

Prace Naukowe Wydziału Mechaniczno-Energetycznego
Politechniki Wrocławskiej

ZESZYTY ENERGETYCZNE

TOM IX

Technologie energetyki odnawialnej



Prace Naukowe Wydziału Mechaniczno-Energetycznego
Politechniki Wrocławskiej

ZESZYTY ENERGETYCZNE

Tom IX

Technologie energetyki odnawialnej

pod redakcją

Sławomira Pietrowicza



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2024

Kolegium redakcyjne: Sławomir Pietrowicz, Artur Machalski,
Maciej Cholewiński, Beata Pytlik

Opieka nad stroną internetową: Maciej Cholewiński

Opracowanie językowe: rozdziały w języku polskim – Dorota Rawa,
rozdziały w języku angielskim – Eric Hilton

Redakcja techniczna: Stanisław Gancarz

Skład: Jan Kaczorowski

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości,
jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny,
fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej,
Wrocław 2024

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
www.oficyna.pwr.edu.pl; oficwyd@pwr.edu.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISSN 2658-0799

ISBN 978-83-7493-283-7

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

RECENZENCI:

Krzysztof Czajka, Politechnika Wrocławska

Cezary Czajkowski, Politechnika Wrocławska

Adam Jaroszewicz, Politechnika Wrocławska

Jacek Kasperski, Politechnika Wrocławska

Janusz Lichota, Politechnika Wrocławska

Marcin Michalski, Politechnika Wrocławska

Magdalena Nemś, Politechnika Wrocławska

Andrzej Nowak, Politechnika Wrocławska

Sławomir Pietrowicz, Politechnika Wrocławska

Beata Pytlik, Politechnika Wrocławska

Daniel Smykowski, Politechnika Wrocławska

Kamil Śmierciew, Politechnika Białostocka

Wiesław Wróblewski, Politechnika Wrocławska

Spis treści

Od redaktora / 7

Wpływ temperatury ogniw fotowoltaicznych
na parametry pracy modułu fotowoltaicznego

WERONIKA JANOWICZ / 9

Analiza porównawcza bateryjnych samochodów elektrycznych
z pojazdami zasilanymi ogniwami paliwowymi

MICHAŁ MACIEJEWICZ / 21

Instalacje fotowoltaiczne – problemy i wyzwania dla Polski

MARCIN Ł. MICHALSKI / 31

Analiza porównawcza obliczeń teoretycznych
i rzeczywistej pracy systemów fotowoltaicznych

MARCIN Ł. MICHALSKI, ALAN T. OCHMAN / 41

Experimental study of the thermal conductivity of an innovative cellular
composite manufactured using additive technology

ANNA PIWOWAR, BEATA ANWAJLER, PIOTR SZULC / 49

Metoda badania charakterystyk statycznych silników momentowych
do serwozaworów proporcjonalnych stosowanych w lotnictwie

WOJCIECH PLUCIŃSKI, MARCIN CIS / 63

Study of scanning electron microscopy, ultimate and proximate analysis
of sewage sludge char and the use of RETScreen software

VISHWAJEET, HALINA PAWLAK-KRUCZEK, TOMASZ HARDY,
AMIT ARORA, SAYED SAEED KARRABI / 83

Od redaktora

Przekazujemy Państwu IX tom Zeszytów Energetycznych: *Technologie energetyki odnawialnej*. Publikacja powstała dzięki wsparciu firmy PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A., która od kilku już lat i niezmiennie podziela naszą pasję i zaangażowanie w dziedzinie energetyki.

Niniejsze wydanie Zeszytów Energetycznych jest efektem analiz i dyskusji prowadzonych podczas XV Konferencji – „Młodzi w energetyce” (24–26 kwietnia 2023). Autorzy poszczególnych rozdziałów reprezentują nie tylko Politechnikę Wrocławską, lecz także inne renomowane instytucje, np. UTC Aerospace Systems, India National Institute of Technology czy Sapienza University.

Podobnie jak w przypadku wcześniejszych tomów ogromną rolę odegrali Recenzenci: zaangażowanie i trud, jaki włożyli w proces opracowania recenzji, zasługują na szczególne uznanie. Bez nich nie byłoby możliwe utrzymanie wysokiego poziomu merytorycznego naszego Wydawnictwa, za co serdecznie dziękujemy. To dzięki wspólnym wysiłkom Autorów i Recenzentów oraz wsparciu partnerów prezentowana publikacja stanowi wartościowy wkład w dziedzinę energetyki – otwiera nowe perspektywy i inspiruje do dalszych badań w obszarze zrównoważonej energetyki.

Życzę inspirującej lektury.

dr hab. inż. SŁAWOMIR PIETROWICZ, prof. uczelni,
redaktor naukowy Zeszytów Energetycznych



Wpływ temperatury ogniw fotowoltaicznych na parametry pracy modułu fotowoltaicznego

Weronika Janowicz

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny

e-mail: 260876@student.pwr.edu.pl

Streszczenie

W rozdziale przedstawiono bilans energii modułu fotowoltaicznego z uwzględnieniem podziału strat wynikającego z różnych sposobów wymiany ciepła (konwekcja, promieniowanie, radiacja). Ponadto zbadano wpływ zmiany temperatury ogniw przy założeniu niezmiennego natężenia promieniowania słonecznego na parametry pracy modułu fotowoltaicznego, takie jak: prąd zwarcia, napięcie obwodu otwartego, moc w maksymalnym punkcie pracy. Zaprezentowano modele umożliwiające obliczenie temperatury ogniwa fotowoltaicznego na podstawie: temperatury otoczenia, natężenia promieniowania słonecznego, prędkości wiatru. Z zastosowaniem wybranego modelu została przeprowadzona analiza wpływu temperatury ogniw fotowoltaicznych na pracę modułu w zależności od położenia geograficznego instalacji. Wykonano ją na podstawie statystycznych danych klimatycznych dla typowego roku meteorologicznego, czyli 12 miesięcy wybranych z okresu min. 10 lat obserwacji odnośnie do konkretnej lokalizacji, i zgodnie z normą EN ISO 15927-4:2005-ISO. W tym celu wybrano pięć stacji meteorologicznych znajdujących się w różnych strefach klimatycznych Polski wydzielonych do celów obliczeń projektowego obciążenia cieplnego budynków. W pracy zaprezentowano także sposoby obniżenia temperatury modułów fotowoltaicznych.

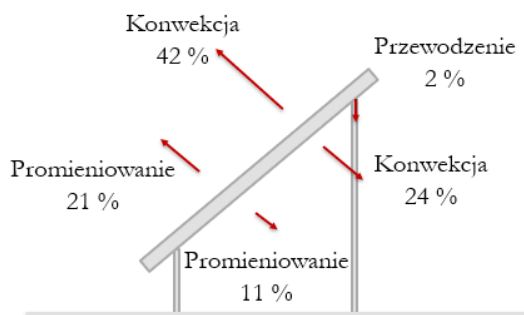
Słowa kluczowe: moduł fotowoltaiczny, ogniwa fotowoltaiczne, temperatura ogniw, współczynniki temperaturowe

1. Wstęp

Jednym z największych problemów, z którym borykają się współczesne społeczeństwa, jest globalne ocieplenie. Redukcja emisji gazów cieplarnianych to sprawa nagląca – dowodzą tego kierunki rozwoju polityki energetycznej poszczególnych krajów czy organizacji międzynarodowych, m.in. Unii Europejskiej [1]. Jednym ze sposobów dążenia do neutralności klimatycznej jest wykorzystanie i rozwój odnawialnych źródeł energii, do których zalicza się energię słoneczną.

Promieniowanie słoneczne może być wykorzystane bezpośrednio do wytwarzania energii elektrycznej dzięki ogniwom fotowoltaicznym lub w celu uzyskania energii cieplnej dzięki urządzeniom takim jak kolektory słoneczne. Sprawność konwersji energii tych dwóch typów urządzeń znacznie różni się od siebie. Sprawność instalacji solarnej mieści się w przedziale 40–60%, w przypadku ogniw fotowoltaicznych to ok. 20% [2].

Część energii promieniowania słonecznego padającego na moduły fotowoltaiczne niewykorzystana bezpośrednio do konwersji w energię elektryczną jest odbijana od powierzchni modułu (ok. 10% [3]). Pozostała wpływa na podgrzanie modułu fotowoltaicznego, a następnie jest odprowadzana do otoczenia. Energia cieplna natomiast jest odprowadzana z modułów głównie na drodze konwekcji i radiacji, co zostało przedstawione na rys. 1. W odróżnieniu od kolektorów słonecznych wzrost temperatury ogniw fotowoltaicznych negatywnie wpływa na ich sprawność, a tym samym na ilość uzyskiwanej z nich energii elektrycznej (zostanie to omówione dalej).

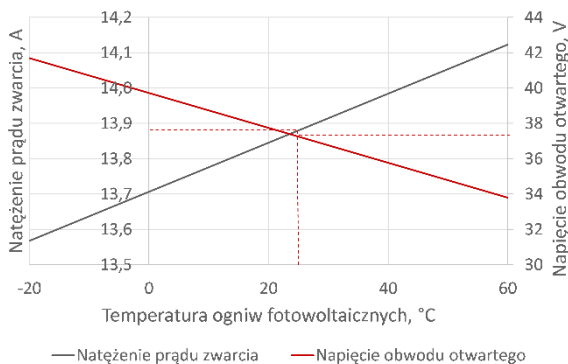


Rys. 1. Sposoby wymiany ciepła między modułem a otoczeniem; oprac. na podstawie [2]

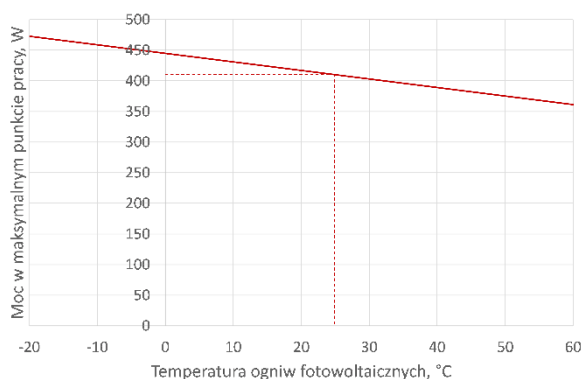
2. Opis metodyki

Do określenia wpływu temperatury ogniw fotowoltaicznych na parametry pracy modułu fotowoltaicznego służą współczynniki temperaturowe. Wyróżnia się trzy współczynniki temperaturowe: prądu zwarcia (α), napięcia obwodu

otwartego (β), mocy w maksymalnym punkcie pracy (γ). Znajdują się one w kartach katalogowych konkretnego modelu modułu, podawane są w jednostce: $\%/^{\circ}\text{C}$. Współczynniki te określają zmiany danych wartości w przypadkach, w których temperatura ogniw fotowoltaicznych różni się od temperatury określonej w warunkach STC (Standard Test Conditions), czyli 25°C przy natężeniu promieniowania słonecznego 1000 W/m^2 i współczynnika masy powietrza AM - 1,5. Dane znamionowe modułu znajdujące się w karcie katalogowej podawane są dla warunków STC. W przykładowym module fotowoltaicznym o mocy 410 W współczynniki te wynoszą: $\alpha = 0,050\text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, $\beta = -0,265\text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, $\gamma = -0,340\text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ [4]. Ten moduł zostanie wykorzystany do dalszej analizy. Wykresy na rys. 2 i rys. 3 przedstawiają zależność natężenia prądu zwarcia, napięcia obwodu otwartego oraz mocy w maksymalnym punkcie pracy od temperatury ogniw fotowoltaicznych, przy założeniu stałego natężenia promieniowania słonecznego: 1000 W/m^2 i z uwzględnieniem wymienionych wcześniej współczynników temperaturowych.



Rys. 2. Natężenie prądu zwarcia i napięcie obwodu otwartego w funkcji temperatury ogniw fotowoltaicznych



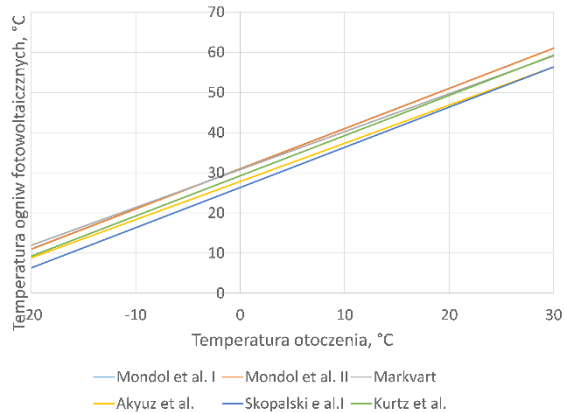
Rys. 3. Moc w maksymalnym punkcie pracy w funkcji temperatury ogniw fotowoltaicznych

Zgodnie z wartościami współczynników temperaturowych zauważalny jest wzrost natężenia prądu zwarcia, a spadek napięcia obwodu otwartego wraz ze wzrostem temperatury ogniw fotowoltaicznych. Dodatkowo, co ze względu na prosumenta najważniejsze, widoczny jest spadek mocy modułu wraz ze wzrostem temperatury ogniw. Każde obniżenie temperatury ogniw poniżej temperatury STC stanowi zysk w wytwarzaniu energii elektrycznej w odniesieniu do mocy znamionowej, wzrost temperatury natomiast powoduje spadek sprawności modułu.

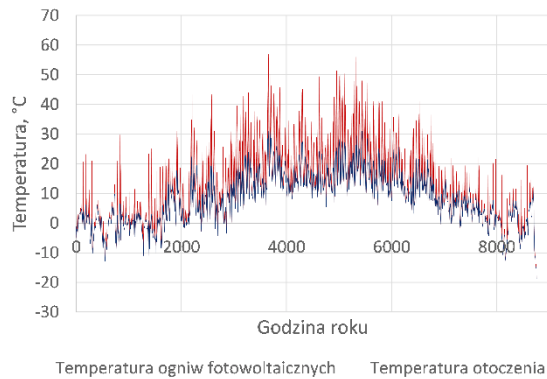
W celu określenia wpływu temperatury ogniw fotowoltaicznych na parametry pracy modułu konieczna jest znajomość temperatury ogniw, którą można uzyskać na podstawie badań doświadczalnych. Wymagają one jednak dużego nakładu pracy, ponadto z powodu trudności dokładnego pomiaru temperatury ogniw w całej objętości modułu fotowoltaicznego tak uzyskany wynik jest obciążony dużym błędem. Poza tym problemem technicznym jest pomiar temperatury samych ogniw – niemożliwy do wykonania bez naruszenia struktur modułu. W tej sytuacji dokonuje się dokładnego pomiaru temperatury warstwy tylnej modułu i przyjmuje ją za temperaturę ogniw, co również jest obciążone błędem.

Poza metodami doświadczalnymi temperaturę ogniw fotowoltaicznych można wyznaczyć na podstawie obliczeń. Służą do tego modele temperatury pracy ogniw fotowoltaicznych dostępne w literaturze przedmiotu, a powstałe na podstawie badań prowadzonych przez specjalistyczne zespoły zajmujące się fotowoltaiką [5]. Główne parametry znajdujące się w modelach można podzielić na zmienne meteorologiczne, takie jak: natężenie promieniowania słonecznego, prędkość wiatru, temperatura otoczenia, oraz na właściwości zależne od materiału i konfiguracji systemu, czyli np. sprawność elektryczna ogniwa PV, absorpcja, przepuszczalność energii słonecznej w szklanej osłonie modułu. Najprostsze modele opierają się na zmiennych meteorologicznych – temperaturze otoczenia, natężeniu promieniowania słonecznego, a także na prędkości wiatru. Porównanie modeli zostało przedstawione na rys. 4. W skrajnym przypadku temperatura ogniw dla danej temperatury otoczenia może być o 8% wyższa dla modelu Mondol et al. II niż dla modelu Skopalski et al. I. Do wyznaczenia charakterystyk przyjęto natężenie promieniowania słonecznego wynoszące 1000 W/m^2 oraz prędkość wiatru równą 1 m/s . Skorzystanie z modeli do oszacowania temperatury ogniw wiąże się z popełnieniem pewnego błędu w stosunku do wartości rzeczywistych, który może wynikać ze zbyt małej ilości zmiennych wziętych pod uwagę. Ponadto sam wybór modelu wpływa na wartości obliczonej temperatury.

Posiadanie danych meteorologicznych odnośnie do konkretnej lokalizacji pozwala na wykorzystanie modelu temperaturowego do analiz porównawczych temperatury ogniw fotowoltaicznych w stosunku do temperatury otoczenia – przykład przedstawiono na rys. 5. W tym celu posłużono się danymi dla typowego roku meteorologicznego w przypadku Wrocławia [6] oraz użyto modelu temperaturowego Kurtz i in. [5] opisanego wzorem (1).



Rys. 4. Porównanie zależności temperatury ogniw PV od temperatury otoczenia wyznaczonych według różnych modeli [5]



Rys. 5. Temperatura otoczenia [6] oraz temperatura ogniw fotowoltaicznych dla stacji synoptycznej we Wrocławiu

Najwyższa temperatura otoczenia to 31,3°C, a najwyższa temperatura ogniw fotowoltaicznych – 57°C.

$$T_c = T_a + G \cdot e^{-3,473-0,0594 \cdot V_w} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

gdzie:

- T_c – temperatura ogniw fotowoltaicznych, °C,
- T_a – temperatura otoczenia, °C,
- G – natężenie promieniowania słonecznego, W/m²,
- V_w – prędkość wiatru, m/s.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu temperatury ogniw fotowoltaicznych na pracę modułu w zależności od położenia geograficznego instalacji wybrano pięć lokalizacji znajdujących się w pięciu strefach klimatycznych Polski: Koszalin (strefa I), Poznań (strefa II), Kielce (Suków) (strefa III), Biał-

stok (strefa IV), Suwałki (strefa V). Temperatury ogniw dla danych lokalizacji obliczone zostały za pomocą modelu Kurtz i in. (1), dane meteorologiczne natomiast zaczerpnięto ze źródła [6]. Moc modułu poddawanego analizie [4] przy temperaturze STC obliczano z zależności (2), a moc z uwzględnieniem współczynnika temperaturowego mocy z zależności (3):

$$P_{STC} = (\eta_{STC} \cdot A \cdot G)/100, W \quad (2)$$

$$P = (\eta_{STC} \cdot A \cdot G)/100 \cdot (1 + \gamma/100 \cdot (T_c - T_{STC})), W \quad (3)$$

gdzie:

P_{STC} – moc modułu dla temperatury STC, W,

P – moc modułu, W,

η_{STC} – sprawność modułu w warunkach STC, %,

A – powierzchnia modułu, m²,

T_{STC} – temperatura STC, °C,

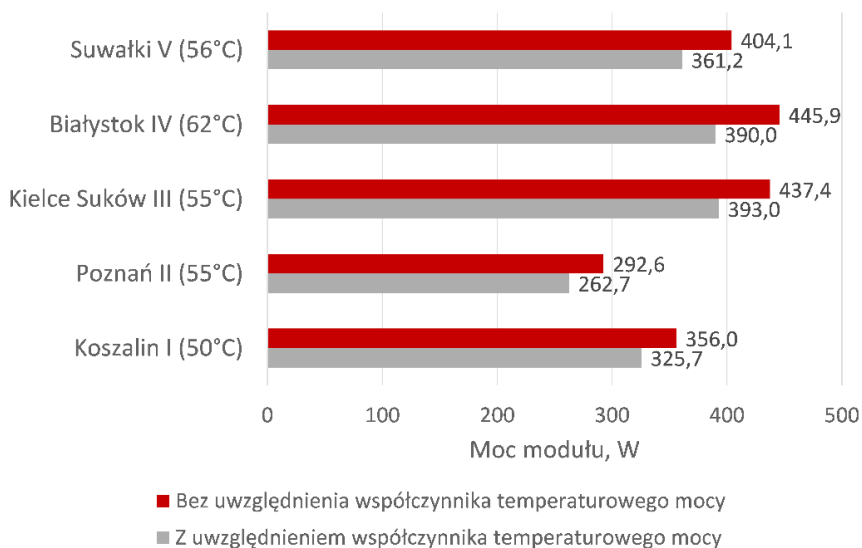
γ – współczynnik temperaturowy mocy w maksymalnym punkcie pracy, %/°C,

STC – Standard Test Conditions.

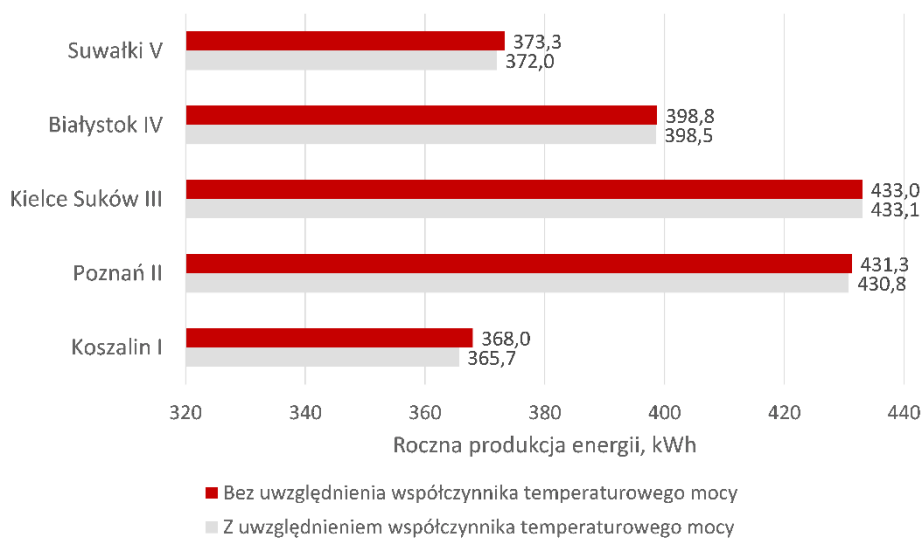
3. Omówienie wyników

Na rysunku 6 przedstawiono chwilową moc modułu, podczas gdy temperatura ogniw jest najwyższa dla danej lokalizacji. Oprócz różnych lokalizacji zestawiono także moce obliczone z uwzględnieniem współczynnika temperaturowego (rzeczywista moc) oraz bez jego uwzględnienia (przy założeniu temperatury ogniw na poziomie określonym w STC). Najwyższą temperaturę ogniw w ciągu roku osiąga moduł zlokalizowany w Białymstoku – 62°C, a najniższą moduł w Koszalinie – 50°C. Uzyskiwana moc modułu zależy głównie od warunków atmosferycznych, takich jak natężenie promieniowania słonecznego czy temperatura otoczenia, stąd różnice w osiągniętej mocy w przypadku różnych lokalizacji. Można zauważyć różnicę między mocą dla założonej temperatury modułu na poziomie warunków STC (25°C) a mocą dla rzeczywistej maksymalnej temperatury ogniw. W zależności od lokalizacji przy rzeczywistej temperaturze modułu (z uwzględnieniem współczynnika temperaturowego) moc jest mniejsza: od 9% w Koszalinie do 14% w Białymstoku, od mocy dla temperatury STC.

Całoroczne wytwarzanie energii dla wybranego modułu zostało przedstawione na rys. 7. Ilość uzyskiwanej energii w dużym stopniu zależy od lokalizacji. Dla Kielc i Poznania wartości te są znacznie wyższe niż dla Suwałk i Koszalina – różnica o ponad 60 kWh/moduł w ciągu roku. Ponadto różnice w uzyskiwanej energii dla rzeczywistej produkcji (rzeczywista temperatura ogniw) i takiej, w której temperatura nie wpływała na pracę ogniwa (tem-



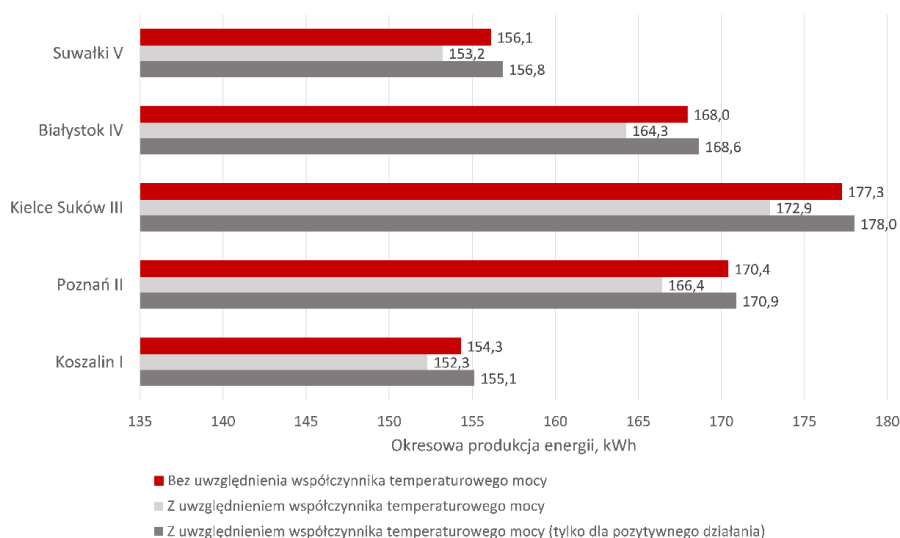
Rys. 6. Moc modułu dla najwyższych temperatur ogniw fotowoltaicznych



Rys. 7. Wytworzona energia elektryczna w ciągu roku dla przykładowego modułu

peratura ogniw zgodna z STC), nie są znaczące. Od 0,1 kWh na rok dla Kielc, gdzie uzyskiwana energia jest najwyższa, do ok. 2 kWh dla lokalizacji, gdzie roczna produkcja jest mniejsza. Analiza ta jest przeprowadzona dla jednego modułu o mocy 410 W (jak przedstawiono w p. 2). Niewielka różnica w skali roku wynika z tego, że straty, które moduł ponosi, gdy jego temperatura wzrasta powyżej 25°C, są niwelowane przez zyski, gdy jego temperatura spada poniżej 25°C.

