasilać np. oświetlenie miejskie lub dom jednorodzinny.

Możliwe jest połączenie funkcji BTES i BGES. Na Rys. 23 (lewy) pokazany jest przypadek, w którym

cyrkulacja nośnika ciepła odbywa się w U-rurce. W jednym ramieniu U-rurki (np. o większej średnicy) może poruszać się obciążnik, którego zadaniem jest magazynowanie energii potencjalnej. Na Rys. 23 (prawy) przedstawiono konstrukcję centralną otworowego wymiennika ciepła. Układ cyrkulacyjny tworzy obudowa otworu oraz rura wewnętrzna (najlepiej o niskiej przewodności cieplnej). W tej wewnętrznej kolumnie rur również może odbywać się ruch obciążnika służący magazynowaniu energii, niezależnie od pobierania lub wprowadzania ciepła do górotworu.

Jeszcze innym sposobem wykorzystania otworów (najlepiej wyeksploatowanych otworów z gazem ziemnym) są otworowe ciśnieniowe magazyny energii (OCME lub BCES – *borehole compressed air energy storages*).



Rys. 23. Otworowy wymiennik ciepła z opcją grawitacyjnego magazynowania energii: 1 – otwór wiertniczy, 2 – rury cyrkulacyjne nośnika ciepła, 3 – obciążnik, 4 – wciągarka

Bibliografia:

- Baggini A. (red.) (2008), *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Baggini A., Hanzelka Z., Firlit A., Moskwa S., Rodziejewicz T. (2021): *Handbook of Electrical Power Reliability: Selected Issues*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Barpanda P., Oyama G., Nishimura S., Chung SC, Yamada A. (2014), A 3.8-V Earth-Abundant Sodium Battery Electrode, „Nature Communications” 5: 4358.
- Budziak A., Szafranec J. (2023a), Influence of Hydrogen on Structural and Magnetic Transformations in RMn₂Hx Hydrides with Laves Phase C15 and C14 Structures – A Review, „Energies” 16 (21): 7383.
- Budziak A., Szafranec J. (2023b), Structural and Magnetic Transformations in RMn₂Hx Hydrides (R: Selected Rare Earth Elements), [w:] W. Wang, X. Li (red.), *Advances in Energy Research: 4th Edition*, Vide Leaf, Hyderabad: 1–44.
- Chen L., Zheng T., Mei S., Xue X., Liu B., Lu Q. (2016), Review and Prospect of Compressed Air Energy Storage System, „Journal of Modern Power Systems and Clean Energy” 4: 529–541.
- Czerwiński G., Wołoszyn J. (2024), Partitions Influence on Rectangular Latent Heat Thermal Energy Storage Unit Performance During Melting and Solidification, „International Communications in Heat and Mass Transfer” 159: 1–17.
- „Energetyka Rozproszona” – strona internetowa czasopisma naukowego, <https://www.energetyka-rozproszona.pl> [dostęp: 29.06.2025].
- Firlit A., Hanzelka Z., Chmielowiec K. et al. (2015), *Opracowanie wirtualnego hybrydowego źródła energii elektrycznej złożonego z rozproszonych i odnawialnych źródeł z zastosowaniem systemu ciągłego monitorowania jakości energii elektrycznej*, VI konferencja Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce, 9–10.06.2015 Białka Tatrzańska.
- Firlit A., Piątek K., Hanzelka Z., Szaniawski K., Piasecki S., Topolski Ł. (2023a), Analiza pracy sieci zasilającej OSD po uruchomieniu magazynu energii elektrycznej w Ochothnicy Dolnej, <https://www.energetyka-rozproszona.pl/artykuly/analiza-pracy-sieci-zasilajacej-osd-po-uruchomieniu-magazynu-energii-elektrycznej-firmy-aporator-w-ochothnicy-dolnej/> [dostęp: 29.06.2025].
- Firlit A., Hołdyński G., Skibko Z. (2023b), *Elastyczność energetyczna: raport specjalistyczny*, <https://www.elastycznoscenergii.pl> [dostęp: 29.06.2025].
- Gmina Ochothnica Dolna (2022), *Przemysłowy magazyn energii elektrycznej w Ochothnicy*, www.ochothnica.pl/aktualnosci/przemyslowe-magazyn-energii-elektrycznej-w-ochothnicy/ [dostęp: 29.06.2025].
- Gmina Ochothnica Dolna (2025), *Fideltronik Energy i AGH testują magazyn energii w Ochothnicy Dolnej*, www.ochothnica.pl/aktualnosci/fideltronik-energy-i-agh-testuja-magazyn-energii-w-ochothnicy-dolnej/ [dostęp: 29.06.2025].
- Gozdur W., Gąsior W., Zrobek M., Budziak A., Dębski R., Gierlotka W., Pęska M., Polański M., Dębski A. (2024), *Calorimetric Studies and Thermodynamic Modeling of Ag–Mg–Ti Liquid Alloys*, „Materials” 17 (8): 1–15.
- Gruzeł G., Szmuc K., Drzymała E., Piekarczyk P., Pajor-Świerzy A., Budziak A., Pastor E. (2022), Thin Layer Vs. Nanoparticles: Effect of SnO₂ Addition to PtRhNi Nanoframes for Ethanol Oxidation Reaction, „International Journal of Hydrogen Energy” 47 (33): 14823–14835.
- Hanzelka Z. (2013), *Jakość dostawy energii elektrycznej – zaburzenia wartości skutecznej napięcia*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Hanzelka Z., Firlit A. (red.) (2015), *Elektrownie ze źródłami odnawialnymi – zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Hanzelka Z., Piątek K. (red.) (2024), *Instalacje fotowoltaiczne w systemie elektroenergetycznym*, PWN, Warszawa.
- Jakość energii elektrycznej, oferta studiów podyplomowych, <https://www.podyplomowe.agh.edu.pl/oferta-studiow-podyplomowych/jakosc-energii-elektrycznej/> [dostęp: 29.06.2025].