Analizy w skali roku uniemożliwiają bezpośrednio wskazanie negatywnego wpływu wzrostu temperatury ogniw na pracę modułu – w celu opisanego problemu postanowiono przeprowadzić analizę odnoszącą się do okresu letniego: czerwiec, lipiec, sierpień, w którym temperatury osiągają najwyższe wartości; wyniki zaprezentowano na rys. 8. Poza słupkami oznaczającymi sumę wytworzonej energii dla rzeczywistej temperatury modułu i dla temperatury STC przedstawiono także energię możliwą do wytworzenia w przypadku chłodzenia modułu do temperatury STC w momencie, gdy jest ona przekraczana. W tym ostatnim przypadku można korzystać z zysków (w odniesieniu do mocy nominalnej) wynikających z pracy modułu przy niższych temperaturach ogniw, straty wynikające z podwyższonej temperatury są jednak niwelowane.

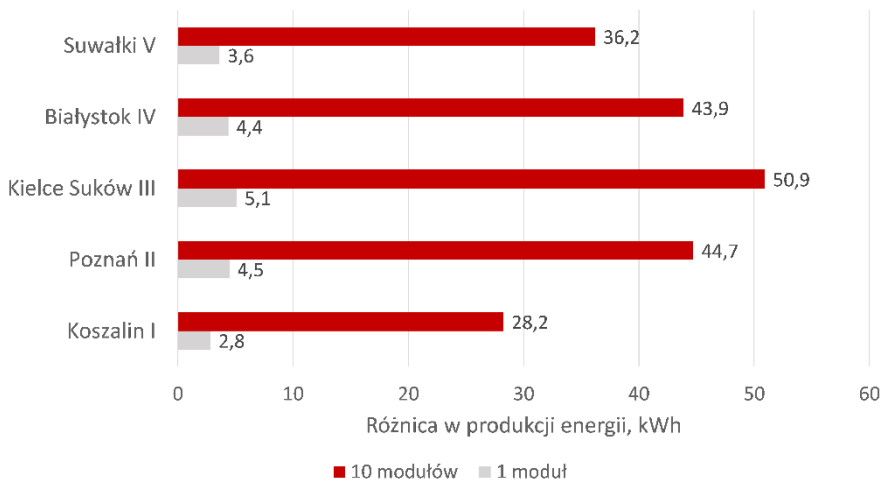


Rys. 8. Wytworzona energia elektryczna w okresie letnim dla przykładowego modułu

Różnice między rzeczywistą a możliwą do uzyskania energią elektryczną dla jednego oraz dziesięciu modułów w wybranym okresie przedstawiono na rys. 9. W odniesieniu do jednego modułu zyski te nie są zbyt duże – do ok. 5 kWh w ciągu trzech miesięcy, po uwzględnieniu instalacji składającej się z dziesięciu modułów, co odpowiada średniej instalacji pv zyski te są dziesięciokrotnie większe i osiągają wartość do ok. 50 kWh w zależności od lokalizacji. Odpowiada to około pięciodniowemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną dla średniego gospodarstwa domowego. Należy przypomnieć, że zyski te odnoszą się do trzech najcieplejszych miesięcy, temperatura ogniw w ciągu roku przekracza jednak 25°C znacznie częściej, zatem zyski roczne wynikające z chłodzenia modułów byłyby jeszcze większe.

Aby było możliwe utrzymywanie temperatury ogniw fotowoltaicznych w temperaturze nie większej niż 25°C, należy użyć dodatkowych systemów

chłodzenia modułów fotowoltaicznych. Dane dostępne w literaturze przedmiotu zawierają informacje o systemach polegających na chłodzeniu powietrzem, wodą, za pomocą rozwinięcia powierzchni tylnej modułu, z użyciem materiałów zmiennofazowych czy rurek ciepła [2, 7]. Są to głównie metody poddane badaniom w warunkach laboratoryjnych, które nie zostały skomercjalizowane, warto przy tym zaznaczyć, że to realne pomysły z możliwością ich realizacji w warunkach rzeczywistych.



Rys. 9. Różnica między rzeczywistą a możliwą do uzyskania energią elektryczną dla wybranego okresu

4. Podsumowanie

Moduły fotowoltaiczne charakteryzują się stosunkowo niską sprawnością – ok. 20%. Wpływ na wartość sprawności ma także temperatura ogniw fotowoltaicznych. Wpływ temperatury na parametry pracy modułów fotowoltaicznych jest widoczny we współczynnikach temperaturowych prądu zwarcia, napięcia obwodu otwartego oraz w mocy w maksymalnym punkcie pracy. W przykładowym module współczynniki te wynoszą kolejno: $\alpha = 0,050 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, $\beta = -0,265 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, $\gamma = -0,340 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$. Główne wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy są następujące:

- Wzrost temperatury powyżej temperatury określonej w warunkach STC (25°C) o 10°C powoduje spadek mocy modułu o 3,4%.
- Określanie temperatury ogniw fotowoltaicznych możliwe jest dzięki modelom temperaturowym pracy ogniw fotowoltaicznych dostępnych w literaturze przedmiotu [5]. Podstawowymi danymi do określenia temperatury ogniw są: natężenie promieniowania słonecznego, temperatura otoczenia, prędkość wiatru. Znajomość temperatury

ogniów umożliwi obliczenie różnicy mocy modułu w porównaniu do mocy znamionowej, a tym samym rzeczywistej produkcji energii w ciągu roku.

- Na podstawie analiz można przyjąć znaczny zysk w produkcji energii elektrycznej dla utrzymanej temperatury ogniów nie wyższej niż 25°C w stosunku do rzeczywistych warunków pracy. Zyski te w przypadku instalacji w okresie letnim dziesięciu modułów o mocy 410 W mogą wynosić nawet ok. 50 kWh, co odpowiada w przybliżeniu pięciodniowemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną dla przeciętnego gospodarstwa domowego.
- Możliwy do otrzymania zysk w dużym stopniu zależy od lokalizacji instalacji. Na przykład z przebadanych miejsc największy uzyskano w Kielcach, a najniższy w Koszalinie.
- W Polsce warunki słoneczne nie są najlepsze w porównaniu do warunków panujących w innych miejscach na świecie. Zdecydowanie największe natężenie promieniowania słonecznego jest krajach leżących na zwrotnikach. Stąd występują zdecydowanie wyższe temperatury ogniów, a tym samym większe straty w produkcji, które się z tym wiążą. Stosowanie instalacji mających na celu chłodzenie modułów fotowoltaicznych ma w takich przypadkach spore uzasadnienie i może się doczekać powszechnego zastosowania.

Literatura

- [1] Cel klimatyczny UE na 2040 r; https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13793-Cel-klimatyczny-UE-na-2040-r_pl [dostęp: sierpień 2024].
- [2] P. Dwivedi, K. Sudhakar, A. Soni, E. Solomin, I. Kirpichnikova, *Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art*, „Case Stud. Therm. Eng.” 2020, October, Vol. 21, DOI: 10.1016/J.CSITE.2020.100674, s. 100674.
- [3] H. Hanifi, C. Pfau, M. Turek, J. Schneider, *A practical optical and electrical model to estimate the power losses and quantification of different heat sources in silicon based PV modules*, „Renew. Energy” 2018, November, Vol. 127, DOI: 10.1016/J.RENENE.2018.04.060, s. 602–612.
- [4] Karta katalogowa modułu fotowoltaicznego; <https://doktorwolt.pl/wp-content/uploads/2020/09/Karta-katalogowa-Longi-Solar-LR4-60HPH-350-380M> [dostęp: czerwiec 2023].
- [5] L.D.O. Santos, P.C.M. De Carvalho, C.D.O.C. Filho, *Photovoltaic Cell Operating Temperature Models: A Review of Correlations and Parameters*, IEEE J. Photovoltaics, 2022, Vol. 12, No. 1, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3113156, s. 179–190.
- [6] <https://www.gov.pl/web/archiwum-inwestycje-rozwoj/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow> [dostęp: sierpień 2024].

- [7] T. Nabil, T.M. Mansour, *Augmenting the performance of photovoltaic panel by decreasing its temperature using various cooling techniques*, „Results Eng.” 2022, September, Vol. 15, DOI: 10.1016/J.RINENG.2022.100564, s. 100564.



ZESZYTY ENERGETYCZNE, TOM IX

Technologie energetyki odnawialnej

2024, s. 21–30

Analiza porównawcza bateryjnych samochodów elektrycznych z pojazdami zasilanymi ogniwami paliwowymi

Michał Maciejewicz

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii

e-mail: 267149@student.pwr.edu.pl

Streszczenie

W niniejszym rozdziale przeanalizowano rozwój rynku samochodów z napędem alternatywnym w Polsce na podstawie danych z 2022 i 2023 r. Skupiono się na porównaniu bateryjnych samochodów elektrycznych (BEV) i pojazdów zasilanych ogniwami paliwowymi (FCEV). Zwrócono uwagę na wzrost udziału pojazdów alternatywnych na rynku polskim związany m.in. z europejskim projektem „Gotowi na 55” mającym na celu ograniczenie emisji CO₂. Opisana została budowa obu technologii ze szczególną koncentracją na elementach kluczowych, takich jak zespół bateryjny w BEV i ogniwa paliwowe w FCEV. Przeanalizowano również aspekty codziennego użytkowania, w tym koszty eksploatacji, dostępność stacji ładowania oraz bezpieczeństwo.

Słowa kluczowe: samochody z napędem alternatywnym,
rynek motoryzacyjny w Polsce, BEV, FCEV

1. Wstęp

Zgodnie z informacjami podanymi przez Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego, a otrzymanymi na podstawie danych z Centralnej Ewidencji Pojazdów w 2022 r. w Polsce sprzedano ok. 419 800 nowych samochodów osobowych – 40,55% stanowiły pojazdy z napędem alternatywnym [1]. W porównaniu z 2021 r., w którym zarejestrowano 446 700 nowych samochodów, a 35,87% z nich miało napęd inny niż wyłącznie spalinowy [1], można zauważyć wzrost udziału samochodów alternatywnych na polskim rynku na poziomie 4,7 punktu procentowego (pp.) [1]. Ponad dwukrotnie wyższą wartość: 10,84 pp. [2] osiągnął wzrost sprzedaży aut z napędem alternatywnym w Unii Europejskiej. Sytuacja ta jednoznacznie wyznacza kierunek, w którym w najbliższych latach czynnie rozwijać się będzie rynek motoryzacyjny w Polsce i w Europie.

Przyczyn takiego stanu rzeczy dopatrywać się można m.in. w projekcie znajdującym się w Europejskim Zielonym Ładzie o nazwie „Gotowi na 55”. Założono w nim ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o 55% w stosunku do 1990 r. [3]. Według Europejskiej Agencji Środowiska ok. 1/4 całkowitej emisji CO₂ w UE w 2019 r. pochodziło z sektora transportu, z czego 71,7% – z transportu drogowego [3]. To sprawiło, że naprawdę istotna stała się modernizacja tego sektora. Zainteresowało to również europejskich producentów samochodów. Nakłady członków Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Pojazdów (ACEA) na te cele sięgnęły w 2020 r. 58,8 mld EUR. Ta suma to 32% wszystkich europejskich wydatków na badania i rozwój [4].

Ostatnio rozwiązaniem, które obok bateryjnych samochodów elektrycznych coraz bardziej zyskuje zainteresowanie, są pojazdy zasilane za pomocą prądu wytwarzanego w ogniwach paliwowych. W rozdziale opisano budowę samochodów z napędem zarówno czysto elektrycznym, jak i wspomaganym wodorem. Omówiono także codzienne użytkowanie obydwu technologii. Pod uwagę wzięto również bezpieczeństwo ich użytkowania.

2. Budowa bateryjnego samochodu elektrycznego

Samochód elektryczny jak każdy inny pojazd jest zespołem ogromnej liczby doskonale współpracujących elementów. Występują w nim takie części, które ze względu na jego działanie można nazwać kluczowymi – to zespół bateryjny, elektryczny silnik napędowy oraz przetwornica prądu stałego na przemienny (rys. 1).

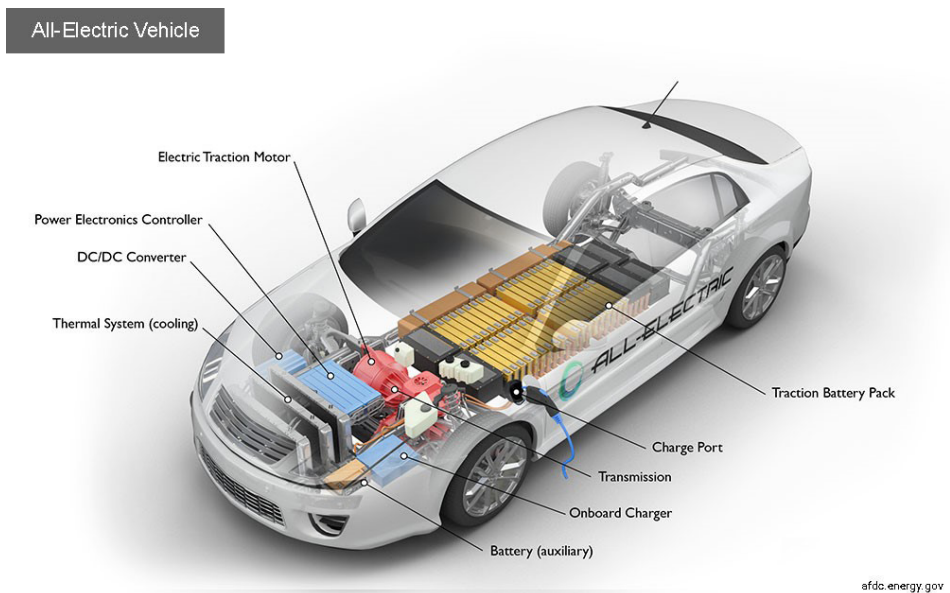
Naciśnięcie pedału gazu w pojeździe elektrycznym powoduje wysłanie sygnału do kontrolera, aby dostosował prędkość poruszania się samochodu przez zwiększenie częstotliwości prądu zmiennego zasilającego napęd. Prąd pobierany jest z baterii, ale zanim trafi do silnika, musi przejść przez prze-

twornicę prądu. Akumulatory bowiem magazynują energię w formie prądu stałego.

Obecnie najpopularniejsze są baterie litowo-jonowe. Wśród nich największe zainteresowanie producentów pojazdów elektrycznych wzbudzają baterie litowo-niklowo-kobaltowo-manganowe. Do najważniejszych zalet tych baterii należą m.in.: wysoka wydajność, bezpieczeństwo, niewielkie rozmiary. Minusem jest konieczność używania metali ziem rzadkich do ich produkcji.

Do napędu samochodów elektrycznych wykorzystuje się silniki IPMSynRM, które powstały w wyniku udoskonalenia konstrukcji silnika indukcyjnego. Jest on połączeniem silnika z magnesami stałymi (PMSM) i silnika reluktancyjnego (SynRM). Wykorzystuje on zarówno właściwości magnesów stałych, jak i reluktancję magnetyczną żelaza.

Współpraca tych dwóch systemów jest wysoce pożądana z uwagi na charakterystyki pracy obu technologii. Silniki typu PMSM generują wysokie wartości momentu obrotowego w początkowej fazie przyspieszania lub gdy auto jedzie pod obciążeniem, np. pod górę. Z drugiej strony, gdy obciążenie spada, a samochód zaczyna jechać z wyższą prędkością, pojawiają się problemy w pracy tego typu silnika. Wynika to z indukowanej w układzie, negatywnej względem napięcia zasilania siły elektromotorycznej. Im szybciej rotor silnika się obraca, tym więcej siły jest generowane, co sprawia, że efektywność tego rozwiązania przy wysokich prędkościach znacząco spada. Problem ten może być rozwiązany dzięki silnikom reluktancyjnym lepiej radzącym sobie przy wysokich prędkościach obrotowych. Mają one nieregularną charakterystykę



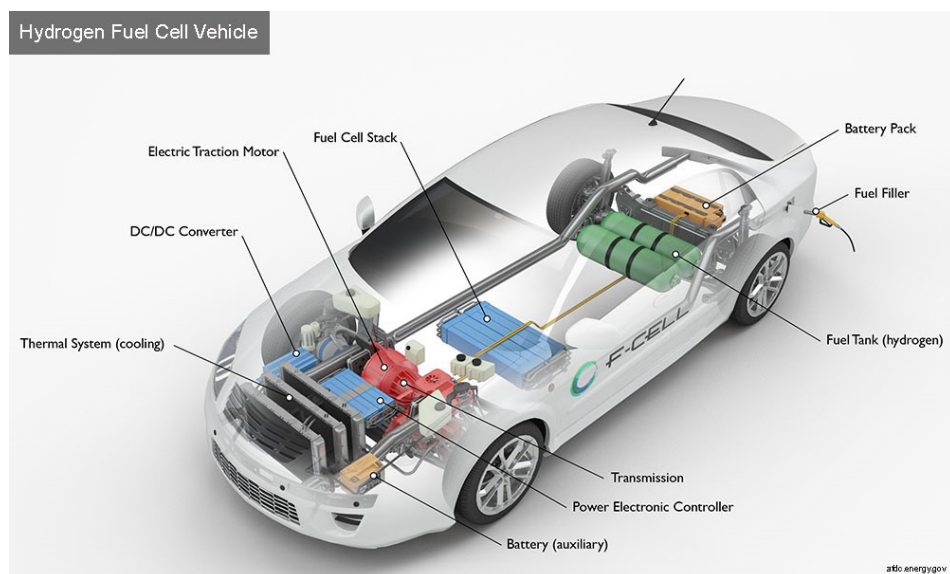
Rys. 1. Budowa bateryjnego samochodu elektrycznego [5]

generowanego momentu obrotowego i są z tego powodu hałaśliwe w początkowej fazie ruchu samochodu.

Dodatkowo istotną ze względu na działanie systemu cechą silników indukcyjnych jest ich zdolność do stawania się prądnicą za każdym razem, gdy obroty rotora są wyższe, niż wynikałoby to z częstotliwości prądu zasilającego, czyli jeśli kierowca hamuje lub jedzie z górki, akumulatory zaczynają się ładować. Warto wspomnieć o innych niezbędnych do działania urządzeniach – na przykład o wbudowanej ładowarce pokładowej i przetwornicy prądu stałego odpowiedzialnej za przetwarzanie wysokiego napięcia z baterii na niskie, potrzebne do zasilenia pozostałych systemów samochodu jak oświetlenie czy systemy bezpieczeństwa.

3. Budowa samochodu wyposażonego w ogniwa paliwowe

Zgodnie z zasadą działania samochodu wyposażonego w ogniwa paliwowe nie chodzi o to, by magazynować energię potrzebną do zasilenia silnika elektrycznego, ale o możliwość stałego jej produkowania. System działania napędu samochodu wyposażonego w ogniwa paliwowe jest analogiczny do bateryjnego samochodu elektrycznego. Znajduje się tutaj również silnik elektryczny, inwerter prądu stałego na przemienny, konwerter prądu stałego i zestaw baterii (rys. 2). Jest on natomiast znacznie mniejszy niż w bateryjnych samochodach elektrycznych i służy głównie do wspomagania systemu. Tak

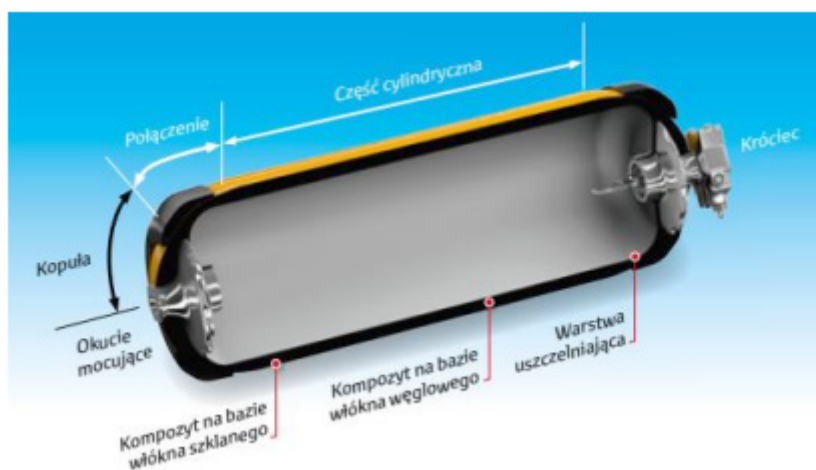


Rys. 2. Budowa bateryjnego samochodu elektrycznego [5]

samo jak w przypadku samochodów elektrycznych ładują się one w trakcie hamowania, a zmagazynowana w ten sposób energia może zostać wykorzystana w momencie większego zapotrzebowania na moc.

Najistotniejszym elementem technologii budowy samochodu są ogniwa paliwowe, produkty ich pracy to: prąd elektryczny, woda, ciepło. Powszechnie używanymi w motoryzacji ogniwami są ogniwa paliwowe z membraną do wymiany protonów. Są to ogniwa niskotemperaturowe o temperaturze pracy nieprzekraczającej 80°C [6]. Zachodzi w nich reakcja elektrochemiczna polegająca na rozbięciu wodoru na proton i elektron na anodzie, a następnie na połączeniu substratów reakcji na katodzie. Procesom elektrochemicznym towarzyszy przepływ elektronu od anody do katody z pominięciem nieprzepuszczalnej membrany. Paliwem potrzebnym do podtrzymywania tego procesu jest wodór, który musi być stale dostarczany do układu. Niezbędne jest również doprowadzenie utleniacza w formie czystego tlenu lub powietrza.

Elementem odróżniającym od siebie te dwie technologie napędów alternatywnych, oprócz wcześniej wspomnianych ogniw paliwowych, są zbiorniki sprężonego wodoru. Magazynowanie wodoru niewątpliwie stanowi wyzwanie. Wodór (H) jako najmniejszy atom z łatwością zarówno przenika przez każdą nieszczelność, jak i dyfunduje przez gumę, co sprawia, że ciężko jest zachować odpowiednią szczelność. Zbiorniki muszą być również przygotowane do wytrzymywania bardzo wysokiego ciśnienia panującego w ich wnętrzu (rys. 3).



Rys. 3. Budowa zbiornika kompozytowego toyota mirai pierwszej generacji (2014) [7]

Na przykład paliwo do zasilenia wodorowej toyoty mirai przechowywane jest pod ciśnieniem 70 MPa [7]. W celu zapewnienia bezpieczeństwa i ograniczenia strat gazowego czynnika zastosowano strukturę zbiornika złożoną z trzech warstw. Wewnętrzna warstwa zrobiona z tworzywa sztucznego zapewnia doskonałą szczelność zbiornika. Kolejna warstwa wykonana została

z włókna węglowego i ma zapewnić wytrzymałość na wysokie ciśnienie panujące w zbiorniku. Zewnętrzna warstwa natomiast to kompozyt z włókien szklanych zapewniających ochronę przed uszkodzeniami mechanicznymi zbiornika.

4. Codzienna eksploatacja tesli model 3 i toyoty mirai drugiej generacji

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na wybór nowego samochodu jest jego opłacalność użytkowania. Aby ją porównać, najłatwiej zestawić ze sobą ten sam model samochodu z zainstalowanymi obydwooma systemami napędu. Z braku takiej możliwości poddano analizie zbliżone parametrami pracy modele: teslę model 3 i toyotę mirai drugiej generacji.

Zgodnie z analizami Electric Database przy umiarkowanej pogodzie zużycie energii tesli model 3 wynosi średnio 10,4 kWh na 100 km podczas jazdy ekonomicznej, 16 kWh na 100 km przy jeździe dynamicznej i 12,9 kWh na 100 km w cyklu mieszanym [8]. Energię elektryczną potrzebną do napędzenia tesli można uzupełniać na przykład na stacji ładowania prądem zmiennym, na stacji ładowania prądem stałym lub z gniazdka w domu. Ceny za 1 kWh energii elektrycznej w przypadku wymienionych opcji wahają się między 2,70 zł za 1 kWh w najdroższej opcji w przypadku ładowania jednorazowego prądem stałym o maksymalnej możliwej mocy bez wykupionej taryfy – do ok. 0,70 zł za 1 kWh w przypadku ładowaniu prądem z gniazdka z wykorzystaniem taryfy G11 [8]. Po uwzględnieniu tych wartości koszt przejechania 100 km rozpatrywanym samochodem przy najbardziej ekonomicznej jeździe i najtańszym sposobie ładowania może osiągnąć wartość 7,28 zł.

Istotnym elementem pozwalającym na bilansowanie kosztów poruszania się samochodem elektrycznym jest dostęp do punktów ładowania. Stacje, które można spotkać w Polsce, to głównie stacje ładowania prądem zmiennym. Wykorzystują one prąd o mocy 1,4–22 kW. Ich zaleta to niższa stawka za 1 kWh, a do wad można zaliczyć potrzebę dłuższego czasu ładowania. Ten typ urządzenia zasila bowiem wewnętrzną ładowarkę pojazdu prądem zmiennym, który następnie jest przekształcany w prąd stały potrzebny do naładowania akumulatora. Wydajność procesu jest zatem niższa niż w przypadku bezpośredniego zasilania prądem stałym. Pod koniec stycznia 2023 r. były w Polsce 1853 takie ładowarki [9]. Na stacji ładowania prądem stałym, gdzie prąd trafia bezpośrednio do akumulatorów, moc może wynosić 50–350 kW. Dzięki temu ładowanie jest szybsze, ponieważ w niecałą godzinę uzupełni się nawet 80% baterii. Pod koniec stycznia 2023 r. w Polsce działało 759 takich ogólnodostępnych stacji [9].

Jeśli chodzi o samochody z ogniwami paliwowymi, według szacowanych wartości zużycia paliwa mirai przy ekonomicznej jeździe powinien zużywać

0,8 kg na 100 km wodoru, przy jeździe dynamicznej 1,3 kg na 100 km, a w cyklu mieszanym ok. 1 kg na 100 km [10]. Biorąc pod uwagę cenę 1 kg wodoru, która w 2023 r. wynosiła 69 zł, koszt przejechania 100 km przy najbardziej ekonomicznej jeździe to 55 zł [11]. Jest to wartość parokrotnie wyższa niż w przypadku samochodu bateryjnego. Na niekorzyść pojazdów typu FCEV przemawia również dostępność punktów uzupełniania wodoru. Funkcjonujących stacji tankowania wodoru w Polsce (stan: grudzień 2023) jest sześć, znajdują się one w Koninie, Krakowie, Rybniku, Poznaniu, Solcu Kujawskim i Warszawie. Sprawia to, że użytkowanie tego typu pojazdów jest dosyć skomplikowane. Istotną zaletą jest jednak szybkość tankowania – już w ciągu 5 min możliwe jest pełne uzupełnienie zbiornika paliwa i kontynuacja dalszej jazdy.

Należy jeszcze wspomnieć o cenie samych pojazdów – w porównywarce samochodów Autokatalog wartość nowej tesli model 3 to ok. 206 000 zł, a toyoty mirai – 324 000 zł [12].

5. Bezpieczeństwo użytkowania

Powszechnie wiadomo, że aby nowy model samochodu osobowego mógł obecnie wejść na rynek, musi spełniać obiektywnie rygorystyczne normy bezpieczeństwa. Błędnie przyjęło się jednak, jakoby prawdopodobieństwo zapłonu samochodu elektrycznego miały być wyższe niż najpowszechniejszych obecnie samochodów spalinowych (rys. 4).

Pożary samochodów elektrycznych i spalinowych w Polsce w 2022 r.



Rys. 4. Porównanie częstotliwości występowania pożarów samochodów typu BEV ze spalinowymi [13]

Na podstawie danych zebranych przez magazyn „Autokult” można jednoznacznie wnioskować, że częstotliwość występowania pożarów z udziałem

bateryjnych samochodów elektrycznych jest porównywalna do tego rodzaju zdarzeń z udziałem klasycznych samochodów [13]. Warto zaznaczyć również, że akcja gaśnicza przy gaszeniu aut elektrycznych i spalinowych zazwyczaj trwa porównywalną ilość czasu. W przypadku tych pierwszych niezbędne jest monitorowanie baterii po zduśnięciu płomieni ze względu na ryzyko ponownej inicjacji samonapędzającej się reakcji chemicznej składników ogniwi prowadzących do zapłonu ogniwi. Główną przyczyną zapłonu pakietu bateryjnego jest zwykle wewnętrzne zwarcie prowadzące do znacznego wzrostu temperatury. Jeszcze parę lat temu po wygaszeniu płomieni powszechnie stosowano regularne schładzanie baterii wodą – skuteczne, ale przy tym wymagające dużego zużycia wody. Obecnie coraz powszechniejsze stają się specjalne kontenery, które po włożeniu wstępnie ugaszonego samochodu elektrycznego zalewa się wodą i pozostawia na kilkanaście godzin. W ten bezpieczny i wodoszczędny sposób kończy się akcję gaśniczą.



Rys. 5. Celowe rozszczelnienie zbiornika ze sprężonym wodorem po lewej i z benzyną po prawej [14]

W przypadku samochodów wodorowych obawy może budzić duży zbiornik z silnie wybuchowym gazem zainstalowany wewnątrz samochodu. Nie są one jednak uzasadnione, dlatego że wodór jest 14-krotnie lżejszy od powietrza, a w przypadku punktowego rozszczelnienia zbiornika powstaje wąski, pionowy płomień niepropagujący wysokiej temperatury na boki i nierozprzestrzeniający się. Przeprowadzono nawet eksperyment, w którym M.R. Swain z University of Miami celowo uszkodził zbiornik w samochodzie wodorowym (rys. 5) [14]. Gaz błyskawicznie uległ spaleni, a po ogniu nie pozostał żaden ślad oprócz nagrzonej do 47°C szyby po zewnętrznej stronie pojazdu.

6. Podsumowanie

W rozdziale porównano technologię bateryjnych samochodów elektrycznych i aut wyposażonych w ogniwa paliwowe – skupiono się na ich budowie oraz łatwości i bezpieczeństwie codziennego użytkowania. Jak łatwo zauważyć, obydwie konstrukcje mają wiele wspólnego; w podobny sposób rozwiązano kwestię napędu i składają się one z podobnych komponentów. Można również je uznać za bezpieczne.

Nie do przecoczenia są jednak różnice związane z kosztem eksploatacji. Koszt przejechania 100 km samochodem wodorowym jest parokrotnie wyższy od pokonania takiego samego dystansu w bateryjnym samochodzie elektrycznym. Brak kompensacji tej różnicy w cenie samego pojazdu sprawia, że w grudniu 2023 r. samochody wyposażone w ogniwa paliwowe można traktować raczej jako ciekawostkę dla pasjonatów zeroemisyjnego transportu. Nie oznacza to jednak, że wymienione koncepcje nie będą rozwijane – wręcz przeciwnie istnieje wiele przesłanek świadczących o tym, że jedna i druga technologia będą się intensywnie rozwijać w najbliższym czasie.

Literatura

- [1] <https://top-oze.pl/raport-motoryzacyjny-za-2022-rok-w-polsce-sprzedaz-aut-z-napedem-spalinowym-elektrycznym-i-hybrydowym/> [dostęp: grudzień 2023].
- [2] <https://www.acea.auto/fuel-pc/fuel-types-of-new-cars-battery-electric-12-1-hybrid-22-6-and-petrol-36-4-market-share-full-year-2022/> [dostęp: grudzień 2023].
- [3] https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/4/story/20190313STO31218/20190313STO31218_pl.pdf [dostęp: grudzień 2023].
- [4] Branża Motoryzacyjna Raport 2022/2023, Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego, praca zbiorowa; <https://www.pzpm.org.pl/> [dostęp: grudzień 2023].
- [5] afdc.energy.gov [dostęp: grudzień 2023].
- [6] K. Banaszek, B. Struski, S. Duer, *Zastosowanie ogniw paliwowych PEM w pojazdach samochodowych*, „Autobusy” 2016, nr 8.
- [7] Toyota News; <https://www.toyotanews.eu/pl/> [dostęp: luty 2022].
- [8] <https://intercars.pl/blog/czesci-samochodowe/ile-kosztuje-przejechanie-100-km-samochodem-elektrycznym/> [dostęp: grudzień 2023].
- [9] <https://elektrowoz.pl/ladowarki/> [dostęp: grudzień 2023].
- [10] <https://www.chip.pl/2023/10/toyota-mirai-wrazenia-test-auto-wodorowe-cena-tankowanie> [dostęp: grudzień 2023].
- [11] <https://mapaladowania.pl/blog/tankowanie-wodoru/> [dostęp: grudzień 2023].
- [12] <https://autokatalog.pl/porownania> [dostęp: grudzień 2023].

- [13] <https://e.autokult.pl/pozary-aut-elektrycznych-w-polsce-mamy-liczby,6861831576562240a> [dostęp: grudzień 2023].
- [14] Swain M.R., *Fuel Leak Simulation*, Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535.



ZESZYTY ENERGETYCZNE, TOM IX

Technologie energetyki odnawialnej

2024, s. 31–40

Instalacje fotowoltaiczne – problemy i wyzwania dla Polski

Marcin Ł. Michalski

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii

e-mail: marcin.michalski@pwr.edu.pl

Streszczenie

Dynamiczny rozwój instalacji fotowoltaicznych w Polsce jest widoczny od ok. 5 lat. Młody i rozwijający się rynek wymaga pewnego „okiełznania” oraz próby czasu. Dzisiaj już nikogo nie dziwią moduły fotowoltaiczne na dachu, ale warto się zastanowić, czy jest to technologia bezpieczna i sprawdzona. Na podstawie analizy wykonanych instalacji fotowoltaicznych w naszym kraju okazuje się, że nie wszystkie pracują prawidłowo, a do tego część z nich przyczyniła się do porażenia prądem, a nawet wystąpienia pożaru. W niniejszym rozdziale pokazano zagrożenia mogące występować na instalacjach fotowoltaicznych. Głównie skupiono się na błędach projektowych i instalacyjnych – kluczowym zagadnieniem była analiza miejsc, w których najczęściej dochodzi do awarii. Poruszono dwie kwestie. Pierwsza to zagrożenia dla życia i mienia związane z porażeniem prądem i pożarem. Druga – prawidłowa praca instalacji fotowoltaicznych z maksymalną wydajnością. Poza tym przedstawione zostały sposoby weryfikacji i likwidacji omawianych problemów.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, pożar, porażenie prądem, falownik, moduł PV

1. Wprowadzenie

Rozwój elektrowni fotowoltaicznych w Polsce bardzo mocno jest związany z tzw. mikroinstalacjami prosumenckimi. Są to instalacje o mocy do 50 kW przeznaczone dla obiektów mieszkalnych i przemysłowych opartych na „net-meteringu”, czyli możliwości wysyłania i odbierania energii od dystrybutora. Taka regulacja prawna została wprowadzona w połowie 2016 r. w związku z modernizacją ustawy o odnawialnych źródłach energii*. W latach 2016–2018 dotyczyła tylko domów mieszkalnych, od 2019 r. została natomiast rozszerzona również o instalacje przemysłowe. Ze względu na stosunkowo małą moc takich instalacji poza korzystnym sposobem rozliczania energii z niej wyprodukowanej stosowana jest uproszczona procedura wykonania instalacji. Mikroinstalacje nie wymagają bowiem projektu nadzoru budowlanego, a ich włączenie do globalnej sieci elektroenergetycznej jest realizowane na podstawie zgłoszenia do dystrybutora energii – wystarczy pod zgłoszeniem podpis instalatora posiadającego uprawnienia elektryczne G1. Dodatkowym atutem rozwoju instalacji fotowoltaicznych są liczne dotacje zarówno gminne, jak i ogólnopolskie, takie jak „Mój Prąd” czy ulga termomodernizacyjna.

Tabela 1. Liczba mikroinstalacji fotowoltaicznych w Polsce w latach 2016–2020 [1]

Rok	Liczba mikroinstalacji fotowoltaicznych
2015	4217
2016	14 792
2017	27 752
2018	55 105
2019	154 426
2020	457 598

Rozwój fotowoltaiki ma charakter wykładniczy, a zapotrzebowanie na rynku przekracza możliwości przerobowe wykwalifikowanych instalatorów. Młody rynek nie ma też dostatecznie dużego doświadczenia oraz wiedzy. Z przeprowadzonych analiz wynika, że ok. 50% błędów i awarii na instalacjach fotowoltaicznych wynika z błędów projektowych i wykonawczych. Kolejne 40% to niskiej jakości urządzenia i komponenty dotyczące prądu stałego (DC), a tylko 10% – prądu przemiennego (AC).

W związku z wynikającymi zagrożeniami 19 września 2020 r. zostały wprowadzone zmiany w prawie budowlanym. Dotyczą one obowiązku uzgadniania z rzeczoznawcą ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych projektu urządzeń instalacji fotowoltaicznych w przypadku mocy powyżej 6,5 kW. Kolejny zapis dotyczy powiadomienia organów Państwowej Straży Pożarnej o zain-

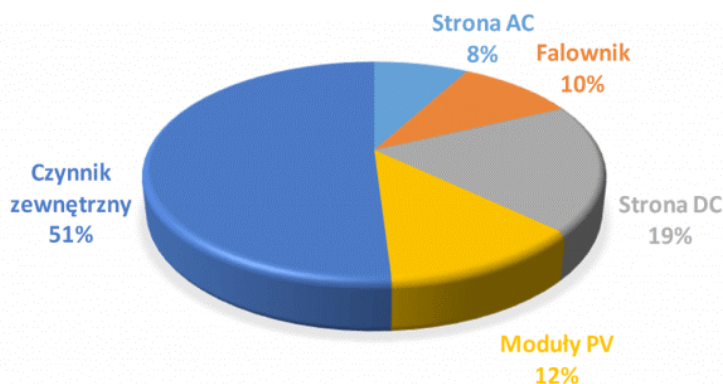
* Ustawa z dnia 22 czerwca 2016 r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw (Dz. U. z 2016 r. poz. 925).

stalowaniu systemu fotowoltaicznego ze wskazaniem adresu i rozmieszczenia urządzeń.

2. Zagrożenia porażeniem prądem i pożarem

Wprowadzone zmiany w zakresie wymagań przeciwpożarowych potwierdzają, że taki problem występuje. Ciężko znaleźć jednoznaczne dane dotyczące liczby zapaleń instalacji fotowoltaicznych w Polsce. Zgodnie z niektórymi źródłami to ok. 700 pożarów rocznie. Takie informacje nie są jednak do końca rzetelne, ponieważ dotyczą pożarów obiektów, na których zainstalowana była fotowoltaika, co nie oznacza, że to ona była przyczyną pożaru. Dokładniejsze dane pochodzą z rynku niemieckiego: przy 430 zanotowanych pożarach ustalono, że 210 było wywołanych awarią fotowoltaiki. To stanowi zaledwie 0,016% wszystkich instalacji fotowoltaicznych [2]. Mimo to nawet niewielki odsetek pożarów zawsze stanowi ogromne ryzyko nie tylko utraty mienia, lecz także życia.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że w głównej mierze pożar jest spowodowany czynnikami zewnętrznymi, czyli wyładowaniami atmosferycznymi. Moduły fotowoltaiczne ze względu na dostęp do jak największej ilości promieni słonecznych najczęściej montowane są w najwyższych punktach dachu, a ich metalowe elementy (ramy, system montażowy) stają się przewodnikami wyładowań atmosferycznych. Aby ograniczyć skutki wyładowań atmosferycznych oraz uszkodzenia pozostałych urządzeń elektrycznych, należy zawsze wykonywać wyrównania potencjału między wszystkimi elementami metalowymi a uziomem. Dodatkowo należy zastosować zabezpieczenia elektryczne – ograniczniki przepięć SPD (Surge Protection Device). Te przeznaczone są na stronę DC oraz AC. Zabezpieczenia w przypadku wydrukowania się wysokiego napięcia w przewodach fotowoltaicznych sprowadzają je do uziomu, co uchroni dalsze elementy na drodze przewodów elektrycznych przed przepaleniem.



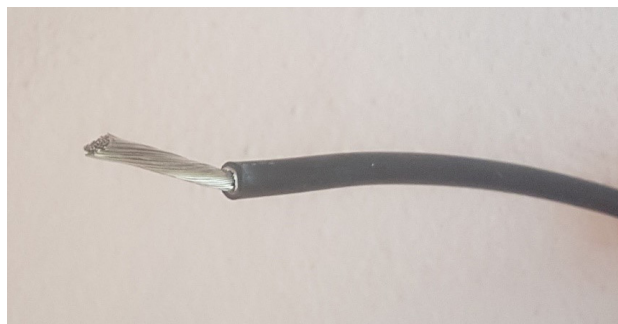
Rys. 1. Źródło wystąpienia pożaru instalacji PV [3]

Oprócz zagrożenia uderzenia piorunu warto pamiętać, że instalacja fotowoltaiczna narażona jest na zmiany temperatury oraz zmienne zawilgocenie. Energia generowana przez moduły fotowoltaiczne ma charakterystykę stałoprądową o napięciu wyższym niż w domowych sieciach elektrycznych (do 1000 V lub 1500 V). Prąd stały w przypadku zwarcia tworzy łuk elektryczny, który bardzo szybko może doprowadzić do pożaru. Dodatkowo moduły fotowoltaiczne nie mają zainstalowanego rozłącznika, co powoduje, że powstały łuk jest ciężko rozłączyć (szczególnie w słoneczny dzień).



Fot. 1. Łuk elektryczny wywołany na instalacji fotowoltaicznej o mocy 1 kW [4]

W celu ochrony przed łukiem elektrycznym należy stosować odpowiednie przewody. Powinny one mieć oznakowanie HLcH i minimalną średnicę 4 mm^2 . Takie przewody zaopatrzone są w podwójną izolację i są odporne na temperatury od -40°C do $+90^\circ\text{C}$ oraz na promieniowanie UV. Mają również trutkę na gryzienie. Warto też zwrócić uwagę, że w przewodach solarnych linka miedziana jest „pobielana” przez pokrycie warstwą cynku. Taki zabieg chroni miedź przed utlenianiem, a dzięki temu wydłuża żywotność i zmniejsza straty energii. Na przewody solarne powinna być udzielana gwarancja na min. 25 lat. Nie jest dopuszczalne stosowanie przewodów LgY niemających wymienionych zalet i z preferowanym napięciem 450 V ciągłego obciążenia,



Fot. 2. Przewód DC do instalacji fotowoltaicznej; widoczna pobielana linka miedziana oraz podwójna izolacja: zewnętrzna (czarna) i wewnętrzna (biała); fot. M.M. (2017–2021)

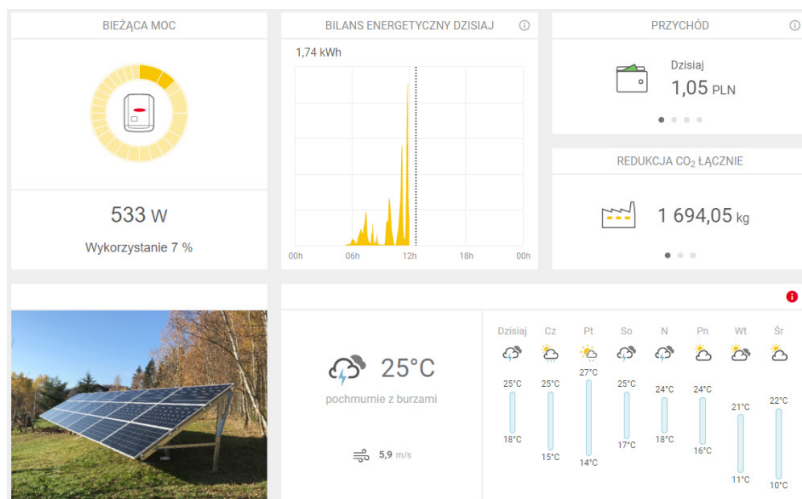
a chwilowego – 750 V. Co nawet przy nowo powstałej instalacji może doprowadzić do porażenia prądem ze względu na zbyt cienką izolację.

Kolejnym istotnym elementem jest łączenie przewodów DC. Niedopuszczalne jest zastosowanie „kostek elektrycznych” – powinny zostać użyte specjalne złącza. Obecnie na rynku występuje kilka standardów. Do najczęściej spotykanych należy złącze MC4, inne to np. Sunclix czy Amphenol H4. Aby zachować prawidłowe połączenia, nie wolno łączyć różnych produktów. Należy także unikać słabej jakości komponentów zastępczych. Warto zwrócić uwagę, czy mają one certyfikat i są kompatybilne z danym standardem, np. MC4. Źle dobrana lub nieprawidłowo zainstalowana złączka to częste miejsce przegrzania w instalacjach fotowoltaicznych. Chwycenie takiej złączki może doprowadzić do poparzenia albo porażenia. Brak interwencji przy uszkodzonej złączce jest prostą drogą do pożaru.



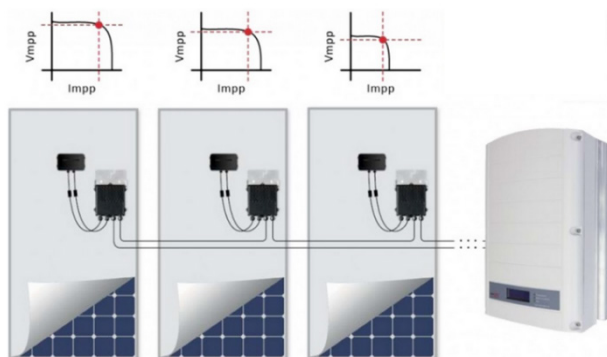
Fot. 3. Badania termowizyjne złącz MC3 i MC4 [5]

Instalacja elektryczna DC jest podłączana do falownika (inwertera), którego zadaniem jest zamiana i dostosowanie parametrów prądowo-napięciowych do instalacji elektrycznej w obiekcie. Zgodnie z normą europejską powinno to być napięcie fazowe wynoszące 230 V, a międzyfazowe o wartości 400 V i częstotliwości 50 Hz prądu przemiennego. Oprócz tej podstawowej funkcji w instalacjach fotowoltaicznych falownik pełni też kontrolno-pomiarową. Dlatego warto zwrócić uwagę, aby miał funkcję pomiaru rezystancji przewodów DC oraz AFCI. Takie wyposażenie znacząco zmniejszy ryzyko pożaru na przykład na skutek uszkodzenia przewodów spowodowanego przetarciem lub nadgryzieniami przez gryzonie czy zerwaniem po silnych wiatrach/opadach. Pomiar rezystancji izolacji powinien mieć wartość powyżej 1 MΩ. Jeśli wynik będzie niższy, falownik rozłączy się i wyświetli komunikat o błędzie. Funkcja AFCI ma na celu przerwanie łuku elektrycznego. Dodatkowo warto, aby falownik był podłączony do sieci internetowej i zsynchronizowany z odpowiednią aplikacją. Tak zainstalowany monitoring pozwoli na szybki komunikat nie tylko o błędach, lecz także o ilości wyprodukowanej energii.



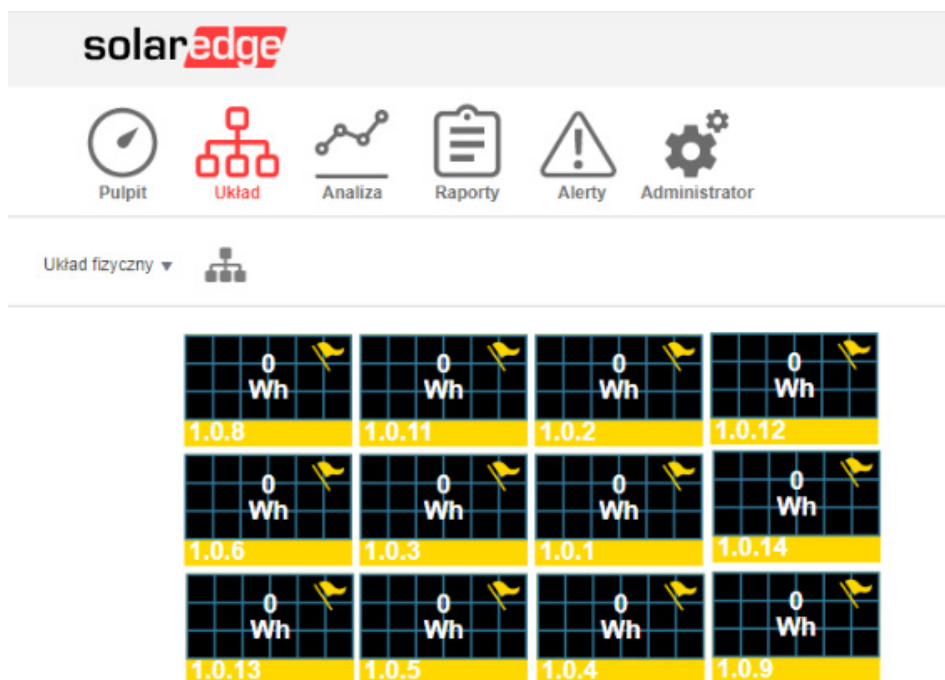
Fot. 4. Screen z monitoringu instalacji fotowoltaicznej w aplikacji Fronius; fot. M.M. (2017–2021)

Dodatkowymi urządzeniami mogącymi poprawić bezpieczeństwo przeciwpożarowe instalacji są wyłączniki ppoż. działające po stronie DC. Taki wyłącznik należy zainstalować jak najbliżej modułów fotowoltaicznych. Wówczas w przypadku wystąpienia pożaru odcinana jest trasa kablowa między wyłącznikiem a falownikiem. Innym rozwiązaniem są optymalizatory mocy z funkcją obniżania napięcia (tzw. safe DC) wtedy, kiedy następuje rozłączenie falownika lub zanik napięcia po stronie AC.