- Kulka A., Walczak K., Płotek J., Fu B., Arifiadi A., Świerczek K., Hanc A., Kasprzyk M., Ul Haq M.I., Lee G.H., Yang W., Winter M., Kasnatscheew J., Kostecki R. (2025), Evaluating the Influence of Surface Reconstruction Layers in Li/Mn-Rich Layered Oxide (LMR) Electrodes on the Anionic Redox Reactions and Electrochemical Properties of LMR || Li Cells, „Energy Storage Materials” 75: 104001.
- Leszczyński J., Gryboś D., Markowski J. (2023), Analysis of Optimal Expansion Dynamics in a Reciprocating Drive for a Micro-CAES Production System, „Applied Energy” 350: 121742.
- Nishimura S.I., Suzuki Y., Lu J., Torii A., Kamiyama T., Yamada A. (2016), High-Temperature Neutron and X-ray Diffraction Study of Fast Sodium Transport in Alluaudite-type Sodium Iron Sulfate, „Chemistry of Materials” 28: 2393–2399.
- Nowak M., Walczak K., Milewska A., Płotek J., Budziak A., Molenda J. (2023), Electrochemical Performance of Different High-Entropy Cathode Materials for Na-Ion Batteries, „Journal of Alloys and Compounds” 968: 1–8.
- Oyama G., Nishimura S., Suzuki Y., Okubo M., Yamada A. (2015), Off-Stoichiometry in Alluaudite-Type Sodium Iron Sulfate Na_{2+2x}Fe_{2-x}(SO₄)₃ as an Advanced Sodium Battery Cathode Material, „ChemElectroChem” 2: 1019–1023.
- Oyama G., Pecher O., Griffith K.J., Nishimura S., Pigliapochi R., Grey C., Yamada A. (2016), Sodium Intercalation Mechanism of 3.8 V Class Alluaudite Sodium Iron Sulfate, „Chemistry of Materials” 28: 5321–5328.
- Projekt KlastER, <https://www.er.agh.edu.pl> [dostęp: 29.06.2025].
- Projekt OTE, <https://www.energetyka-rozproszona.pl/obserwatorium-transformacji-energetycznej/> [dostęp: 29.06.2025].
- Raport URE (2024), *Magazynowanie Energii Elektrycznej*, <https://www.ure.gov.pl/pl/urzed/informacje-ogolne/edukacja-i-komunikacja/publikacje/magazynowanie-energii-elektrycznej/12061Magazynowanie-Energii-Elektrycznej.html> [dostęp: 29.06.2025].
- Redel K., Kulka A., Walczak K., Plewa A., Borca C.N., Molenda J. (2020), The Impact of Oxygen Evolution and Cation Migration on the Cycling Stability of a Li-rich Li[Li_{0.2}Mn_{0.6}Ni_{0.1}Co_{0.1}]O₂ Positive Electrode, „Journal of Materials Chemistry A” 35 (8): 18143–18153.
- Redel K., Kulka A., Walczak K., Plewa A., Hanc E., Marzec M., Lu L., Molenda J. (2021), Origin of Extra Capacity in Advanced Li-Rich Cathode Materials for Rechargeable Li-Ion Batteries, „Chemical Engineering Journal” 424: 1–12.
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2023 poz. 819).
- Rozproszone źródła i magazyny energii – klastry energii, oferta studiów podyplomowych, <https://www.podyplomowe.agh.edu.pl/oferta-studiow-podyplomowych/rozproszone-zrodla-i-magazyny-energii-klustry-energii/> [dostęp: 29.06.2025].
- Rufer A. (2017), *Energy Storage: Systems and Components*, CRC 40 Press, Boca Raton.
- Saadat M., Shirazi F.A., Li P.Y. (2015), Modeling and Control of an Open Accumulator Compressed Air Energy Storage (Caes) System for Wind Turbines, „Applied Energy” 137: 603–616.
- Sapińska-Śliwa A., Rosen M. A., Gonet A., Kowalczyk J., Śliwa T. (2019), A New Method Based on Thermal Response Tests for Determining Effective Thermal Conductivity and Borehole Resistivity for Borehole Heat Exchangers, „Energies” 12 (6): 1–22.
- Sapińska-Śliwa A., Rosen M. A., Gonet A., Śliwa T. (2016), Deep Borehole Heat Exchangers – A Conceptual and Comparative Review, „International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration” 24 (1): 1–15.
- Sapińska-Śliwa A., Śliwa T., Twardowski K., Szymiski K., Gonet A., Żuk P. (2020), Method of Averaging the Effective Thermal Conductivity Based on Thermal Response Tests of Borehole Heat Exchangers, „Energies” 13 (14): 1–20.
- Serwatka S., Firlit A. (2023), *System magazynowania energii elektrycznej w GPZ Rzepedź – 2,1 MW, 4,2 MWh, 15 kV*, prezentacja on-line w ramach seminarium projektu KlastER, <https://www.energetyka-rozproszona.pl/wydarzenia/seminarium-18-magazyny-energii-elektrycznej-w-sieciach-dystrybucyjnych/> [dostęp: 29.06.2025].