Rys. 2. Moduły fotowoltaiczne z optymalizatorami mocy podłączone do falownika [6]

Optymalizator mocy obniża napięcie do 1 V lub 0 V w zależności od zastosowanego rozwiązania/producenta. A monitoring instalacji fotowoltaicznej nie jest widoczny wyłącznie z pozycji falownika, ale też z każdego optymalizatora (modułu PV), co w trakcie awarii umożliwia identyfikację uszkodzonego modułu.

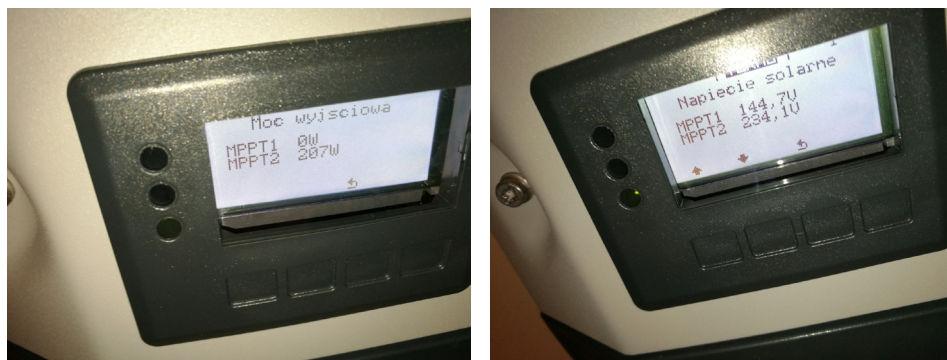


Fot. 5. Screen z monitoringu instalacji fotowoltaicznej wyposażonej w optymalizatory w aplikacji SolarEdge; widoczna awaria modułów z powodu wyładowania atmosferycznego; fot. M.M. (2017–2021)

3. Nieprawidłowa praca instalacji fotowoltaicznych

Pracę instalacji fotowoltaicznych o wiele częściej zakłócają nieprawidłowości niż ich pożary. Przy czym błędy wynikające z nieprawidłowości mają mniej poważne konsekwencje. Najczęściej powodują one zmniejszenie wydajności systemu albo całkowity brak produkcji energii. Często wynikają z wadliwego zaprojektowania instalacji. Projektanci powinni bowiem brać pod uwagę rozmieszczenie modułów fotowoltaicznych, a głównie zacielenia. Kolejnym istotnym parametrem są wartości natężenia i napięcia w instalacjach. Tu sytuacja jest o wiele trudniejsza niż w standardowych urządzeniach na prąd przemienny AC. Przede wszystkim moduły fotowoltaiczne łączy się między sobą, przez co można zwiększać napięcie (połączenie szeregowo) lub natężenie (połączenie równoległe). Kolejnym istotnym parametrem wpływającym na charakterystykę prądowo-napięciową są warunki środowiskowe. Nasłonecznienie wpływa na natężenie prądu, często zapomina się natomiast o wpływie temperatury na napięcie – a w warunkach panujących w Polsce na płycie krzemowej temperatura może się wahać od -25°C do nawet $+70^{\circ}\text{C}$. Parame-

try modułów fotowoltaicznych podawane są w warunkach STC (irradiacja 1000 W/m^2 , temperatura ogniwa 25°C , współczynnik AM 1,5). Przy doborze modułów fotowoltaicznych do falownika należy przeliczyć wartość napięcia i natężenia do skrajnych warunków atmosferycznych. W tym celu wykorzystuje się podawane w kartach katalogowych współczynniki temperaturowe. Na przykład współczynnik w przypadku napięcia wynosi ok. $-0,4\%/^\circ\text{C}$, co wydaje się początkowo wartością bardzo małą, ale po pomnożeniu jej przez różnicę temperatur od warunków STC (Standard Test Conditions), np. latem osiąganą do 70°C , wartość ta wynosi już -18% . Taki spadek napięcia może spowodować rozłączenie falownika w piękną bezchmurną pogodę. Aby uniknąć takich sytuacji, należy przeliczyć, czy prawidłowo została dobrana liczba modułów fotowoltaicznych ze względu na parametry falownika.



Fot. 6. Wyświetlacz falownika Fronius: instalacja pracująca na dwóch niezależnych łańcuchach fotowoltaicznych – z powodu zmniejszenia napięcia poniżej 150 V pierwszy łańcuch nie produkuje energii; fot. M.M. (2017–2021)



Fot. 7. Pomiar impedancji pętli zwarcia i napięcia instalacji elektrycznej z przyłączoną instalacją fotowoltaiczną o mocy 8 kW; fot. M.M. (2017–2021)

Inny coraz częściej się pojawiający problem dotyczy stabilności parametrów sieci. Ma to głównie związek z dystrybutorami energii, ale drastycznie wpływa na pracę nie tylko instalacji fotowoltaicznych, lecz także innych urządzeń elektrycznych. Ogromny rozwój OZE w Polsce spowodował rozchwianie parametrów ze względu na nieregularny charakter produkcji energii. Każdy falownik, żeby „wtłoczyć” energię do sieci, wykorzystuje pośrednictwo podwyższania napięcia. Zgodnie z normami i dyrektywami nie powinno zostać przekroczone 10% napięcia na fazę, co przy 230 V oznacza wartość 253 V. Przy takim napięciu falowniki rozłączają się i nie produkują energii. Przy zwiększonym napięciu natomiast pojemność i możliwości oddawania energii do sieci są też zmniejszane. W takim przypadku oprócz pomiaru napięcia należy zmierzyć impedancję pętli zwarcia. Oba pomiary umożliwiają weryfikację, jaką moc może przyjąć sieć elektroenergetyczna.

W celu lepszego wyjaśnienia zaprezentowany zostanie przykład: w instalacji fotowoltaicznej o mocy 8 kW impedancja pętli zwarcia (IPZ) wynosi 0,29 Ω , a napięcie w sieci 242 V. Do obliczeń posłużono się następującym wzorem:

$$P = ((U_{zm} - U_{nom}) \times U_{zm}) / IPZ = (242 - 230) \times 242 / 0,29 = 12\,049 \text{ W} \quad (1)$$

w którym:

zm – zmierzone,

nom – nominalne.

Zgodnie z obliczeniami maksymalna moc przypadająca na jedną fazę to ponad 12 kW. O wiele gorsza jest sytuacja, jeśli sieć elektryczna jest mocno wyeksploatowana – wówczas impedancja pętli zwarcia może przyjmować wartości ponad 1 Ω , co w omawianym przypadku oznacza maksymalną moc

$$P = ((U_{zm} - U_{nom}) \times U_{zm}) / IPZ = (242 - 230) \times 242 / 1 = 2916 \text{ W} \quad (2)$$

Możliwość obciążalności sieci w podanym przykładzie spadła 4-krotnie. Na podstawie przedstawionych obliczeń można wnioskować, że zarówno dystrybutorzy muszą zadbać o modernizację sieci elektroenergetycznych, jak i właściciele domów/firm.

4. Podsumowanie

W Polsce jest jeszcze sporo wyzwań odnośnie do odnawialnych źródeł energii. Rynek cały czas się rozwija, a problemy występują coraz częściej. Konieczność zmian nie powinna jednak stanowić przyczyny niepokoju – dzięki rzetelnej wiedzy można stawiać im czoła. Wielu problemom może nie jest łatwo zaradzić, ale na kolejne należy już teraz się przygotowywać. Dlatego w najbliższych latach ze względu na coraz większą liczbę niestabilnych źródeł

energii, można spodziewać się sporego rozwoju ich magazynów oraz dążenia do jak największej autokonsumpcji.

Takie rozwiązania będą wdrażane przez nowe regulacje prawne oraz dofinansowania. Jeszcze w tym roku ma nastąpić kolejna nowelizacja ustawy o odnawialnych źródłach energii. Kluczowym zapisem jest rezygnacja z „net-meteringu” na rzecz sprzedaży energii w mikroinstalacjach. Niestety wówczas fotowoltaika będzie rozliczana po cenach hurtowych, a odkupowanie energii będzie po cenach detalicznych. Taka zmiana wymusi jak największą autokonsumpcję, która obecnie dla domów jednorodzinnych wynosi ok. 30%. Innym rozwiązaniem staną się magazyny energii. Tutaj kluczowe okażą się warunki dofinansowań w 4. edycji programu „Mój Prąd”, która będzie miała właśnie na celu rozwój takich technologii. Inną formą zwiększania zużycia na potrzeby własne są chociażby auta elektryczne, które coraz częściej widać na polskich drogach. I na pewno będzie ich coraz więcej, między innymi dzięki dofinansowaniu przez Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, które ruszyło 12 lipca 2021.

Literatura

- [1] Dane dotyczą OSD zrzeszonych w PTPiREE.
- [2] TÜV Rheinland i Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems; ISE, raport 2015.
- [3] Sepanski i in., *Assessment of the fire risk in PV-arrays and development of security concepts for risk mini-mization*, 2015.
- [4] <https://safersolar.com.au/what-causes-solar-power-system-fires/> [dostęp: czerwiec 2021].
- [5] „TÜV Rheinland” 2004, 12.
- [6] SolarEdge, materiały szkoleniowe firmy, 2021.



Analiza porównawcza obliczeń teoretycznych i rzeczywistej pracy systemów fotowoltaicznych

Marcin Ł. Michalski¹, Alan T. Ochman²

¹ Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii
e-mail: marcin.michalski@pwr.edu.pl

² Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii
e-mail: ochmanenergia@gmail.com

Streszczenie

W pracy badawczej przeanalizowano pięć mikroinstalacji z różnych rejonów Polski opartych na układach szeregowych i równoległych, wyposażonych w systemy optymalizujące pracę. Wykonano projekty każdej z nich z zastosowaniem programów służących do obliczania uzysków energetycznych. Porównano uzyski rzeczywiste badanych instalacji do wyników pochodzących z projektów powstałych z użyciem programów opracowanych przez producentów falowników wchodzących w skład instalacji fotowoltaicznych. Dodatkowo w analizie porównawczej różnych programów wykorzystano projekty pochodzące z niezależnego programu PV Sol.

Analizowane instalacje fotowoltaiczne miały komponenty od różnych producentów, moduły PV cechowała różna moc oraz technologia, a warstwa zbierająca była skierowana w różnych kierunkach. W ramach analizy porównawczej rzeczywistej pracy układów obliczono odchyły procentowe między wynikami projektów a danymi wynikającymi z uzysków otrzymanych z monitoringów instalacji, co miało w efekcie określić dokładność programów służących do obliczania wyprodukowanej energii z instalacji PV.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, projektowanie, falownik, moduł PV, energetyka słoneczna

1. Wstęp

Na rynku polskim i światowym jest bardzo wiele programów służących do projektowania instalacji fotowoltaicznych. Część z nich jest darmowa, a część płatna w formie jednorazowej lub subskrypcji. Do przeprowadzonych analiz wykorzystano trzy programy od producentów falowników oraz jeden niezależny. Charakterystykę każdego z programów można przedstawić następująco [1]:

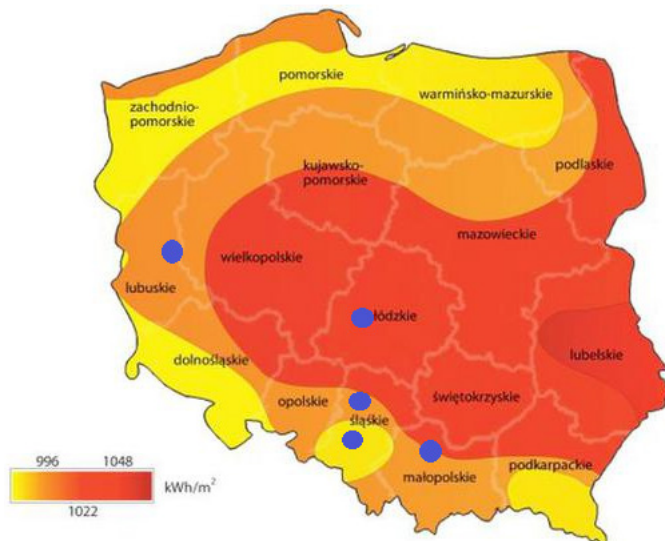
- SolarEdge Designer – program obsługujący instalacje ze wskazanym rozwiązaniem firmy SolarEdge (optymalizatory mocy zmieniające układ modułów na równoległy); program bezpłatny.
- Huawei Smart Design – program z przeznaczeniem do falowników marki Huawei służący do oszacowania ilości produkowanej przez instalację energii oraz umożliwiający uzyskanie inteligentnych zaleceń dotyczących pojemności magazynu energii przy projektowanej instalacji.
- Sunny Design – program z przeznaczeniem do falowników marki SMA, obsługuje systemy fotowoltaiczne z układem magazynowania baterii lub bez, systemy wyspowe albo hybrydowe. Obliczane są także dodatkowe wskaźniki ekonomiczne systemu, które mają na celu dobór odpowiednich komponentów.
- PV Sol – program umożliwiający projektowanie każdego ze szczegółów schematu systemu fotowoltaicznego. Pozwala na kalkulowanie spadków napięcia na przewodach, a także obliczanie zużycia prądu elektrycznego na bieżące potrzeby. Istnieje również wersja PV Sol Premium (dzięki niej można dokonywać pomiarów wymiarów budynków z Google Earth Pro oraz importować do pliku własnej konstrukcji dachowej oraz brakujących elementów budynku w wysokiej rozdzielczości – bardzo dokładne projekty 3D); program płatny.

Na podstawie danych, udostępnionych przez firmę Strefa Energii Paweł Lechowicz do celów badawczych, wybrano pięć instalacji fotowoltaicznych, zainstalowanych przez tę firmę, różniących się od siebie specyfikacją, mocą, technologią oraz mających różne ustawienia względem nasłonecznienia w ciągu roku. Każda z tych instalacji pracowała już minimum dwa lata, dzięki

Tabela 1. Instalacje fotowoltaiczne wykorzystane do analiz

	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Nr 5
Położenie	Balice	Zielona Góra	Psary	Pyrzowice	Stara Wieś
Moc instalacji [kWp]	4,62	5,18	3,06	7,13	5,18
Prod. modułów	Boviet	Longi	JA Solar	Sharp	Longi
Moc modułów [Wp]	330	370	340	310	370
Inwerter	SolarEdge	Fronius	Huawei	SMA	SolarEdge

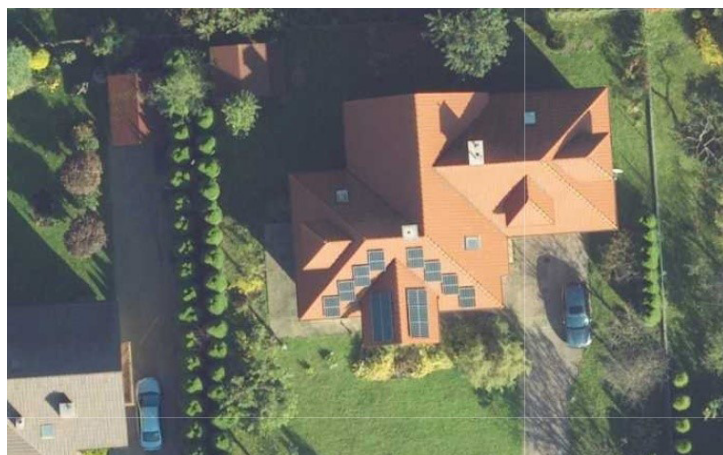
czemu można było wykluczyć ewentualne wady montażowe, które wpłynęłyby na ich sprawność. Wybrano instalacje z różnymi inwerterami oraz takie z systemem optymalizacji i bez, tak aby wyniki końcowe były jak najdokładniejsze i prowadziły do konstruktywnych wniosków niezależnie od producenta urządzenia [1, 2].



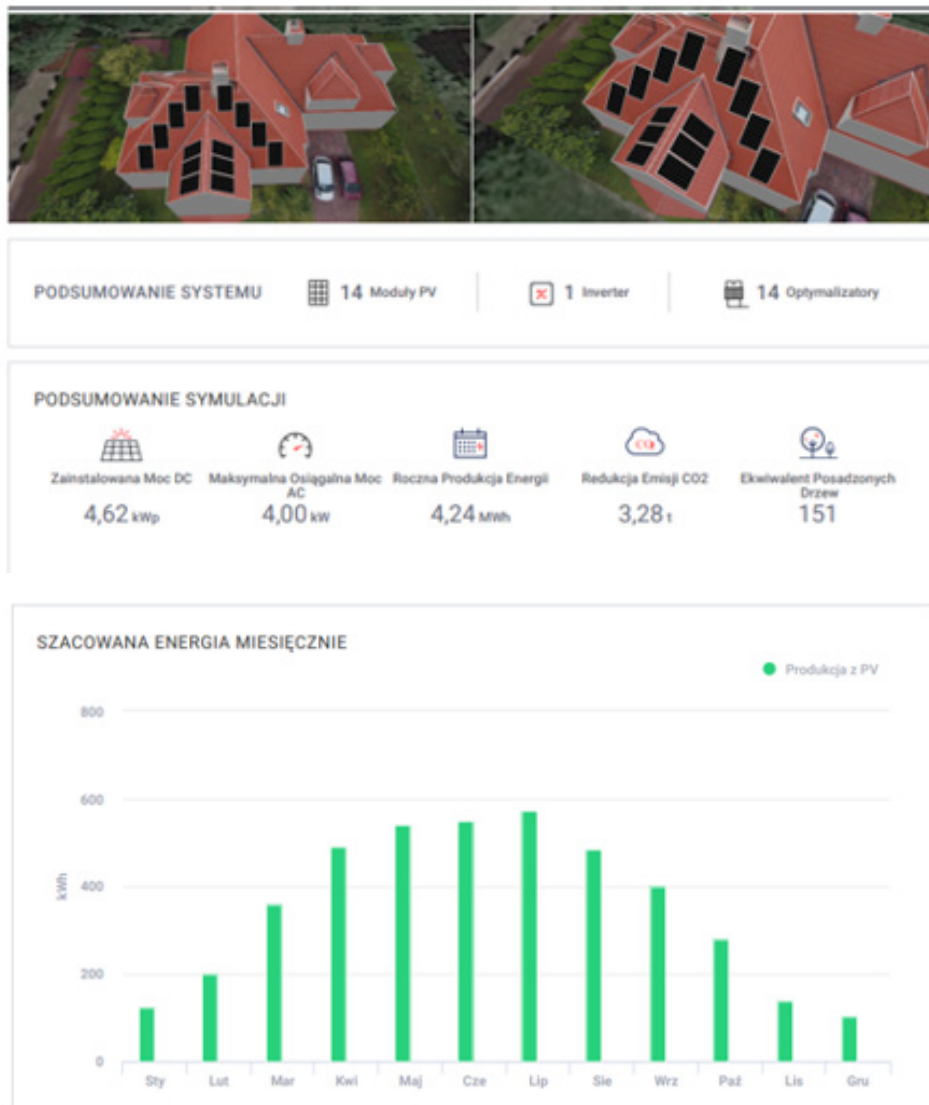
Rys. 1. Położenie geograficzne analizowanych instalacji fotowoltaicznych

Przykładowy projekt

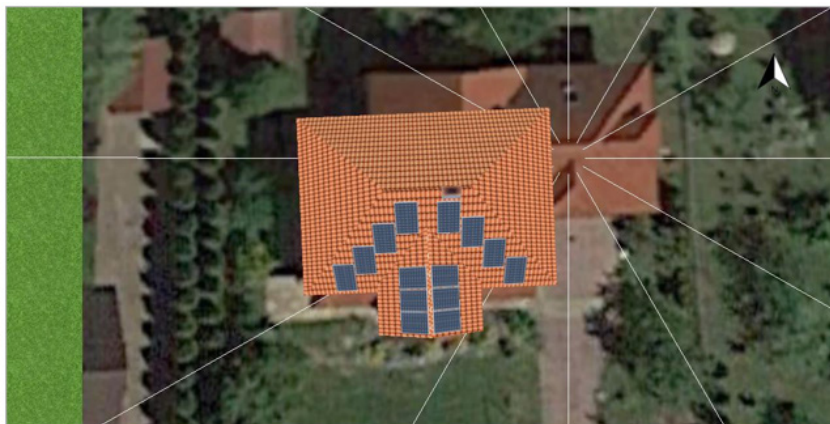
Na fotografii 1 przedstawiono zdjęcia i projekty dla instalacji nr 1 zlokalizowanej w miejscowości Balice o mocy 4,62 kWp.



Fot. 1. Zdjęcie z drona wykonanej instalacji nr 1



Fot. 2. Projekt wykonany w SolarEdge Designer instalacji nr 1

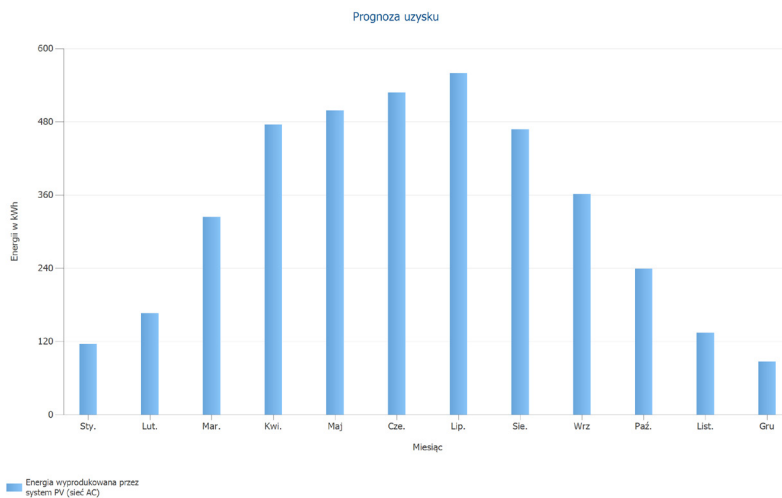


Ilustracja: Obraz przegląd, Projektowanie 3D

Instalacja PV

3D, Podłączona do sieci instalacja fotowoltaiczna (PV)

Dane klimatyczne	Krakow-Balice, POL (1991 - 2010)
Moc generatora PV	4,62 kWp
Powierzchnia generatora PV	23,4 m ²
Liczba modułów PV	14
Liczba falowników	1



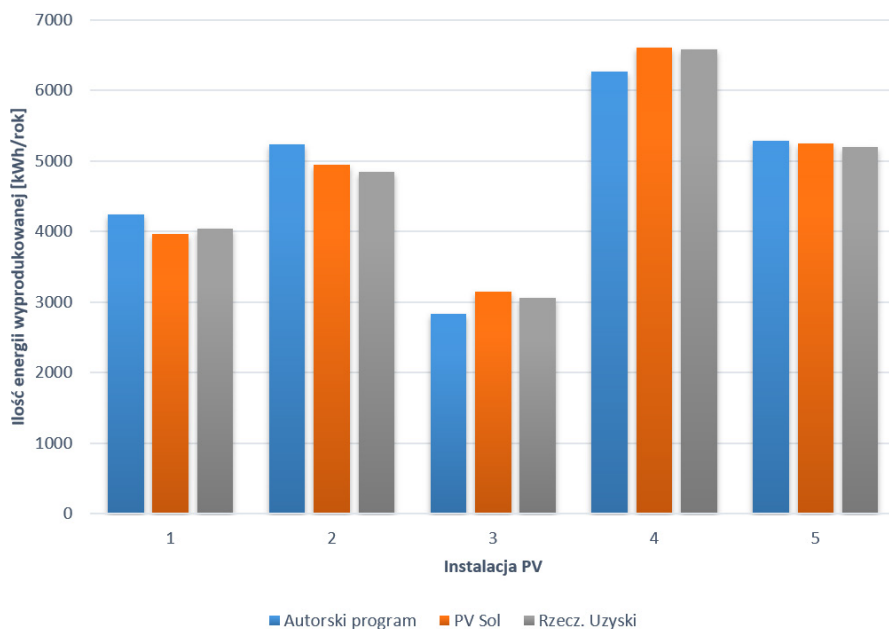
Instalacja PV

Moc generatora PV	4,6 kWp
Spec. uzysk roczny	856,66 kWh/kWp
Stosunek wydajności (PR)	79,1 %
Zmniejszenie uzysku na skutek zacielenia	6,3 %/rok
Energia oddana do sieci	3 958 kWh/rok
Energia oddana do sieci w pierwszym roku (łącznie z degradacją modułu)	3 958 kWh/rok

Fot. 3. Projekt wykonany w PVSol instalacji nr 1

2. Analiza danych

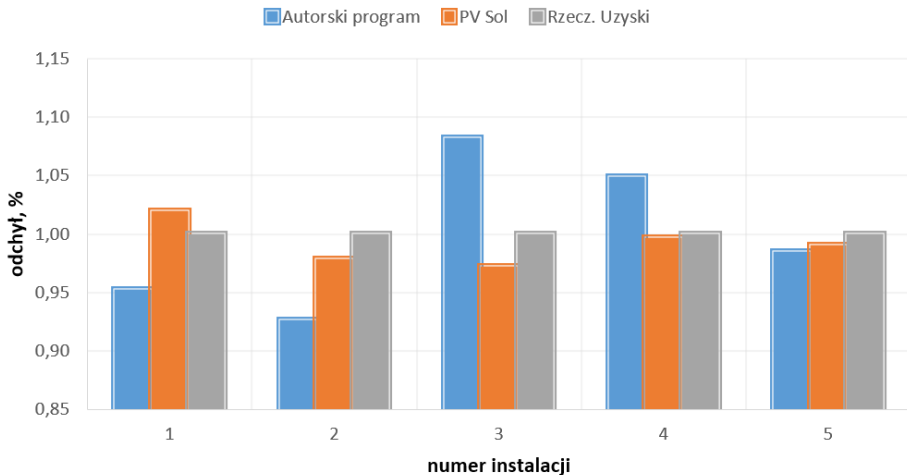
Każda z badanych pod kątem uzysków instalacji fotowoltaicznych mieści się w innym regionie i poddana była różnym warunkom atmosferycznym odpowiadającym konkretnej lokalizacji. We wszystkich programach korzystano z danych pochodzących z pobliskich stacji meteorologicznych – obliczono potencjalne uzyski zgodnie z warunkami założonymi w projekcie. Algorytm obliczeń uzysków energii z instalacji fotowoltaicznej dla każdego z programów jest indywidualny i uwzględnia dane pogodowe oraz działanie systemu – głównie falownika. Omawiane programy stworzyły firmy na podstawie ich falowników oraz niezależnego programu PV Sol wyliczającego potencjalne uzyski z uwzględnieniem danych klimatycznych z lat 1991–2010. Dzięki porównaniu pięciu zupełnie różnych instalacji o różnym osprzęcie można było wnioskować, który program jest najbardziej dokładny w porównaniu do rzeczywistych uzysków instalacji w roku 2021 pobranych z ich liczników energii.