- Siostrzonek T. (2023), *The Mine Shaft Energy Storage System – Implementation Threats and Opportunities*, „Energies” 16: 5615.
- Siostrzonek T., Pytel J., Karpel T. (2025), *The Technical and Economic Aspects of Using DC or AC Motors in the Drive of Hoisting Machines*, „Energies” 18: 2245.
- Śliwa T., Gonet A. (2005), *Theoretical Model of Borehole Heat Exchanger*, „Journal of Energy Resources Technology” 127 (2): 142–148.
- Śliwa T., Kotyza J. (2003), *Application of Existing Wells as Ground Heat Source for Heat Pumps in Poland*, „Applied Energy” 74: 3–8.
- Śliwa T., Rosen M.A. (2015), *Natural and Artificial Methods for Regeneration of Heat Resources for Borehole Heat Exchangers to Enhance the Sustainability of Underground Thermal Storages: A Review*, „Sustainability” 7 (10): 13104–13125.
- Śliwa T., Rosen M.A. (2017), *Efficiency Analysis of Borehole Heat Exchangers as Grout Varies Via Thermal Response Test Simulations*, „Geothermics” 69: 132–138.
- Śliwa T., Gołaś A., Wołoszyn J., Gonet A. (2012), *Numerical Model of Borehole Heat Exchanger in ANSYS CFX Software*, „Archives of Mining Sciences” 57 (2): 375–390.
- Śliwa T., Rosen M.A., Jezuit Z. (2014), *Use of Oil Boreholes in the Carpathians in Geoennergetic Systems: Historical and Conceptual Review*, „Research Journal of Environmental Sciences” 8 (5): 231–242.
- Śliwa T., Nowosiad T., Vytiaz O., Sapińska-Śliwa A. (2016), *Study on the Efficiency of Deep Borehole Heat Exchangers*, „SOCAR Proceedings” 2: 29–42.
- Śliwa T., Kruszewski M., Zare A., Sapińska-Śliwa A. (2018), *Potential Application of Vacuum Insulated Tubing for Deep Borehole Heat Exchangers*, „Geothermics” 75: 58–67.
- Śliwa T., Sojczyńska A., Rosen M. A., Kowalski T. (2019), *Evaluation of Temperature Profiling Quality in Determining Energy Efficiencies of Borehole Heat Exchangers*, „Geothermics” 78: 129–137.
- Śliwa T., Sapińska-Śliwa A., Gonet A., Kowalski T., Sojczyńska A. (2021a), *Geothermal Boreholes in Poland – Overview of the Current State of Knowledge*, „Energies” 14 (11): 1–21.
- Śliwa T., Kowalski T., Cekus D., Sapińska-Śliwa A. (2021b), *Research on Fresh and Hardened Sealing Slurries with the Addition of Magnesium Regarding Thermal Conductivity for Energy Piles and Borehole Heat Exchangers*, „Energies” 14 (16): 1–13.
- Śliwa T., Sapińska-Śliwa A., Wysogład T., Kowalski T., Konopka I. (2021c), *Strength Tests of Hardened Cement Slurries for Energy Piles, with the Addition of Graphite and Graphene, in Terms of Increasing the Heat Transfer Efficiency*, „Energies” 14 (4): 1–20.
- Śliwa T., Leśniak P., Sapińska-Śliwa A., Rosen M.A. (2022), *Effective Thermal Conductivity and Borehole Thermal Resistance in Selected Borehole Heat Exchangers for the Same Geology*, „Energies” 15 (3): 1–29.
- Śliwa T., Jaszczur M., Drosik J., Assadi M., Kalantar A. (2024), *Analysis of Potential Use of Freezing Boreholes Drilled for an Underground Mine Shaft as Borehole Heat Exchangers for Heat and/or Cooling Applications*, „Energies” 17 (12): 1–16.
- Śliwa T., Kunasz R., Szczytowski M., Assadi M., Szydło O. (2025), *Analysis of the Performance and Interpretation of Thermal Response Tests for Four Boreholes of Various Depths in the Town of Dźwirzyno (Zachodniopomorskie Voivodeship)*, „Renewable Energy” 245: 122703.
- Terlicka S., Dębski A., Gierlotka W., Wierzbicka-Miernik A., Budziak A., Sypien A., Zabrocki M., Gąsior W. (2020), *Structural and Physicochemical Properties of Silver-Rich Ag–Al Alloys*, „Calphad” 68: 101739.
- Terlicka S., Dębski A., Sypien A., Gąsior W., Budziak A. (2021), *Determination of Thermophysical and Thermodynamic Properties of Ag–Mg Alloys*, „Materials Today Communications” 29: 1–9.
- Topolski Ł., Firlit A., Piątek K., Hanzelka Z. (2020b), *Ograniczanie wzrostów i asymetrii napięć powodowanych jednofazowymi instalacjami fotowoltaicznymi za pomocą szeregowego transformatora dodatkowego w sieci niskiego napięcia*, „Przegląd Elektrotechniczny” 96 (3): 37–41.
- Topolski Ł., Schab W., Firlit A., Piątek K. (2020), *Analiza wpływu generacji rozproszonej na wybrane parametry jakości energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia na terenie klastra Wirtualna Zielona Elektrownia Ochozna*, „Przegląd Elektrotechniczny” 1 (3): 19–22.
- Walczak K., Gędziorowski B., Kulka A., Zajac W., Ziabka M., Idczak R., Tran H. V., Molenda J. (2019a), *Exploring the Role of Manganese on Structural, Transport, and Electrochemical Properties of NASICON- $\text{Na}_3\text{Fe}_{2-y}\text{Mn}_y(\text{PO}_4)_3$ -Cathode Materials for Na-Ion Batteries*, „Applied Materials and Interfaces” 11 (46): 43046–43055.
- Walczak K., Kulka A., Molenda J. (2019b), *Alluaudite- $\text{Na}_{1.47}\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_3$: Structural and Electrochemical Properties of Potential Cathode Material for Na-Ion Batteries*, „Solid State Sciences” 87: 21–26.
- Wei S., Mortemard de Boisse B., Oyama G., Nishimura S., Yamada A. (2016), *Synthesis and Electrochemistry of $\text{Na}_2.5(\text{Fe}_{1-y}\text{Mn}_y)\text{1.75}(\text{SO}_4)_3$ Solid Solutions for Na-Ion Batteries*, „ChemElectroChem” 3: 209–213.
- Wołoszyn J., Czerwiński G. (2023), *Badania wpływu położenia przegród na proces magazynowania energii w systemach z materiałem fazowo zmiennym*, „Przemysł Chemiczny” 102 (11): 1246–1250.
- Wołoszyn J., Szopa K. (2023), *A Combined Heat Transfer Enhancement Technique for Shell-And-Tube Latent Heat Thermal Energy Storage*, „Renewable Energy” 202: 1342–1356.
- Wołoszyn J., Szopa K. (2023b), *Shell Shape Influence on Latent Heat Thermal Energy Storage Performance during Melting and Solidification*, „Energies” 16 (23): 1–26.
- Wołoszyn J., Szopa K. (2024), *A Periodic Horizontal Shell-And-Tube Structure as an Efficient Latent Heat Thermal Energy Storage Unit*, „Energies” 17 (22): 1–29.
- Wołoszyn J., Szopa K., Czerwiński G. (2021), *Enhanced Heat Transfer in a PCM Shell-And-Tube Thermal Energy Storage System*, „Applied Thermal Engineering” 196: 1–13.