Rys. 2. Porównanie energii wyprodukowanej przez wszystkie instalacje łącznie z uzyskami szacunkowymi

Po analizie otrzymanych danych okazało się, że w każdym przypadku istniała dysproporcja między uzyskami energetycznymi symulowanymi a rzeczywistymi. Nawet konkretne programy producentów falowników instalacji nr 3 oraz nr 4 obliczyły wytwarzanie mniejsze niż w rzeczywistości. W obu przypadkach to program PV Sol był bliższy rzeczywistym uzyskom i za pomocą bardziej zaawansowanych technik obliczeniowych oszacował ilość wytwor-

rzony energii z odchyleniem 3% od wartości rzeczywistych w instalacji nr 3 oraz niemal identycznym wynikiem w instalacji nr 4 (zaledwie 0,3% różnicy energii). Programy opracowane przez producentów falowników instalacji nr 1 oraz nr 2 po wprowadzeniu danych rzeczywistych instalacji oszacowały wytworzoną przez systemy ilość energii na poziomie wyraźnie wyższym, niż wynikało to z danych rzeczywistych, kiedy dane wyjściowe dotyczące produkcji energii z programu PV Sol były odpowiednio o 2% mniejsze niż w rzeczywistości w instalacji nr 1 oraz o 2% większe niż w instalacji nr 2. Jest to niezwykle mała różnica mogąca wynikać z warunków pogodowych, dlatego jest w pełni akceptowalna, co tylko świadczy o bardzo wysokiej dokładności obliczeniowej programu PV Sol. W przypadku ostatniej instalacji oba programy – SolarEdge Designer i PV Sol charakteryzowały się różnicą w wynikach projektowych do rzeczywistych na poziomie 1,5% oraz 1%, przy czym PV Sol znów okazał się dokładniejszym programem [2].



Rys. 3. Odchył procentowy uzysków rzeczywistych oraz projektowych

3. Wnioski

W przypadku różnic między rzeczywistą ilością wytworzonej energii a wartością symulowaną na poziomie kilku procent można założyć, że w danym regionie pogoda w 2021 r. mogła nieznacznie odbiegać od średnich warunków panujących w danym miejscu. Każdy z programów okazał się wystarczająco dokładny, ponieważ różnice w obu rodzajach uzysków energii nie przekraczały nawet 8%. W każdym przypadku natomiast to program PV Sol okazywał się dokładniejszy od każdego innego programu – niezależnie od miejsca, rodzaju

czy wielkości instalacji oraz od użytych optymalizatorów w instalacji. Dzięki wybraniu pięciu zupełnie innych instalacji różniących się nie tylko położeniem, lecz także użytymi komponentami można potwierdzić większą dokładność programu PV Sol w stosunku do innych programów wykorzystanych w badaniach. Program PV Sol skutkiem całej czas aktualizowanej bazy danych ze stacji pomiarowych oraz wieloletnich porównaniach tysięcy działających instalacji na całym świecie za każdym razem określał bardzo precyzyjnie szacowane uzyski energii elektrycznej z opisywanych instalacji fotowoltaicznych.

Tak dokładne oszacowanie energii osiągananej w układzie przy użyciu programu PV Sol na przykładzie przedstawionej analizy pięciu instalacji fotowoltaicznych stanowi dowód, że jest to program wart zakupu przez firmy zajmujące się szeroko pojętym montażem instalacji fotowoltaicznych. Spełnia on bowiem oczekiwania inwestora, któremu zależy na jak najdokładniejszej analizie uzysków energii prowadzących do jak najkrótszego zwrotu inwestycji i przy wykluczeniu detali mogących negatywnie wpłynąć na produkcję energii elektrycznej przez układ czy nawet na jego uszkodzenie. To szczególnie ważne w przypadku farm fotowoltaicznych, w których nawet niewielka odchyłka procentowa wpływa znacząco na analizę ekonomiczną inwestycji [2].

Literatura

- [1] M. Dębowski, A. Luberański, M. Michalski, J. Polański, T. Sumera, *Praktyczny poradnik instalatora. Systemy fotowoltaiczne*, ATUM Sp. z o.o., Wrocław 2021.
- [2] A. Ochman, *Analiza porównawcza obliczeń teoretycznych i rzeczywistej pracy systemów fotowoltaicznych*, pr. magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2023.



Experimental study of the thermal conductivity of an innovative cellular composite manufactured using additive technology

Anna Piwowar, Beata Anwajler, Piotr Szulc

Wrocław University of Science and Technology,
Faculty of Mechanical and Power Engineering,
Department of Energy Conversion Engineering
e-mail: a.piwowar@pwr.edu.pl

Abstract

This paper presents a prototype of a cellular composite material fabricated by additive manufacturing technology and characterized by a complex internal core structure based on the Kelvin foam model. The thermal conductivity of the prototype material was experimentally determined as a function of the material used for printing, i.e. thermosetting resins with different degrees of transparency, reflectance, and emissivity, as well as variable layering of the composite. The optimal composition for the composite was determined by a multi-criteria ANOVA. The lowest possible thermal conductivity of the insulation was $0.0250 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ and the highest possible thermal resistance was $0.7926 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$. The innovative cellular composite produced by 3D printing technology has good insulating performance and could therefore be used to improve the energy efficiency of buildings, appliances, or equipment.

Keywords: thermal insulation, additive manufacturing, SLA, radiation, cellular structure, Kelvin cell, reflectance, transparency

1. Introduction

The world is currently experiencing rapid population growth. The needs and demands of a growing population are leading to the overuse of raw materials from natural resources. More than 300 million tons of plastics are produced worldwide each year, with Europe being the second largest producer. However, compared to the amount produced, only a small percentage is recycled [1]; the rest is incinerated, landfilled, or mismanaged. Therefore, there is an urgent need to reduce the amount of plastic waste generated, to identify strategies to integrate existing waste into value chains for reuse and recycling, and to promote a closed-loop economy [1]. It is necessary to implement sustainable development, which is the idea of using resources wisely so that future generations can benefit from them [2]. To implement this concept, it is necessary to manage energy wisely, including reducing its consumption and improving the efficiency of its use [3, 4]. The development of innovative insulation materials can help achieve these goals [5].

The development of modern, sustainable insulation materials should consider their environmental impact and the use of the raw materials from which they are made. The production process should consume as little energy as possible, generate a minimum of post-production waste, or provide waste for reuse [6]. These conditions can be met by using additive manufacturing techniques (AM), which have many environmental advantages over conventional manufacturing methods: they generate less material loss and their manufacturing processes consume less energy and emit less greenhouse gas [7]. Of the various technologies included in AM, selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM), and fused deposition modeling (FDM) are the most widely used [8]. Reusable and recyclable building materials are available, such as plastic products based on recycled polymers and metal [9]. 3D printing is envisioned as a technology that will enable robotic printing of structures on the moon or Mars. Industrially, the technology has evolved in several directions – there are now advanced materials, better quality materials, larger workspaces, and new additive technologies, including 3D concrete printing (3DCP).

With the capabilities of AM or 3D printing, it is possible to achieve complex geometries that would be difficult with conventional construction techniques [10]. By controlling the internal geometry and the combination of filling percentages, 3D printing allows both the optimization of thermal conductivity and the creation of lighter components [11–13], as demonstrated by experiments conducted by various researchers [5, 14–22].

Most studies in the available literature on the use of polymer fibers for AM focus on mechanical properties related to structural elements [11, 23]; only a few studies are dedicated to thermal properties [23, 24]. In addition, existing artificial insulations have less complex structures than naturally occurring composites [10, 25, 26]. Composites with a layered structure are often used [18], with a low-density core and rigid layers stacked on the outside. The core

can be formed into closed or open foam structures or periodic structures [18, 27]. Islam et al. [14] investigated PLA filament thermal insulation materials using FDM printing technology. The authors showed that they have good insulating properties, as evidenced by thermal conductivity values ranging from $0.037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ to $0.070 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. De Rubeis et al. [15–17] studied the insulation capacities of blocks with different internal structures printed from PLA filament using FDM technology, and how these capacities are affected by filling these blocks with waste materials such as polystyrene, sawdust, wool, and hemp. It was shown that of all the internal structures tested, the most complex honeycomb structure provided the best insulating properties (transmittance value of $1.22 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$). In addition, filling the honeycomb block with waste insulation materials significantly improved its insulating properties, resulting in a reduction in the transmittance to a value of $0.53 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, or about 57%.

Extensive research in the field of printed insulation materials has been carried out by Anwajler [5, 18–22], who studied different variants of polymer composites printed using FDM and SLS technologies. The researcher analyzed the effect of infill structures and layering of the composites on the insulation performance. Their research proved that the printed composites can be successfully used as insulation materials, for which the thermal conductivity coefficients can be as low as $0.023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

The authors [21] analyzed the effect of the number of layers in a composite and the porosity and pore diameter in the geometry of its core structure on its thermal insulation properties. They designed and tested cellular interlayer composites whose core is characterized by an ideal, periodic, and isotropic structure based on the Kelvin model. Specimens made of nylon by SLS additive technology were studied [21]. The purpose of this study is to experimentally determine the dependence of the thermal conductivity coefficient of prototype cellular composites made by stereolithography (SLA) on the printing material in use, i.e., thermosetting resins with different degrees of transparency, reflectance, and emissivity, and variable layering of the composite. In addition, the effect of the 3D printing technology on the thermal properties was determined for the composites tested and described in this paper (SLA printing) and the prototype composites described in [21] (SLS printing).

2. Heat transfer in insulation – the influence of type of material used for printing

Heat flow through insulation is a very complex phenomenon. It consists of heat conduction in the gas and solid component, radiative heat transfer within the components, and convection and movement of moisture in the pores, associated with sorption and desorption. Accordingly, the quantity used to

evaluate the quality of thermal insulation – the effective thermal conductivity coefficient λ – is a complex function of pressure, temperature, chemical composition of the solid and gases, porosity, particle shape and dimensions, and many other factors [28, 29].

Insulating materials accomplish their purpose through mechanisms that reduce the contribution of each component to the total heat transfer. Conduction and convection are typically reduced by using a structure with a large number of tiny, gas-filled spaces, while radiation is reduced by low-emissivity surfaces designed to reflect radiant heat [28, 30, 31]. The emissivity (ϵ) of a material is strongly related to the properties of its surface. Emissivity values range from 0 (ideal reflector/mirror) to 1 (ideal emitter/black body) [32].

Note that emissivity (ϵ) can only be considered a surface phenomenon for opaque materials, where thermal radiation is absorbed or emitted in the first few microns of the surface; in the case of transparent bodies, radiation is not a surface phenomenon. Therefore, when studying radiative properties, it is necessary to consider not only the emissivity, but also the absorptivity, reflectivity, and transmittance of the materials [33]. Some materials can be considered transparent, semi-reflective, or semi-absorbent according to equation (1) [30]:

$$1 = \tau + \rho + \alpha \quad (1)$$

where:

- τ is the transmittance of radiation,
- ρ is the reflectance, and
- α is the absorptance of radiation.

In general, if the material is more reflective, it is also less transparent. Metallized materials are characterized by high reflectivity, with $\rho = 0.95$, $\tau = 0.0$, and $\epsilon = 0.85$.

In this paper, different types of resins are considered: transparent, white, grey, black, and metallized. Each of them has different degrees of transparency, reflectance, and emissivity. In addition, the materials described above were combined with the experimental determination of the thermal properties of 1-, 2-, and 3-layer versions of cellular composites (Fig. 1). Heat transfer through this type of insulation, in addition to the convection and conduction forces of the material, strongly depends on selected material properties related to radiative heat transfer processes.

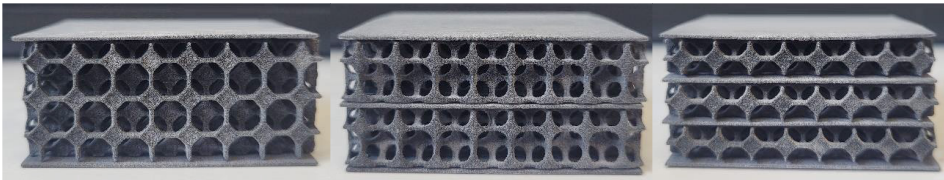


Fig. 1. Structure of the 1-, 2-, and 3-layer versions of the open-cell core composites with the parameters $d = 6$ mm and $P = 0.90$ [21]

3. Materials and methods

The subject of the study is sandwich composites with a core structure based on the idealized foam model proposed in 1887 by William Thomson (Lord Kelvin) [34]. In this model, the foam consists of equal cells: modified truncated octahedrons (polyhedrons composed of six square and eight hexagonal faces), in which the hexagonal faces have zero mean curvature and the square faces are flat with outwardly curved edges, as shown in Fig. 2 [35].

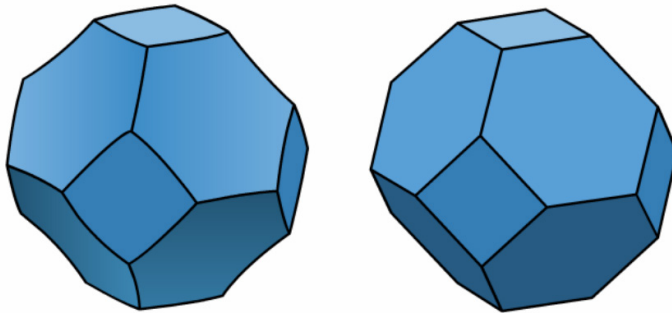


Fig. 2. A Kelvin cell and the truncated octahedron on which the cell is based [35]

The study analyzed the thermal properties of single-, double-, and triple-layer composites. The core structure of the composites consisted of simplified Kelvin cells (in which the curvature of the edges was omitted) cut with a sphere of given diameter d (Fig. 3).

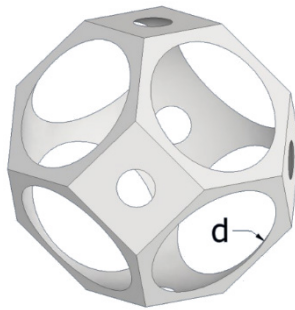


Fig. 3. A single core cell of the sandwich composites [21]

3.1. Samples

Samples with the lowest thermal conductivity and printability were selected for testing from those described in [21]. Single-layer, double-layer, and triple-layer samples with porosity $P = 0.95$ and pore diameter $d = 6$ mm printed

from transparent, white, grey, black, and metallized resin were analyzed. An Elegoo Mars 3 Pro printer was used for 3D printing. A comparison of samples made from different resin colors is shown in Fig. 4.

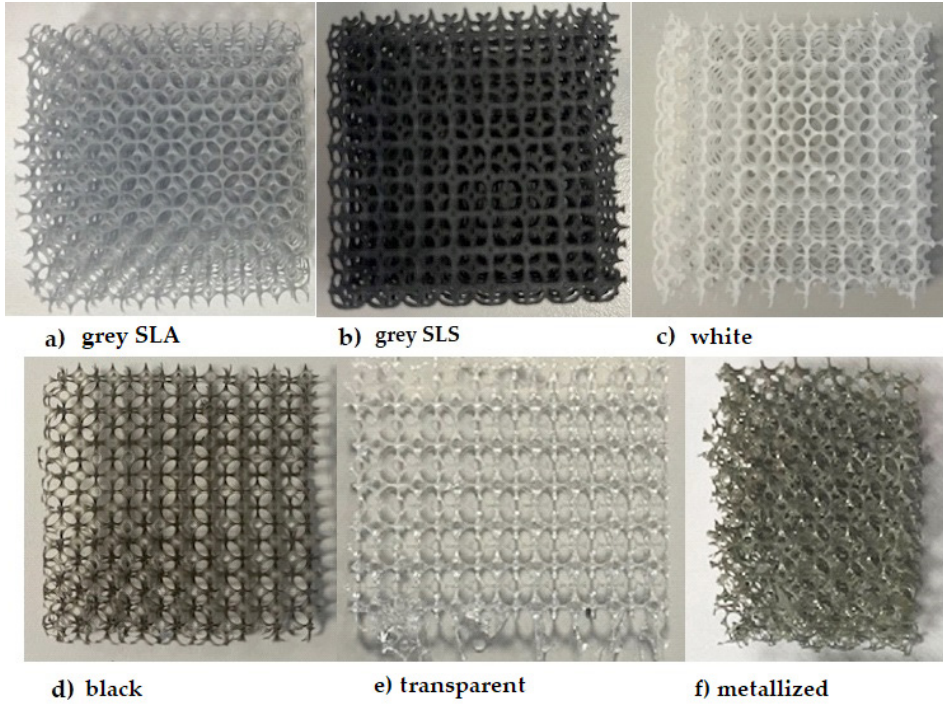


Fig. 4. Comparison of composites made of different colored resins

3.2. Test stand and experiment description

The thermal conductivity coefficient values were determined experimentally for each of the prototype composite samples. The measurements were performed in accordance with ISO 9869-1:2014 [36] on an existing test bench at the Department of Energy Conversion Engineering, Faculty of Mechanical and Power Engineering at Wrocław University of Science and Technology, the schematic diagram of which is shown in Fig. 5.

During the measurements, the test samples were placed in a hole in the lid of an Aisberg LP15 C15 refrigerator-freezer so that the bottom wall was in direct contact with the interior of the refrigerator-freezer and the top wall was in contact with the environment. Heat was forced to flow through the sample by the temperature difference between the environment and the interior of the refrigerator-freezer. The value of the heat flux density flowing through the insulation under test was measured using an FHF04SC heat flux sensor,

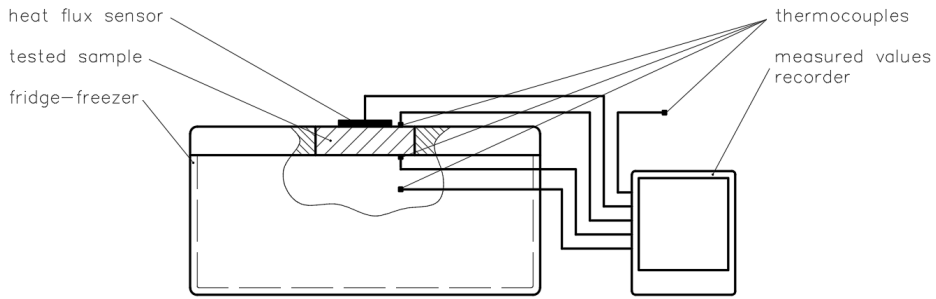


Fig. 5. Schematic diagram of the measuring station

and the data was recorded. During the measurements, the temperatures on the exterior walls of the test specimen, the temperature inside the refrigerator-freezer, and the ambient temperature were also continuously measured and recorded. The accuracy of the measuring instruments is given in Table 1.

Table 1. Accuracy of the measuring instruments

Measuring device	Accuracy
K-type thermocouple	0.1 K
FHF04SC heat flux sensor	11 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Vernier caliper	0.05 mm

Thermal equilibrium was established in order to take the measurements; the ambient temperature was $+20^\circ\text{C}$ and the temperature inside the refrigerator-freezer was -20°C . Both temperature values were selected as typical operating conditions of thermal insulation for buildings, the food industry, and frozen food transportation [20]. Based on the measurements, the values of thermal conductivity λ and thermal resistance R were calculated.

4. Results and discussion

The experiment was conducted using a full factorial design, which allowed the main effects and all possible interactions (including those of the highest order) to be identified. The experiment was conducted using a complete design with three input factors and 18 sets of five replicates. Statistical analysis was performed using the tools available in STATISTICA 13 (TIBCO Statistica, Palo Alto, CA, USA). A significance level of $p \leq 0.05$ was adopted (this value is typically used in thermal insulation studies). For the experimental data values, measures of position and dispersion were first determined; their summary results are shown in Table 2.

Table 2. Descriptive statistics of the coefficients for thermal conductivity (λ) and thermal resistance (R)

	M	Me	Min	Max	SD	Sk
λ , W/(m·K)	0.0399	0.0419	0.0250	0.0559	0.0083	0.0754
R , (m ² ·K)/W	0.5257	0.4774	0.3572	0.7926	0.1204	0.7037

Min – Minimum, Max – Maximum, M – Mean, SD – Standard Deviation, Me – Median, Sk – Squared.

The values of λ (Table 2) ranged from 0.0250 to 0.0559 W/(m·K), with a mean of 0.0399 W/(m·K) and a standard deviation of 0.0083 W/(m·K). Half of the samples tested were 0.0419 W/(m·K) or less. On the thermal resistance scale, the results ranged from 0.3572 to 0.7926 (m²·K)/W and the average was 0.5257 (m²·K)/W with a standard deviation of 0.1204 (m²·K)/W. Half of the samples had a result of 0.4774 (m²·K)/W or less. The high skewness indicated that the results for most of the samples were low and concentrated around the mean. Next, it was determined whether the effect of the input magnitude on the output was significant. A four-factor analysis of variance (ANOVA) (including interactions up to the fourth order) was used to determine this effect. The results are summarized in Tables 3 and 4 and Figs. 6 and 7.

Table 3. Quantitative evaluation of main effects and interaction effects – identification of the effect of dominant and statistically significant inputs on the dependent variable λ

Symbol that Identifies the Input Factors	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Absolute term	0.0644	1	0.0644	13695.43	0.00
SLA/SLS	0.0017	1	0.0017	361.19	0.00
ε	0.0032	4	0.0008	169.89	0.00
n	0.0020	2	0.0010	209.60	0.00
Error	0.0004	82	0.00001		

SS – sum-of-squares, *df* – degrees of freedom, *MS* – mean square, *F* – F ratio, *p* – significance level (*p*-values).

Table 4. Quantitative evaluation of main effects and interaction effects – identification of the effect of dominant and statistically significant inputs on the dependent variable R

Symbol that identifies the input factors	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Absolute term	5.607	1	5.6066	3967.12	0.00
SLA/SLS	0.3676	1	0.3676	260.11	0.00
ε	0.6560	4	0.1640	116.04	0.00
n	0.3839	2	0.1920	135.83	0.00
Error	0.1159	82	0.0014		

SS – sum-of-squares, *df* – degrees of freedom, *MS* – mean square, *F* – F ratio, *p* – significance level (*p*-values).

The p-values lower than 0.05 (the last column of the table) indicate that the type of 3D technology, the type of material (ϵ), and the number of layers in the composite (n) had a significant influence on the thermal conductivity and thermal resistance of the composites. The dependence of the thermal conductivity coefficient (λ) on the type of composite material and the number of structural layers was determined. The same was done for the thermal resistance (R).

The results of the ANOVA (Tables 3 and 4) showed the influence of the type of 3D technology, the material used (ϵ), and the application of composite layers (n) on the thermal conductivity (λ) and thermal resistance (R). The analysis also showed the statistical significance of the interaction of the linear factors. In summary, the best insulating properties of the prepared composites are characterized by the best material used for testing and the best value of the number of layers in the resulting composite. Each input factor is optimized independently.

Figures 6 and 7 show a graphical comparison of the results, along with measurement uncertainties, which ranged from 0.001 W/(m·K) to 0.003 W/(m·K) for λ and from 0.02 (m²·K)/W to 0.04 (m²·K)/W for R . The grey resin samples prepared by SLA technology had lower thermal conductivity and thus higher thermal resistance than the grey nylon samples prepared by SLS additive technology, and the difference in the results was large. The metallized resin samples had the lowest thermal conductivity, and thus the highest thermal resistance, among the resin samples. The transparent and black resin composites had the highest thermal conductivity, and thus the lowest thermal resistance. This indicates that the SLA-printed metallized resin composite had better insulating properties. The above graphs also show the relationship between the number of layers (n) in the composite and the values of thermal

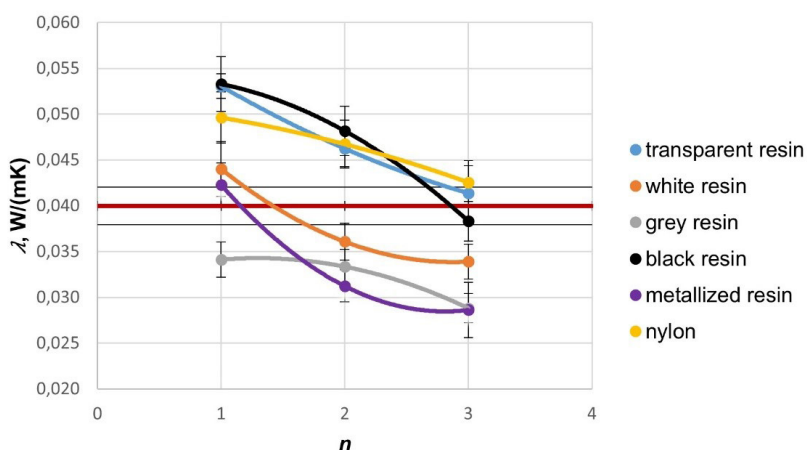


Fig. 6. Effect of the type of plastic used and the number of composite layers (n) on the thermal conductivity coefficient (λ) for prototype cellular materials (burgundy line – open-cell PUR foam)

conductivity and thermal resistance. Samples with three layers had a lower thermal conductivity and thus a higher thermal resistance than samples with two or one layer. The difference in the results was moderately large.

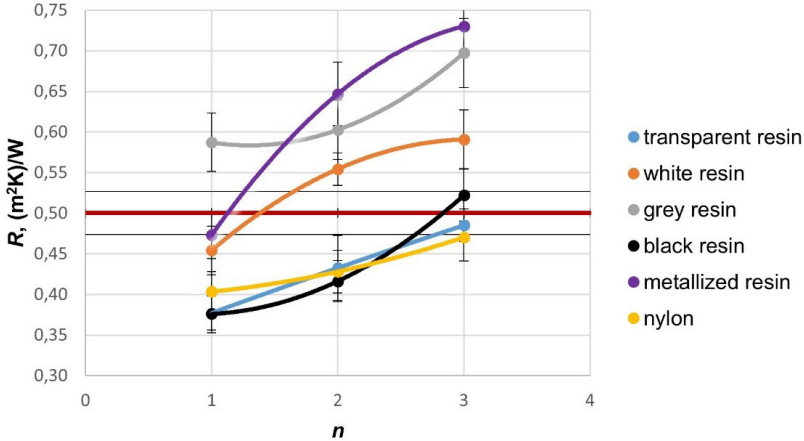


Fig. 7. Effect of the type of plastic used and the number of composite layers (n) on the thermal resistance (R) for prototype cellular materials (burgundy line – open-cell PUR foam)

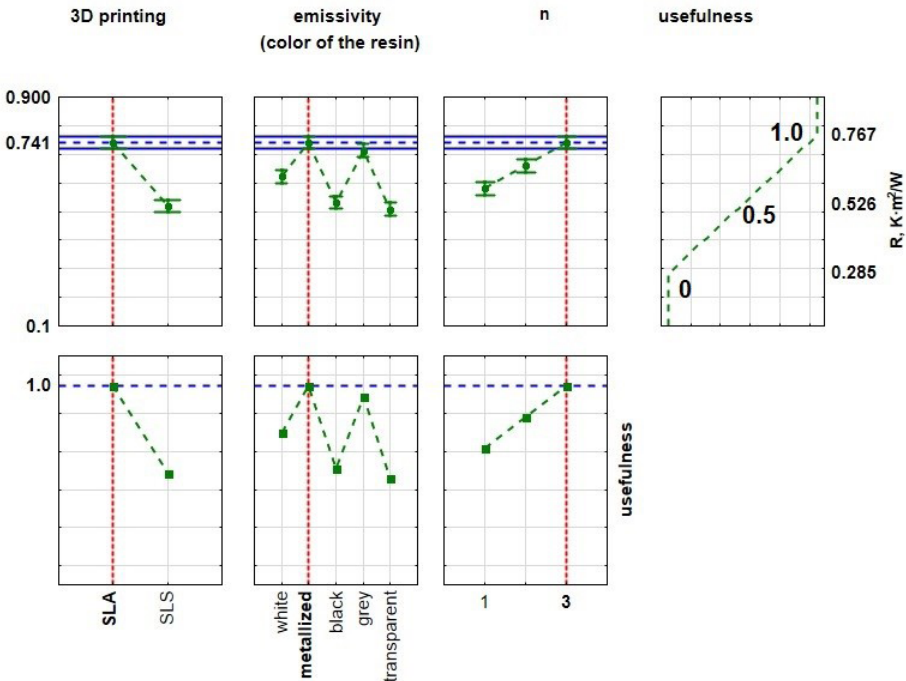


Fig. 8. Graphical interpretation of the optimization of composite structures based on the thermal resistance coefficient (R)

In order to optimize the structure of the composites, lower, middle, and upper values were calculated for the thermal resistance coefficients. The lower and upper values were assigned as practical values. When maximizing the value of a given parameter (max criterion), the upper value was assigned a practical value of 1.0 and the lower value a practical value of 0. Since the practical values vary linearly between these limits, the intermediate value was assigned a practical value of 0.5. The extreme mean values of the thermal resistance coefficient are shown in Fig. 8. Since the values of the thermal resistance coefficient (R) were relatively homogeneous, the lowest value of the thermal resistance coefficient was used as a criterion for determining the best insulating properties of the composite. The most useful material had a structure with the best thermal insulation properties.

5. Summary

Based on the multicriteria analysis, the optimal composition of the composite was determined. The lowest thermal conductivity was obtained for prototypes of insulating partitions with a Kelvin foam structure made by 3D printing SLA technology from metallized resin with parameters $d = 6$ mm, $P = 0.90$, and 3-layer. The lowest possible thermal conductivity of the insulation was 0.025 W/(m·K) and the highest possible thermal resistance was 0.7926 (m²·K)/W. Analyzing the results, it was possible to obtain the desired value of thermal conductivity (lower than 0.045 W/(m·K), which is the accepted upper limit for thermal insulation materials) for most of the samples. The prototype insulating partition with a Kelvin foam structure had good insulating properties.

Statistical analysis of the experimental results allowed us to optimize the composition of the composite according to the criteria we set. The research, which determined the thermal properties of the prototype structures, prompted us to conduct the next stage of research, the purpose of which is to determine the mechanical properties of the structures and the possibility of using degradable and biodegradable plastics in their manufacture.

Literature

- [1] R. Geyer, J. Jambeck, K.L. Law, *Production, use, and fate of all plastics ever made*, „Science Advances” 2017, Vol. 3, No. 7.
- [2] A. Malik, M.I. Ul Haq, A. Raina, K. Gupta, *3D printing towards implementing Industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges*, „Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application” 2022, Vol. 49, No. 3, s. 491–511.

-
- [3] A. Zakari, I. Khan, D. Tan, R. Alvarado, V. Dagar, *Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs)*, „Energy” 2022, Vol. 239.
- [4] F. Hu, S. Wu, Y. Sun, *Hollow-structured materials for thermal insulation*, „Advanced Materials” 2018, No. 38.
- [5] B. Grabowska, K. Wiśniewski, K. Bawolski, *Propozycja materiału termoizolacyjnego inspirowanego naturą w technologii druku 3D*, „Chłodnictwo & Klimatyzacja” 2019/2020, No. 12/01, s. 60–63.
- [6] A. Santoni, P. Bonfiglio, P. Fausti, C. Marescotti, V. Mazzanti, F. Mollica, F. Pompoli, *Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres*, „Applied Acoustics” 2019, Vol. 150, s. 279–289.
- [7] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, R. Suman, S. Rab, *Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability*, „Advanced Industrial and Engineering Polymer Research” 2021, No. 4, s. 312–322.
- [8] A. Kafle, E. Luis, R. Silwal, H.M. Pan, P.L. Shrestha, A.K. Bastola, *3D/4D printing of polymers: fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA)*, „Polymers” 2021, Vol. 13, No. 18.
- [9] H. Dodziuk, *Druk 3D/AM: Zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.
- [10] D. Delgado Camacho, P. Clayton, W. O’Brien, R. Ferron, M. Juenger, S. Salamone, C. Seepersad, *Applications of additive manufacturing in the construction industry – a forward-looking review*, 34rd ISARC, Taipei 2017.
- [11] V. Shanmugam, O. Das, R.E. Neisiany, K. Babu, S. Singh, M.S. Hedenqvist, F. Berto, S. Ramakrishna, *Polymer recycling in additive manufacturing: an opportunity*, „Materials Circular Economy” 2020, Vol. 2, No. 11.
- [12] J.V. Carstensen, M. Ganobjak, *Topology-optimized design of building component with improved thermal and stiffness properties*, IASS Symposium, Boston 2018.
- [13] M. Sarakinioti, T. Konstantinou, M. Turrin, M. Tenpierik, R. Loonen, M. de Klijn-Chevalerias, U. Knaack, *Development and prototyping of an integrated 3D-printed façade for thermal regulation in complex geometries*, „Journal of Façade Design and Engineering” 2018, Vol. 6, No. 2, s. 29–40.
- [14] S. Islam, G. Bhat, Sikdar, *Thermal and acoustic performance evaluation of 3D-printable PLA materials*, „Journal of Building Engineering” 2023, Vol. 67.
- [15] T. de Rubeis, *3D-printed blocks: thermal performance analysis and opportunities for insulating materials*, „Sustainability” 2022, Vol. 14, No. 3.
- [16] T. de Rubeis, A. Ciccozzi, L. Giusti, D. Ambrosini, *The 3D printing potential for heat flow optimization: influence of block geometries on heat transfer processes*, „Sustainability” 2022, Vol. 14, No. 23.
- [17] T. de Rubeis, A. Ciccozzi, G. Pasqualoni, D. Paoletti, D. Ambrosini, *On the use of waste materials for thermal improvement of 3D-printed block – an experimental comparison*, „Buildings” 2023, Vol. 13, No. 5.
- [18] B. Grabowska, J. Kasperski, *The thermal conductivity of 3D printed plastic insulation materials – the effect of optimizing the regular structure of closures*, „Materials” 2020, Vol. 13, No. 19.

- [19] B. Anwajler, R. Spychaj, P. Wójcik, A. Piwowar, *Doświadczalne wyznaczenie właściwości cieplnych prototypowych materiałów izolacyjnych wykonanych technologią druku 3D*, „Rynek Energii” 2021, No. 6, s. 44–51.
- [20] B. Anwajler, *The thermal properties of a prototype insulation with a gyroid structure – optimization of the structure of a cellular composite made using SLS printing technology*, „Materials”, Vol. 15, No. 4.
- [21] B. Anwajler, A. Piwowar, *Bioniczny kompozyt komórkowy o właściwościach izolacyjnych wykonany w technologii addytywnej, SLS*, „Izolacje” 2023, Vol. 28, No. 1, s. 116–123.
- [22] B. Anwajler, M. Szkudlarek, *Właściwości cieplne materiałów o strukturze TPMS wykonanych w technologii druku addytywnego SLS*, „Rynek Energii” 2023, No. 1, s. 11–20.
- [23] P. D’Aprile, H. Engel, G. van Gendt, S. Helmcke, S. Hieronimus, T. Naucér, D. Pinner, D. Walter, M. Witteveen, *Net-Zero Europe: decarbonization pathways and socioeconomic implications*, New York: McKinsey and Company, 2020.
- [24] K. Kamau-Devers, V.R. Yanez, V.W. Medina Peralta, S.A. Miller, *Using internal micro-scale architectures from additive manufacturing to increase material efficiency*, „Journal of Cleaner Production” 2021, Vol. 291, No. 12.
- [25] D. Kumar, A. Morshed, P.X.W. Zou, J.G. Sanjayan, R.A. Memon, *Comparative analysis of building insulation material properties and performance*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2020, Vol. 131, No. 7.
- [26] M. Pérez, D. Carou, E.M. Rubio, R. Teti, *Current advances in additive manufacturing*, „Procedia CIRP”, 2020, Vol. 88, s. 439–444.
- [27] T.J. Lu, H.A. Stone, M.F. Ashby, *Heat transfer in open-cell metal foams*, „Acta Materialia” 1998, Vol. 46, No. 10, s. 3619–3635.
- [28] J. Górzynski, *Przemysłowe izolacje cieplne*, Wydawnictwo Sorus, Poznań 1996.
- [29] P. Furmański, T.S. Wiśniewski, J. Banaszek, *Izolacje cieplne: mechanizmy wymiany ciepła, właściwości cieplne i ich pomiary*, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej, Warszawa 2006.
- [30] B. Grabowska, J. Kasperski, *Modeling of thermal properties of thermal insulation layered with transparent, opaque and reflective film*, „Journal of Thermal Science” 2018, No. 27, s. 463–469.
- [31] L. Aditya, T.M.I. Mahlia, B. Rismanchi, H.M. Ng, M.H. Hasan, H.S.C. Metselaar, O. Muraza, H.B. Aditiya, *A review on insulation materials for energy conservation in buildings*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2017, Vol. 73, s. 1352–1365.
- [32] E. Barreira, R.M.S F. Almeida, M.L. Simões, *Emissivity of Building Materials for Infrared Measurements*, „Sensors” 2021, Vol. 21, No. 6.
- [33] Y.A. Cengel, *Heat transfer: a practical approach*, 2nd ed., McGraw Hill, New York 2002.
- [34] K. Reimer, *Skandal z pianą, czyli Afrodyta topologiczna*, „Delta” 2015, No. 10.
- [35] J.P.J. Brennan-Craddock, G.A. Bingham, R.J.M. Hague, R.D. Wildman, *Impact Absorbent Rapid Manufactured Structures (IARMS)*, International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2008.

- [36] Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. Part 1: Heat flow meter method, ISO 9869-1:2014, 2014.



Metoda badania charakterystyk statycznych silników momentowych do serwozaworów proporcjonalnych stosowanych w lotnictwie

Wojciech Pluciński¹, Marcin Cis²

¹ Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Katedra Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej

e-mail: wojciech.plucinski@pwr.edu.pl

² UTC Aerospace Systems Wrocław Sp. z o.o.

e-mail: marcin.cis@collins.com

Streszczenie

Silniki momentowe charakteryzują się wysoką czułością i niezawodnością. Jako element serwozaworu elektrohydraulicznego umożliwiają przetworzenie sygnału prądowego małej mocy na reakcję mechaniczną w postaci generowanego momentu obrotowego i przemieszczenia. Od silników momentowych wymaga się dużej dokładności, proporcjonalnej charakterystyki $T = f(\theta, I)$, małej histerezy i odporności na zakłócenia wynikające ze środowiska ich pracy. Ze względu na charakterystykę silnika momentowego, ograniczony zakres ruchu zwory magnetycznej i duże wartości generowanego momentu w stosunku do wymiarów przetwornika badanie tego typu obiektu wymagało opracowania nowych metod badawczych.

W niniejszym rozdziale opisano zagadnienie modelowania obwodu silnika momentowego oraz analizy jego charakterystyki statycznej. Omówiono również stanowisko badawcze zbudowane w celu weryfikacji oraz walidacji opracowanego modelu teoretycznego silnika momentowego opartego na Metodzie Elementów Skończonych (MES). Zaprezentowana metoda badawcza została zweryfikowana

i potwierdzona na drodze eksperymentu. Scharakteryzowano także silnik momentowy przeznaczony do zastosowań w elektrohydraulicznych wzmacniaczach proporcjonalnych instalowanych w układach i hydrostatycznych napędach lotniczych.

Słowa kluczowe: silnik momentowy, serwowzawór elektrohydrauliczny, Metoda Elementów Skończonych (MES), mapa momentów, JMAG®

1. Wstęp

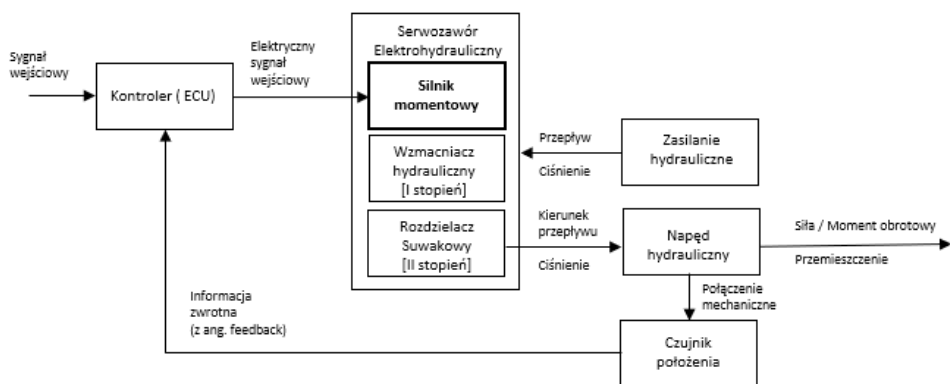
Układy elektrohydrauliczne cieszą się niesłabnącą popularnością w wielu gałęziach przemysłu. Do ich niewątpliwych zalet należą: wysoka wydajność, zwartość konstrukcji, mała masa na jednostkę generowanej mocy, wysoka niezawodność [3]. Zastosowanie tych układów jest szczególnie rekomendowane w przemyśle ciężkim, lotniczym, energetycznym i wszędzie tam, gdzie niezawodność i trwałość napędu jest kluczowa dla zapewnienia bezpieczeństwa. Układy elektrohydrauliczne ze względu na liczne zalety typowe dla napędów hydrostatycznych i sterowania w pętli regulacji są stale rozwijane i udoskonalane. Nierozłącznym elementem napędów hydrostatycznych w nowoczesnych układach hydraulicznych w technice sterowania proporcjonalnego są elektrohydrauliczne rozdzielacze proporcjonalne nazywane często serwowzaworami.

Koncepcja elektrohydraulicznego serwowzaworu umożliwiła zintegrowanie hydrostatycznych napędów hydraulicznych z elektrycznymi i elektronicznymi sterownikami w układach regulacji automatycznej. Zastosowanie elektrohydraulicznych serwowzaworów proporcjonalnych, zwanych również wzmacniaczami elektrohydraulicznymi, w układach sterowania na statkach powietrznych miało miejsce w latach 50. XX w. [8]. Od tego czasu obserwuje się stale postępującą integrację elementów hydraulicznych, pneumatycznych, elektronicznych i sensorów, a także rozwiązań z zakresu informatyki w obszarze hydrotroniki [4, 5]. Dziś serwowzawory są powszechnie stosowane w systemach FBW (Fly By Wire) i FADEC (Full Authority Digital Engine Control) w większości komercyjnych statków powietrznych (Commercial Aircrafts) [6, 8]. W zależności od zastosowania elektrohydrauliczne serwowzawory mogą mieć różną budowę i charakterystykę. W podejściu ogólnym wyróżnia się: serwowzawory jednostopniowe, dwustopniowe, trójstopniowe, zawory kontrolujące ciśnienie lub przepływ [3]. Podstawowe typy serwowzaworów stosowanych w lotnictwie oraz ich ogólne charakterystyki hydrauliczne zostały opisane w normie ARP 490 (SAE Aerospace Recommended Practice).

W najczęściej stosowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych serwowzaworów pierwszy stopień hydrauliczny – wzmacniacz hydrauliczny lub dzielnik ciśnienia jest kontrolowany przez silnik momentowy, który jest spolaryzowanym przetwornikiem elektromechanicznym ze zwroną w obwodzie magne-

tycznym. Umożliwia on przetworzenie sygnału prądowego małej mocy na reakcję mechaniczną w postaci generowanego momentu obrotowego i przemieszczenie przesyłony, kierownicy albo rurki strumieniowej.

Silniki momentowe na przestrzeni lat ewoluowały zarówno pod względem architektury, jak i rozwiązań technologicznych stosowanych przy ich wytwarzaniu. W rozdziale skupiono się na silniku o zmiennej reluktancji z magnesami trwałymi, czyli wariancie wykorzystywanym między innymi przez Collins AS. Opisana metoda badania obwodów magnetycznych może mieć również zastosowanie i dla innych podobnych konstrukcji elektromechanicznych. Rolę silnika momentowego w przykładowym układzie elektrohydraulicznym ze sterowaniem proporcjonalnym przedstawiono na schemacie blokowym (rys. 1).



Rys. 1. Zastosowanie serwozaworu w napędzie hydrostatycznym

Mimo że koncepcja silnika momentowego współpracującego z elementem hydrauliki siłowej ma już kilkadziesiąt lat, nadal stanowi optymalne rozwiązanie spełniające wymagania typowe dla układów elektrohydraulicznych przeznaczonych do zastosowania na statkach powietrznych. Dodatkowo wraz z pojawieniem się nowych wymagań i wyzwań, jak: podwyższenie temperatury pracy dla urządzeń typu EMID's (Electro Mechanical Interface Devices) zabudowanych w gondolach silników, zmniejszenie gabarytów, poprawa dynamiki czy większa dokładność działania, pojawiła się potrzeba rozwinięcia narzędzi wspomagających wdrożenie przetworników nowej generacji. Wszystkie te nowe wymagania mobilizują producentów i badaczy do nieustannych prac prowadzonych nad poprawą właściwości opisywanego podzespołu, a także nad rozwojem i wprowadzaniem nowych materiałów ferromagnetycznych umożliwiających tworzenie coraz to doskonalszych produktów. Opisana metoda badawcza przedstawiona w niniejszym rozdziale wychodzi naprzeciw tym potrzebom.

W ramach aktualnie realizowanych prac wdrożeniowych rozwinięto metody badania i analizy silników momentowych o następujące zagadnienia:

- Model układu bazujący na równaniach algebraicznych dla obwodu elektromagnetycznego przetwornika.

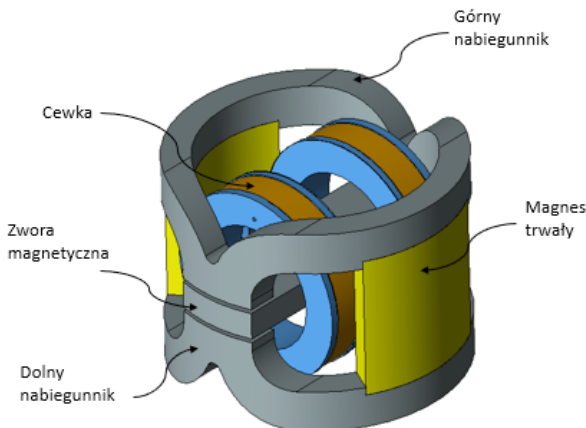
- Modelowanie obwodu silnika z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES).
- Badanie charakterystyki zbudowanego prototypu na opracowanym w tym celu stanowisku badawczym.

Modele matematyczne opisujące działanie silnika momentowego również w obszarze nieliniowym zostały zestawione i porównane z charakterystyką wykonanego prototypu.

2. Przedmiot badań

Badany silnik momentowy serwozaworu (rys. 2) składa się z elementów obwodu magnetycznego z magnesami trwałymi, elektromagnesu i elementów sprężystych. Obwód magnetyczny z magnesami trwałymi tworzy tzw. sprężynę magnetyczną. Elementy sprężyste (np. mostek skrętny) tworzą z kolei sprężynę mechaniczną balansującą reakcje sił pochodzenia magnetycznego i tym samym zapewniają stabilność asymptotyczną całego układu kinematycznego silnika. Dodatkowo na złożenie silnika momentowego składają się elementy strukturalne oraz uszczelniające, które tu zostały pominięte z powodu ich nieistotnego wpływu na charakterystykę przetwornika.

Obwód elektromagnetyczny silnika momentowego został zbudowany z pary jednakowych nabiegunników, zwory magnetycznej, uzwojenia w postaci dwóch cewek i magnesów trwałych. Taka konstrukcja umożliwi dwukierunkowe działanie przetwornika. Kierunek obrotu jest określony biegunowością prądu. Praca w układzie różnicowym ułatwia zapewnienie liniowej zależności między wartością generowanego momentu i przemieszczeniem kątowym a sygnałem prądowym w użytecznym zakresie pracy. Wykorzystanie dwóch niezależnych cewek połączonych równoległe, a także dwukanałowe sterowanie sygnałem prądowym znacznie podnosi niezawodność całego systemu.



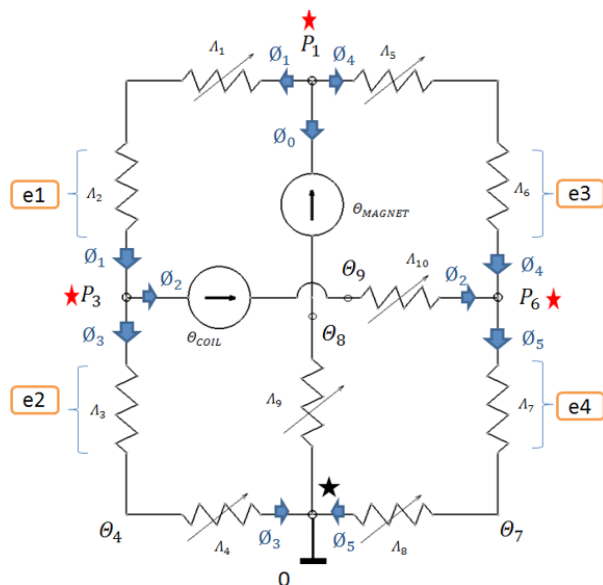
Rys. 2. Silnik momentowy wzmacniacza elektrohydraulicznego

Konstrukcja silnika momentowego zapewnia stabilne i powtarzalne pozycjonowanie elementu wykonawczego w funkcji sygnału sterującego w każdych warunkach pracy przewidzianych w specyfikacji wyrobu. Wyeliminowanie wpływu zakłóceń wynikających ze środowiska pracy, np. wibracji o amplitudzie do kilkuset metrów na sekundę do kwadratu w przedziale częstotliwości od kilku do kilkuset herców, było możliwe ponieważ położenie środka ciężkości ruchomych elementów pokrywa się z osią obrotu zwory.

Na potrzeby badań skonstruowano i zbudowano prototyp silnika momentowego o zmiennej reluktancji, umożliwiający weryfikację opracowanych modeli teoretycznych. Aby ułatwić opis matematyczny, w badanym silniku momentowym zachowano stały przekrój poprzeczny na długości magnetowodu. Ograniczono w ten sposób ryzyko pojawienia się lokalnych obszarów saturacji magnetycznej znacznie utrudniających symulację przy wykorzystaniu MES. Nabiegunniki oraz zwory w badanym przetworniku zostały wykonane z materiału ASTM A753-08 (type 2) oraz poddane obróbce cieplnej. Jako magnesów trwałych użyto stopu Alnico6 ze względu na ich łagodną i przewidywalną charakterystykę. Szczeliny powietrzne można regulować w przedziale od 0,20–0,65 mm. W prototypie nie zastosowano elementów sprężystych. Funkcję właściwego pozycjonowania zwory magnetycznej względem nabiegunników pełni uchwyt będący częścią stanowiska badawczego.

2.1. Model teoretyczny

Na podstawie analogii teorii obwodu magnetycznego do obwodu elektrycznego [1, 11] zastosowano reguły i przekształcenia umożliwiające wyznaczenie



Rys. 3. Schemat zastępczy połowy obwodu silnika momentowego

wartości sił magnetomotorycznych (SMM, θ) i strumieni magnetycznych (\emptyset) zgodnie z prawami Ohma i Kirchhoffa. Za metodę na wyprowadzenie układu równań niezależnych posłużyła metoda potencjałów węzłowych. Ponieważ silnik momentowy jest obiektem symetrycznym, skupiono się na zamodelowaniu połowy obwodu magnetycznego (rys. 3).

Formułowanie układu równań niezależnych i schemat rozwiązywania nieliniowego problemu przebiegał następująco:

Z definicji przewodności magnetycznej przyjęto oznaczenia

$$\Lambda = R^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

Λ – permeancja (przewodność magnetyczna),

R – reluktancja.

Układ równań niezależnych wyznaczony metodą potencjałów węzłowych po uporządkowaniu i pogrupowaniu zmiennych został opisany wzorem (2) w notacji macierzowej, co znacznie uprościło jego rozwiązanie metodą iteracyjną i umożliwiło zastosowanie jako narzędzia solwera nieliniowego na przykład w środowisku MATLAB®:

$$\begin{bmatrix} (\Lambda_9 + \Lambda_{12} + \Lambda_{56}) & (-\Lambda_{12}) & (-\Lambda_{56}) \\ (\Lambda_{12}) & (-\Lambda_{12} - \Lambda_{10} - \Lambda_{34}) & (\Lambda_{10}) \\ (\Lambda_{56}) & (\Lambda_{10}) & (-\Lambda_{56} - \Lambda_{10} - \Lambda_{78}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_3 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{\text{magnet}} \cdot \Lambda_9 \\ \theta_{\text{coil}} \cdot \Lambda_{10} \\ -\theta_{\text{coil}} \cdot \Lambda_{10} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$P_{1,2,3}$ – potencjał SMM w węzłach, a

$$(\Lambda_{12}) = \frac{1}{R_1 + R_2}; (\Lambda_{56}) = \frac{1}{R_5 + R_6}; (\Lambda_{34}) = \frac{1}{R_3 + R_4}; (\Lambda_{78}) = \frac{1}{R_7 + R_8} \quad (3)$$

to przewodności magnetyczne.

W rzeczywistym obwodzie elektromagnetycznym połowy silnika momentowego dla permeancji i reluktancji nieliniowych układ równań przybrał uogólnioną postać:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} (f_6(\theta_6, S_6, l_6) + f_1(\theta_1, S_1, l_1) + f_2(l_2)) + (f_5(\theta_5, S_5, l_5) + f_4(l_4)) \\ (f_1(\theta_1, S_1, l_1) + f_2(l_2)) \\ (f_5(\theta_5, S_5, l_5) + f_4(l_4)) \end{bmatrix}}_{[C]} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} - (f_1(\theta_1, S_1, l_1) + f_2(l_2)) \\ (-f_1(\theta_1, S_1, l_1) + f_2(l_2)) - f_{12}(\theta_2, S_{20}, l_{20}) - (f_2(l_2) + f_4(\theta_2, S_2, l_2)) \\ (f_{20}(\theta_2, S_{20}, l_{20})) \end{bmatrix}}_{[A]} = \underbrace{\begin{bmatrix} - (f_5(\theta_5, S_5, l_5) + f_4(l_4)) \\ (f_{20}(\theta_2, S_{20}, l_{20})) \\ (-f_5(\theta_5, S_5, l_5) + f_4(l_4)) - f_{12}(\theta_2, S_{20}, l_{20}) - (f_2(l_2) + f_4(\theta_2, S_2, l_2)) \end{bmatrix}}_{[B]} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_3 \\ P_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

- [A] – uogólniona macierz przewodności,
- [B] – macierz potencjałów węzłowych (SMM),
- [C] – macierz źródeł strumieni magnetycznych.

Szukany rozwiązaniem dla układu równań (2) i (4) była macierz [B], czyli wektor potencjałów sił magnetomotorycznych (SMM) w węzłach P_1, P_3, P_6 :

$$[\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{B}] = [\mathbf{C}] \quad (5)$$

$$[\mathbf{B}] = [\mathbf{A}^{-1}] \cdot [\mathbf{C}]$$

Założono, że pole przekroju poprzecznego magnesu jest stałe na całej jego długości (l) i rozkład natężenia pola magnetycznego (H) jest równomierny w objętości magnesu, przyjęto różnicę potencjałów siły magnetomotorycznej (SMM) między dwoma biegunami magnesu równą:

$$\theta = \oint_l H \cdot dl \quad (6)$$

Dla analizowanych przypadków uśredniona indukcja magnetyczna w magnesie mieściła się 0,85–1,1316 T.

Reluktancję rdzenia wyrażono funkcją nieliniową zależną od trzech argumentów: długości (l), strumienia magnetycznego (θ), przekroju poprzecznego rdzenia (S):

$$R = f(\theta, S, l) \quad (7)$$

$$R = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} \quad (8)$$

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych określono zależność indukcji magnetycznej w ośrodku w funkcji natężenia pola magnetycznego. Z wykorzystaniem wyznaczonej krzywej magnesowania pierwotnego $B = f(H)$ opisano zależność przenikalności magnetycznej od indukcji magnetycznej następującym wzorem:

$$\mu_r \cdot \mu_0 = f(B) = f\left(\frac{\theta}{S}\right) \quad (9)$$

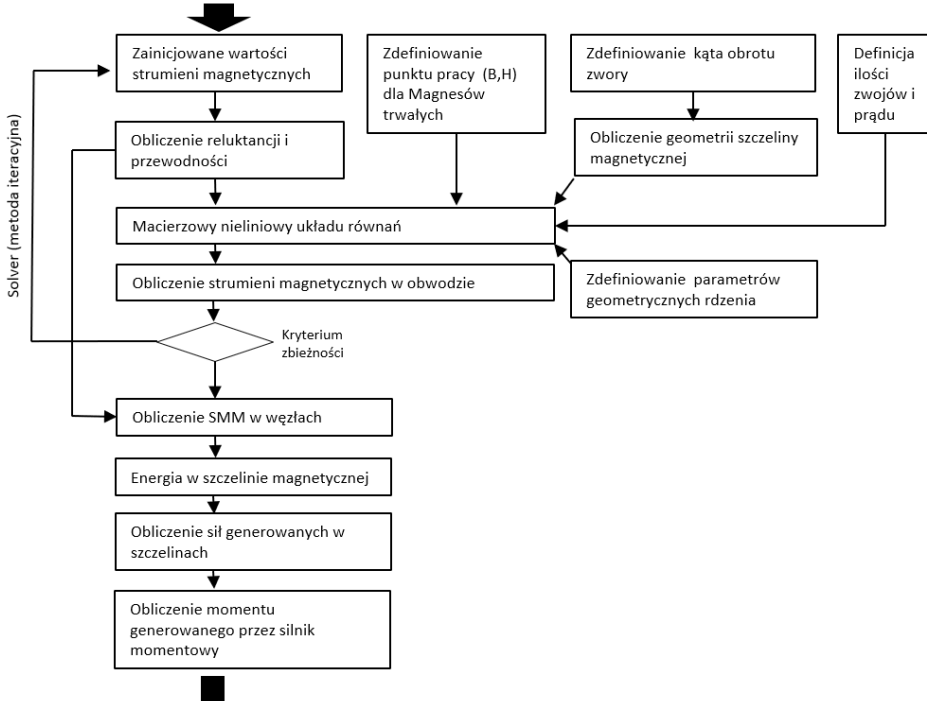
A zależność reluktancji od geometrii magnetowodu i strumienia magnetycznego – wielomianem trzeciego stopnia:

$$R_{\text{gen}} = \frac{l}{a \cdot \frac{\theta^3}{S^2} - b \cdot \frac{\theta^2}{S} + c \cdot \theta + d \cdot S} \quad (10)$$

gdzie: R_{gen} – opisuje uogólnioną reluktancję dla elementu, stałe a, b, c – określają współczynniki wielomianu wyznaczone empirycznie. W przypadku stopu ASTM A753-08 (type 2) w warunkach RT zastosowano zależność

$$R_{A75308} = \frac{l}{0,1436 \frac{\varnothing^3}{S^2} - 0,487 \frac{\varnothing^2}{S} + 0,386\varnothing + 0,0085S} \quad (11)$$

Dla wartości przenikalności względnej μ_r uwikłanych w macierzowy układ równań zastosowano metodę iteracyjną według algorytmu przedstawionego na rys. 4.



Rys. 4. Algorytm dla metody iteracyjnej

Po wyznaczeniu wartość strumienia magnetycznego przepływającego przez szczelinę magnetyczną, np. e_1 według schematu przedstawionego na rys. 3, określono spadki siły magnetomotorycznej

$$\theta_{e_1} = -\varnothing_{e_1} \cdot R_{e_1} \quad (12)$$

Energię w szczelinie magnetycznej z wykorzystaniem prawa zachowania energii magnetycznej wyznacza się ze wzoru:

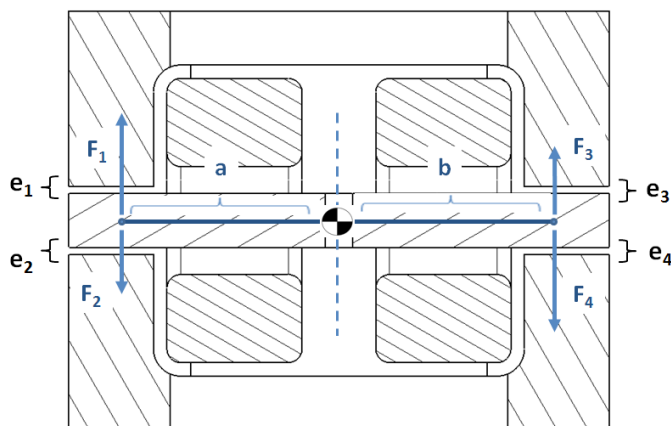
$$E_{\text{air gap}} = \oint \theta \cdot \varnothing dh \quad (13)$$

Przyjęto z zastosowaniem prawa zachowania energii, że energia pochodząca od strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej (air gap) jest równa mechanicznej energii potencjalnej. Na podstawie tej hipotezy można było zapisać (14):

$$E_{\text{air ap}} = \int_{h_2}^{h_1} \vec{F} \cdot d\vec{h} \quad (14)$$

gdzie h – wysokość szczeliny powietrznej.

Całkowity moment generowany przez silnik jest zatem wypadkową działania czterech momentów pochodzących od sił magnetycznych w szczelinach: e_1, e_2, e_3, e_4 (F_1, F_2, F_3, F_4); rys. 5.

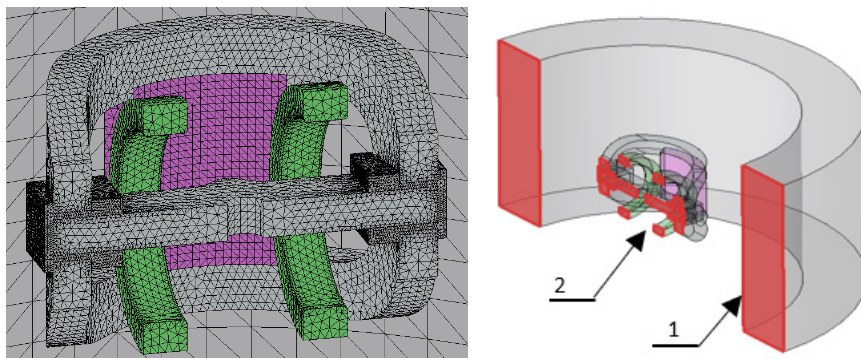


Rys. 5. Moment całkowity generowany przez siły magnetyczne, działający na zworę silnika

W celu wykreślenia pełnej charakterystyki statycznej silnika momentowego przedstawiony na rys. 4 algorytm obliczeń został zastosowany dla każdego badanego punktu pracy przetwornika. Punktem pracy silnika momentowego nazwano stan obwodu magnetycznego dla ustalonego prądu zasilania oraz kąta obrotu (wychylenia kąтового) zwory. Wartości momentu dla dowolnego punktu pracy mogą być interpolowane liniowo w określonym zakresie. Przedstawiony algorytm po uwzględnieniu parametrów empirycznych może być wykorzystany do obliczeń wstępnych w fazie tworzenia nowej koncepcji przetwornika.

2.2. Określenie charakterystyki silnika momentowego przy wykorzystaniu MES (ang. FEA)

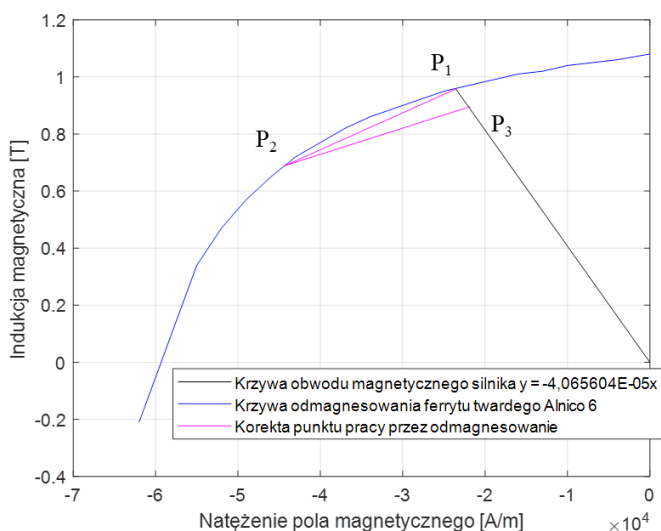
Analiza obwodu silnika momentowego Metodą Elementów Skończonych została wykonana w środowisku JMAG[®] rev. 19 [12]. Zastosowanie narzędzia przeznaczonego do analiz magnetycznych dla obiektów trójwymiarowych (3D) umożliwiło w dokładny sposób zamodelowanie badanego obwodu (rys. 6). Geometria obiektu została odwzorowana za pomocą elementów bryłowych pierwszego stopnia – czworościanów. Wielkość elementów dla części magnetowodu oraz magnesów wynosiła 1 mm, w obszarze szczelin powietrznych natomiast zastosowano zagęszczoną siatkę. Minimalna wielkość



Rys. 6. Model MES dla połowy silnika momentowego:
1) cewka demagnesująca, 2) badany silnik

elementów w szczelinie była równa połowie wysokości szczeliny. W praktyce elementy te miały 0,05–0,1 mm. Definicję charakterystyk materiałowych dostępną w postaci standardowej bazy uzupełniono o dane z eksperymentu, podczas którego wyznaczono krzywe magnesowania pierwotnego dla stopu ASTM A753-08 (typ 2).

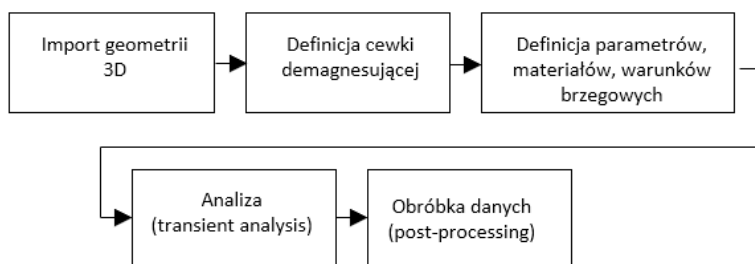
Dzięki przeprowadzonej analizie można było również zbadać wpływ procesu kalibracji przetwornika polegający na odmagnesowaniu magnesów trwałych do wyznaczonego punktu pracy. Proces odmagnesowania z wykorzystaniem cewki powietrznej (rys. 6) jest powszechnie stosowaną praktyką umożliwiającą dokonanie korekty charakterystyki $T = f(I, \theta)$ wykonanego silnika momentowego. Podczas kalibracji przez demagnesowanie silnik mo-



Rys. 7. Charakterystyka zależności indukcji magnetycznej od natężenia pola w magnesie trwałym silnika i wpływ procesu odmagnesowania na punkt pracy P_1 , P_3 (ozn. różową linią)

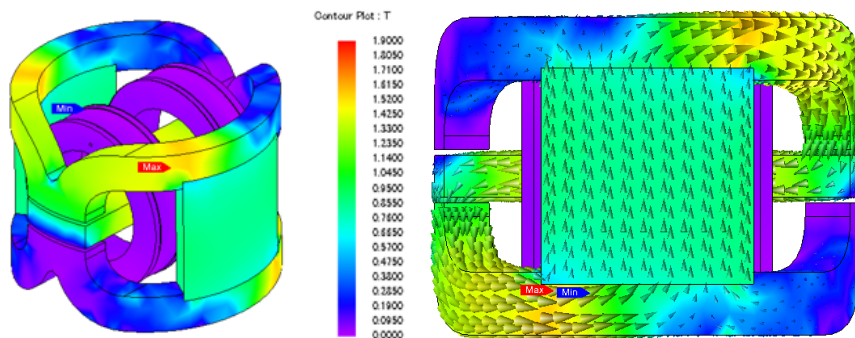
mentowy z unieruchomioną zwrą magnetyczną umieszcza się w stałym polu magnetycznym o stosunkowo niskim natężeniu – indukcja demagnesująca w magnesie w przedziale 0,01–0,1 T. Strumień demagnesujący jest spolaryzowany odwrotnie do wektora pola użytego do pełnego magnesowania pierwotnego stopu Alnico. Wpływ strumienia demagnesującego na magnesy trwałe pokazano na rys. 7.

Ponieważ proces kalibracji przy wykorzystaniu cewki powietrznej wpływa na poziom nasycenia magnesów trwałych, zastosowano analizę typu „transient”. Algorytm obliczeniowy dla analizy MES przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Algorytm dla MES

Należy nadmienić, że przedstawiony przebieg analizy dotyczy jednego punktu pracy przetwornika. W praktyce, żeby wykreślić pełną charakterystykę przetwornika, trzeba wykonać od kilkudziesięciu do kilkuset takich analiz. Wartości momentów między wyznaczonymi punktami zostały liniowo interpolowane. Dodatkowo, ponieważ badany obiekt jest symetryczny, istotne pozostaje jedynie wyznaczenie połowy charakterystyki $T = f(I, \theta)$, czyli zależność momentu obrotowego T od prądu I oraz kąta obrotu zwory θ . Wartości momentów dla sygnału o przeciwnej polaryzacji, mogą być wyznaczone na etapie postprocesingu, co znacznie redukuje czas i koszt analizy. JMAG® umożliwia wykonanie analizy z wykorzystaniem wielu rdzeni, co również

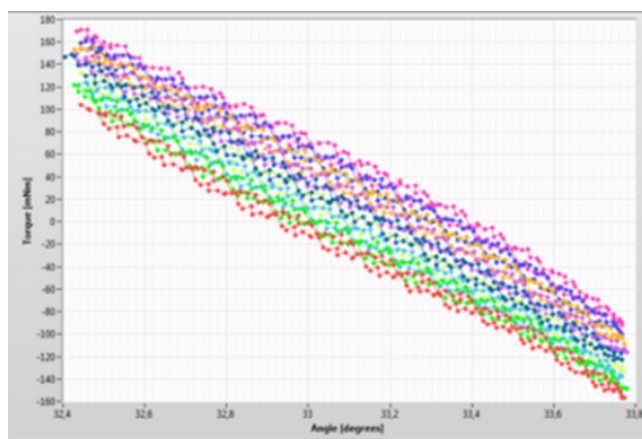


Rys. 9. Rozkład wektorów strumienia magnetycznego oraz gęstości strumienia w badanym silniku dla maksymalnego kąta obrotu zwory (10 mRad) oraz maksymalnej wartości zadanego sygnału prądowego (+50 mA)

skraca czas symulacji. W ramach obróbki danych numerycznych wyznaczono również rozkład indukcji magnetycznej dla wybranych punktów pracy silnika. Przykład takiej wizualizacji pokazano na rys. 9.

2.3. Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i zbudowane, żeby móc wykonać pomiary charakterystyki statycznej silników momentowych wykorzystywanych w elektrohydraulicznych serwozaworach. Dotyczy to produktów oferowanych komercyjnie oraz przetwornika przeznaczonego do celów badawczych. Stanowisko umożliwia precyzyjny pomiar mapy silnika momentowego w dużej rozdzielczości. Przykładowa charakterystyka uzyskana przez pomiar generowanego momentu obrotowego w punktach pracy silnika została przedstawiona na rys. 10. Głównym założeniem projektowym był niezależny pomiar momentu obrotowego i kąta obrotu, przy czym kąt ten jest mierzony na nieobciążonej mechanicznie części wału (rys. 11, detal 7). Charakterystyka silnika momentowego jest zapisywana w formie pliku *.txt, lub w formacie *.tdms. Aby zminimalizować błędy wynikające z metody pomiaru, mapa silnika momentowego generowana przez stanowisko powstaje w wyniku bezpośredniego pomiaru wartości momentu, kąta obrotu i wartości zadawanego prądu. Proces generowania mapy silnika momentowego odbywa się w sposób automatyczny zgodny z algorytmem realizowanym przez cyfrowy sterownik. Oprogramowanie dla sterownika i układu pomiarowego zostało przygotowane w środowisku LabView (National Instruments). Przyrząd pomiarowy może zostać zestawiony z mikroskopem, co znacznie ułatwia kontrolę szerokości szczelin powietrznych między zworą a nabiegunkami oraz zdefiniowanie minimalnego i maksymalnego kąta wychylenia armatury (zwory).



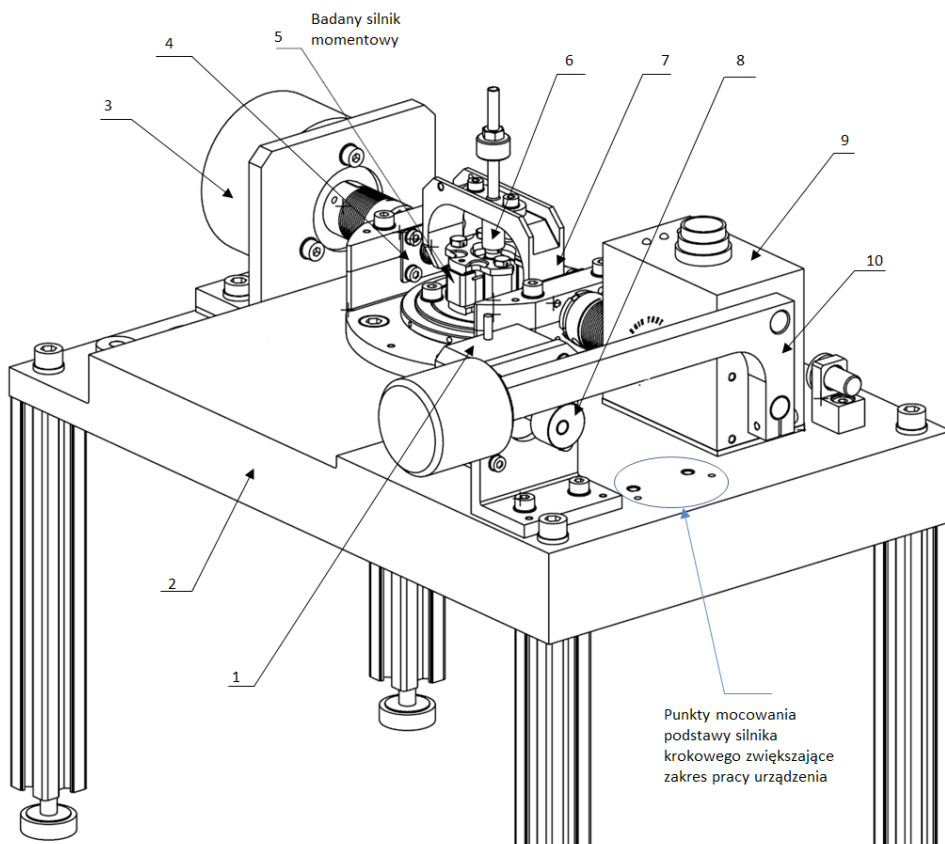
Rys. 10. Przykładowa mapa silnika momentowego w postaci chmury punktów, wygenerowana za pomocą automatycznego stanowiska badawczego

2.3.1. Zakres pomiarowy

Stanowisko badawcze zostało przystosowane do pomiaru silników momentowych o parametrach nieprzekraczających zakresu pomiarowego – maksymalny moment generowany przez badany silnik: 45 N·cm; kąt wychylenia zwory: $\pm 1,03^\circ$ lub $\pm 2,06^\circ$; prąd sterujący silnikiem momentowym: ± 50 mA; maksymalne wymiary zewnętrzne montowanego silnika momentowego nie powinny przekraczać średnicy $\varnothing = 50$ mm, wysokości $h = 37$ mm.

2.3.2. Opis części mechanicznej stanowiska badawczego

Stanowisko ma budowę modułową. Badany silnik momentowy montowany jest w centralnej części przyrządu, a zwora magnetyczna przykręcana za po-



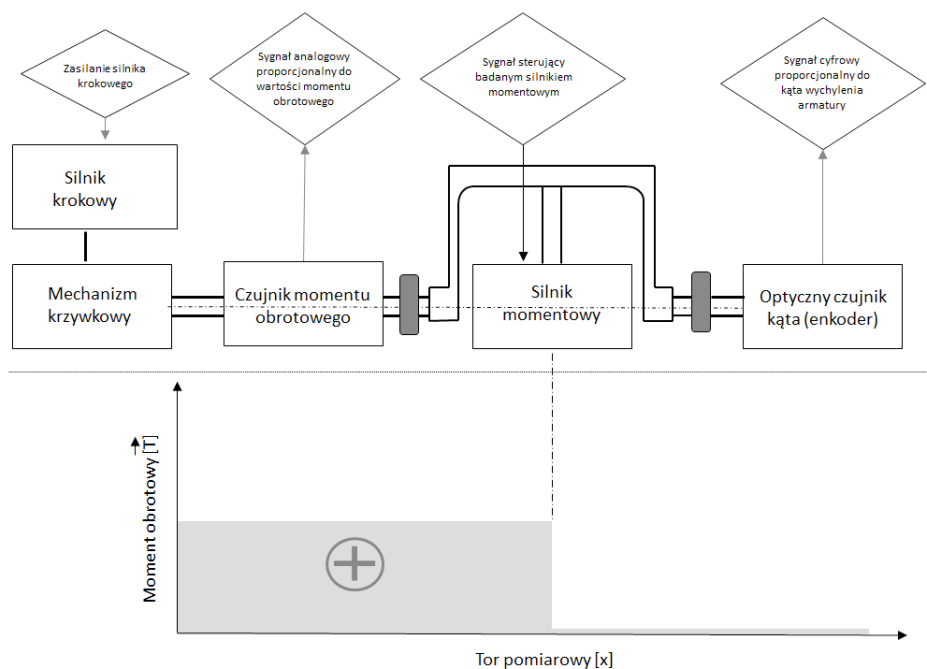
Rys. 11. Widok izometryczny przedstawiający urządzenie do pomiaru mapy silnika momentowego: 1) silnik krokowy układu wykonawczego, 2) podstawa, 3) czujnik kąta obrotu (enkoder), 4) węzeł łożyskowy, 5) testowany silnik momentowy, 6) uchwyt mocujący armaturę, 7) wał, 8) krzywka silnika krokowego, 9) czujnik momentu obrotowego, 10) dźwignia mechanizmu zadawania kąta wychylenia armatury

* Zakres dostępny po przeniesieniu podstawy silnika krokowego w położenie nr 2 (rys. 10).

średnictwem odpowiedniego uchwytu do łożyskowanego wału korbowego (rys. 11, detal 7). Taki uchwyt mocujący zworę do korby przenosi moment skręcający powstały w wyniku reakcji sił magnetycznych w badanym silniku momentowym oraz utrzymuje środek geometryczny zwory w osi obrotu wału. Wał został sprzężony z czujnikami pomiarowymi za pomocą bezluzowych sprzęgieł o ograniczonej podatności. Wszystkie elementy przyrządu pomiarowego znajdujące się w pobliżu badanego obiektu zostały wykonane ze stopów paramagnetycznych.

2.3.3. Schemat kinematyczny

Zasada działania przyrządu pomiarowego została przedstawiona na schemacie blokowym (rys. 12) oraz na wykresie obrazującym rozkład momentu skręcającego w układzie pomiarowym.



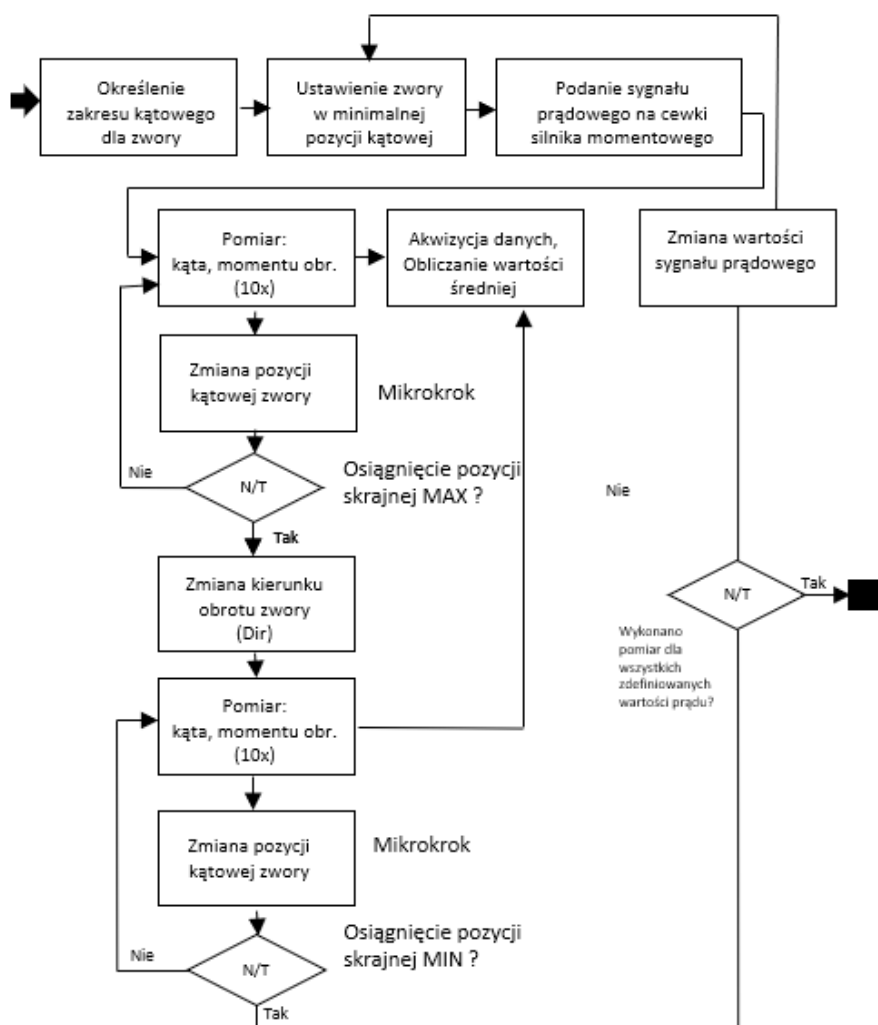
Rys. 12. Schemat blokowy toru pomiarowego

2.3.4. Układ sterująco-pomiarowy

Układ sterujący stanowiskiem został podzielony na dwa główne bloki funkcyjne: zasilacz silnika krokowego i wielofunkcyjną platformę PXI NI (National Instruments, USA) wyposażoną w karty wejść i wyjść analogowo-cyfrowych.

W układzie pomiarowym użyto dwóch przetworników realizujących niezależnie pomiar kąta oraz momentu obrotowego. Pomiar natężenia prądu

sterującego silnikiem momentowym odbywał się przy użyciu karty PXI Source Measure Unit (National Instruments, USA). Kąt wychylenia armatury mierzono przez 16-bitowy absolutny enkoder (Posital Fraba, Niemcy) o zredukowanym momencie tarcia (specjalne wykonanie) podłączonym do karty PXI 6541 (National Instruments, USA). Dzięki zastosowaniu standardowego interfejsu czujnik ten może zostać zastąpiony przez sensor o jeszcze większej dokładności i rozdzielczości. Moment generowany przez badany silnik był mierzony analogowym wieloobrotowym precyzyjnym czujnikiem momentu obrotowego typ: 8661 (Burster, Tajwan) o zakresie pomiarowym 0–0,5 [N·m], nieliniowości <0,05% zakresu pomiarowego. Czujnik momentu obrotowego stanowi również element układu zadającego kąt wychylenia zwory. Do jego obsługi wykorzystano kartę PXIe-4300 (National Instruments, USA).

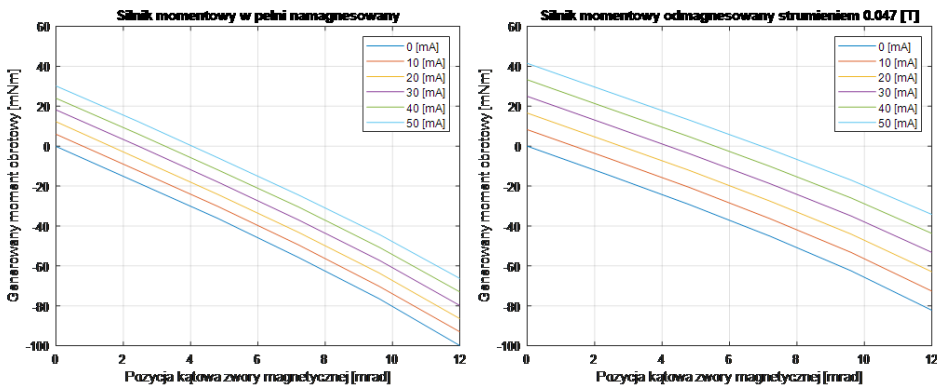


Rys. 13. Algorytm pomiaru

Sterownik silnika krokowego razem ze źródłem zasilania został zabudowany w oddzielnej, ekranowanej obudowie. Sygnał sterujący silnikiem krokowym był generowany przez kartę wejść i wyjść cyfrowych PXI-6289, a komunikacja między blokami – realizowana przez przewód sygnałowy. Sterowanie silnika krokowego odbywało się za pomocą trzech sygnałów sterujących: enable (załącz), direction (kierunek) i counts (liczba kroków). W celu zwiększenia rozdzielczości pomiaru silnik krokowy pracował w trybie mikrokroków. Pomiar charakterystyki silnika momentowego odbywał się w pętli zgodnej z algorytmem opisanym na rys. 13.

2.4. Wyniki analiz

Pomiary charakterystyk statycznych silników momentowych przeprowadzono dla dwóch zbudowanych prototypów oraz różnych poziomów demagnesowania. Ze względu na to, że stanowisko działa w trybie automatycznym, możliwe było zebranie w krótkim czasie chmury punktów pomiarowych, które wykorzystano do wykreślenia mapy momentów dla rozpatrywanych przypadków. Charakterystyka statyczna (rys. 14) została każdorazowo przedstawiona w postaci rodziny krzywych reprezentujących różne wartości zadanego sygnału sterującego. Kompletna mapa momentów może zostać wykorzystana jako dana wejściowa w postaci tablicy (2D Lookup table) do modelu matematycznego wzmacniacza elektrohydraulicznego. Dane te mogą być zastosowane zarówno na potrzeby modelowania statyki, dynamiki serwozaworu, jak i całego układu elektrohydraulicznego. Jak wykazano w badaniach, których przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 14, prototyp badanego silnika wykazywał liniową i przewidywalną charakterystykę momentu obrotowego w funkcji kąta i prądu w badanym zakresie. Potwierdzono również teorię opisującą wpływ kalibracji na sztywność sprężyny magnetycznej oraz moment generowany przez prąd płynący przez uzwojenia cewek.



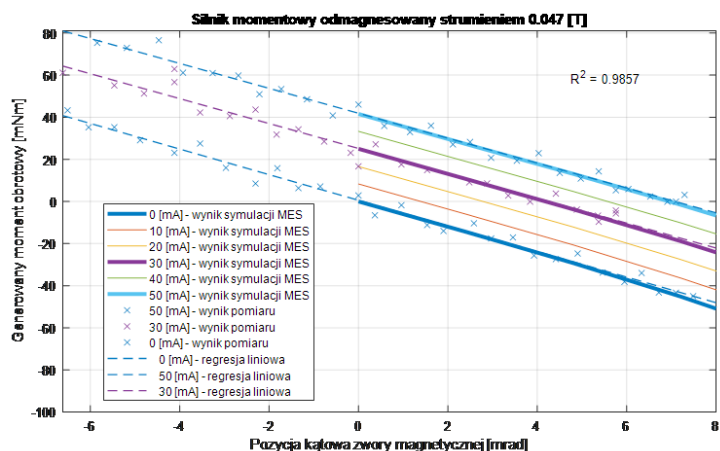
Rys. 14. Wykresy przedstawiające pierwszą i czwartą ćwiartkę mapy momentów dla przetwornika zbudowanego do celów badawczych – widoczny wpływ procesu odmagnesowania strumieniem 0,047 T na charakterystykę

Badanie prototypu umożliwiło również dopracowanie i uściślenie metody analitycznej bazującej na MES oraz jej walidację. Określono również dalsze kierunki rozwoju stanowiska badawczego skupione głównie na zmniejszeniu mechanicznej histerezy spowodowanej przez tarcie w węzłach łożyskowych oraz łożyskowaniu czujnika kąta.

2.5. Wnioski

Silniki momentowe, mimo że rzadko są przedmiotem odrębnych publikacji naukowych lub technicznych, stanowią istotny element układów wykonawczych w technice sterowania proporcjonalnego. Od ich dokładności, niezawodności oraz stabilności zależy w dużym stopniu charakterystyka wzmacniacza elektrohydraulicznego, a także całego układu wykonawczego. Rozwinięcie metody badawczej dla obwodu magnetycznego takiego przetwornika miało fundamentalne znaczenie dla obecnych i przyszłych prac rozwojowych skoncentrowanych na technice proporcjonalnych serwozaworów elektrohydraulicznych.

Analityczna metoda wyznaczania statycznej charakterystyki silnika momentowego okazała się zbieżna z wynikami pomiarów przeprowadzonych na specjalnie do tego przygotowanym stanowisku badawczym (rys. 15). Najlepszą korelację między modelem teoretycznym wykorzystującym MES a badanym obiektem uzyskano w przypadku prototypowego silnika demagnesowanego strumieniem >40 mT. Dla przetwornika o stałym przekroju, przeznaczonego do rozwoju metody badawczej osiągnięto poziom ufności modelu teoretycznego $>98\%$ w odniesieniu do wyników pomiarów. Korelację modelu z wynikiem pomiarów dla sygnału prądowego 0 mA, 30 mA i 50 mA przedstawiono na rys. 15.



Rys. 15. Wykres, na którym pokazano zbieżność między modelem teoretycznym MES a wynikami pomiarów na automatycznym stanowisku badawczym; pomiary krzywych momentu dla wybranych wartości sygnału prądowego

Należy jednak nadmienić, że dla punktów pracy przetwornika, w których w magnetowodzie występowały lokalne obszary saturacji magnetycznej, solver JMAG® nie zawsze odnajdywał rozwiązanie dla zdefiniowanego kryterium zbieżności. Zoptymalizowana konstrukcja przetwornika przygotowanego do celów badawczych znacznie ułatwiła osiągnięcie zadowalających wyników korelacji. Rozwinięcie metody badania charakterystyki przetwornika z wykorzystaniem MES ma szczególne znaczenie w perspektywie przyszłych projektów wdrożeniowych, w jakich istotne będzie symulowanie pracy w wymagających warunkach środowiskowych.

Koncepcja stanowiska badawczego okazała się słuszna. Zastosowanie enkodera przemysłowego w specjalnym wykonaniu umożliwiło redukcję histerezy mechanicznej do akceptowalnego poziomu <2%. Obecnie rozpatrywana jest również idea wykorzystania metody optycznej DPMM (Digital Photographic Measurement Method) lub DIC (Digital Image Correlation) do pomiaru kąta położenia zwory magnetycznej. Istotnym ograniczeniem dla zbudowanego stanowiska badawczego jest konieczność prowadzenia pomiarów w warunkach laboratoryjnych w temperaturze $22\text{C}^\circ \pm 5\text{C}^\circ$.

Z uwagi na ograniczone możliwości testowania silników momentowych jako wydzielonych obiektów w warunkach pracy (eksploatacji) planowane jest uzupełnienie zaprezentowanego modelu teoretycznego o dane materiałowe zależne od temperatury i stanu naprężenia w komponentach silnika momentowego, a następnie przeprowadzenie analiz z różnymi warunkami brzegowymi typowymi dla zastosowań lotniczych.

Podziękowania

Zaprezentowane badania były wspierane przez dr. hab. inż. Krzysztofa Tomczuka (wsparcie edytorskie) oraz UTC Aerospace Systems Wrocław Sp. z o.o. (wsparcie techniczne).

Literatura

- [1] J. Coey, MD. *Magnetism and magnetic materials*, Cambridge University Press, Cambridge 2010.
- [2] J. Lipski, *Napędy i sterowania hydrauliczne*, WKŁ, Warszawa 1981.
- [3] S. Stryczek, *Napęd hydrostatyczny*, t. 1: *Elementy*, WNT, Warszawa 2005.
- [4] R. Dindorf, *Hydrotronika tendencją w rozwoju hydrauliki. Napędy i sterowania hydrauliczne*, KNT, Wrocław 2002.
- [5] A. Pizoń, *Elektrohydrauliczne analogowe i cyfrowe układy automatyki*, WNT, Warszawa 1995.

-
- [6] *Aircraft Systems. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*, (rozdz. 6), PDF, Federal Aviation Administration, 2008 [pobrano 18.12.2013], s. 6–19.
 - [7] B.D. Cullity, Ch.D. Graham, *Introduction to magnetic materials*, Wiley, Hoboken, NJ, 2011.
 - [8] J. Blackburn, G. Reethof, J. Shearer, *Fluid Power Control*, MIT Press, Cambridge 1960.
 - [9] R. Maskrey, H. Thayer, *A brief history of electrohydraulic servomechanisms*, „ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control” 1978, June.
 - [10] J.C. Jones, *Developments in design of electrohydraulic control valves from their initial concept to present day design and applications*, Workshop on Proportional and Servovalves, Melbourne, Australia, 1997.
 - [11] J. Kozłowski, J. Machczyński, *Podstawy elektromagnetyzmu*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
 - [12] Function Tutorial. Simulation Technology for Electromechanical Design: JMAG (jmag-international.com).



Study of scanning electron microscopy, ultimate and proximate analysis of sewage sludge char and the use of RETScreen software

**Vishwajeet¹, Halina Pawlak-Kruczek¹, Tomasz Hardy¹,
Amit Arora², Seyed Saeed Karrabi³**

¹ Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland,
Mechanical and Power Engineering, Department of Energy Conversion.

² National Institute of Technology, Hamirpur, India,
Department of Chemical Engineering.

³ Sapienza University, Civil and Industrial Department.

e-mail: vishwajeet.na@pwr.edu.pl

Abstract

In this paper, we investigated different categories of sewage sludge (SS): dry SS after hydrothermal carbonization, before hydrothermal carbonization, plasma ash, ash after gasification with hydrothermal carbonization, and ash after gasification without hydrothermal carbonization. These five cases were studied. After proximate, ultimate, and scanning electron microscopy analysis, we found that sewage sludge before and after hydrothermal carbonization were the best of these five categories. The carbon content was higher and the sulfur content was lower in both cases than the other types of SS. A lower percentage of sulfur avoids corrosion. The percentage of ash was also low in both cases, which is more beneficial for plasma gasification as compared to the other types. The scanning electron microscopy showed that the hydro char surfaces were rougher and harder than the raw materials; moreover, it was found to be more porous than the raw material. The software program RETScreen is used for energy management. At its core, the tool is standardized and integrated

clean energy project analysis software that can be employed worldwide for evaluating energy production, lifecycle costs, and reductions in greenhouse gas emissions for various energy-efficient and renewable energy technologies.

Keywords: hydrothermal carbonization, Scanning Electron Microscopy (SEM), RETScreen software

1. Introduction

A byproduct of wastewater treatment, sewage sludge (SS), is becoming increasingly problematic. Sewage sludge contains various amounts of water, organic matter, and organic and inorganic contaminants, such as heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [1, 2]. Due to the potential for biological activity in SS, its usage must be carefully considered. For this reason, sewage sludge deactivation and stabilization through a variety of thermal utilization routes have been extensively studied [3–8]. These routes include thermal hydrolysis [9], hydrothermal carbonization (HTC) [10–12], HTC integrated with anaerobic digestion [13, 14], torrefaction [15, 16], pelletizing [17], pyrolysis and co-pyrolysis [18, 19], gasification [20–23], and combustion. Hydrothermal carbonization is a thermochemical technique used to make biochar (HTC). Another name for the remaining solid residue is hydrochar. This process is useful for producing hydrochar, liquid, and a small quantity of CO₂ from wet sewage sludge with a moisture level of 70%–80% at a temperature range of 180–250°C under pressure in a closed vessel [24–30]. Although damp microwave pyrolysis of SS is also popular, it has been shown to be ineffective [31]. If the moisture content of the SS is not sufficiently reduced, removing the water requires most of the energy during the thermochemical process. The heating value of the char produced by pyrolysis might be lower than that of hydrothermal carbonization. In the HTC procedure, the autoclave was heated using a heating mantle equipped with band heaters. The temperature was measured using a PLC controller connected to a K-type thermocouple. Since most results provided in the literature on the subject are in the temperature range of 473 K to 533 K, the set point temperature of 473 K was chosen since as a reasonably typical temperature for the HTC process [34–36]. The residence time in the reactor was 150 minutes. The timer was started after the autoclave reached the desired temperature. After 2.5 hours, the heating mantle was turned off and the setup was left to cool. The ultimate and proximate analysis of the different categories of sewage sludge is presented in Tables 1 and 2. The carbon content was higher before and after hydrothermal carbonization compared to the other samples.

2. Material and results

2.1. Ultimate and proximate analysis

To evaluate and compile the information:

Three of the five fuel types shown in Table 1 are connected with the plasma and HTC processes.

The moisture content is presented as analytical figures as well as received; the fact that these values were constant throughout the dataset suggests that there was no loss during drying. There are two ways to report the ash content: dry and analytical. Since the dry values were marginally higher, it can be inferred that moisture was removed prior to taking these measurements. For any fuel, there is dry and analytic volatile matter (VM). Dry values are continuously higher, indicating that as moisture is removed, the amount of volatile matter increases. Only the last three fuels had a higher heating value (HHV). This figure indicates how much energy the fuel contains. For HHV, there are three columns, but only two of them have data in them – analytical and as received (ar); the dry column is left empty. Each fuel has a different HHV, with the dry SS after HTC having the highest values.

We can conclude from this data that fuels with lower moisture content typically have higher volatile matter and ash contents. The HHV numbers imply that dry SS after HTC may be the fuel with the highest energy efficiency among those mentioned; however, this conclusion is not supported in the absence of HHV data for the first two fuels.

Moisture, ash, and volatile matter content are components of a proximate analysis for various fuel samples in the table you have supplied. When evaluating solid and biomass fuels, proximate analysis is