Energy Storage in the Context of the Energy Transition – from Materials to Systems.

Selected Research Directions, Applications, and Collaboration with Grid Operators and Industry

Abstract: Energy storage plays a key role in the energy transition process by enabling the effective integration of renewable energy sources, increasing the flexibility of power systems, and improving the reliability of energy supply. This article presents selected research directions pursued at the AGH University of Krakow, focused on issues related to energy storage and the operation of storage systems. Some chapters contain independent studies addressing a broad spectrum of technological and engineering challenges. These include aspects of electrochemical, material, thermal, geothermal, mechanical, and power systems. The article is interdisciplinary, application-oriented, and implementation-focused. It emphasizes the importance of conducting research on the development and integration of advanced energy storage technologies and innovative technical solutions tailored to the needs and challenges of modern power systems.

Keywords: energy storage, hydrogen storage, thermal energy storage, gravitational energy storage, battery energy storage systems (BESS), micro-compressed air energy storage (micro-CAES), aquifer thermal energy storage (ATES), borehole heat exchangers and thermal storage, next-generation cells, alluaudite, oxygen redox, fuel cells, sodium cells, sodium-ion batteries, lithium-ion batteries, energy transition of mining areas, on-grid and off-grid operation modes, voltage stabilization, voltage balancing, power quality improvement

dr inż. Andrzej Firlit

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej
afirlit@agh.edu.pl

**Autorzy poszczególnych części:****1. Magazyny energii w dobie transformacji energetycznej**

prof. dr hab. inż. Janina Molenda,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

2. Badania nad poprawą wydajności magazynowania i przetwarzania energii elektrycznej

dr hab. inż. Andrzej Budziak, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Mikołaj Nowak,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

3. Alternatywne materiały elektrodowe dla tanich i wysokoenergetycznych akumulatorów nowej generacji: od elektrod Li-rich NMC po polianionowe materiały dla ogniw sodowych

dr inż. Andrzej Kulka,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Katarzyna Walczak,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

4. Ogniwa sodowe na bazie alluaudyty siarczanowego jako magazyny energii o potencjalnych zastosowaniach komercyjnych

dr inż. Anna Milewska,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Mikołaj Nowak,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

5. Badania efektywności energetycznej mechanicznego magazynu energii w powietrzu sprężonym micro-CAES

prof. dr hab. inż. Jacek Leszczyński,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Dominik Gryboś,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Jan Markowski,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

6. Grawitacyjne magazyny energii wykorzystujące infrastrukturę likwidowanych podziemnych zakładów górniczych

dr inż. Tomasz Siostrzonek,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej AGH

7. Badania procesów transportowych w magazynach energii termicznej

dr hab. inż. Jerzy Wołoszyn, prof. AGH,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

8. Analiza pracy baterijnych systemów magazynowania energii elektrycznej przyłączonych do sieci zasilających – zagadnienia wybrane

dr inż. Andrzej Firlit,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej AGH

9. Podziemne magazynowanie ciepła i energii z wykorzystaniem otworów wiertniczych

dr hab. inż. Aneta Sapińska-Śliwa, prof. AGH,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
dr hab. inż. Tomasz Śliwa, prof. AGH,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu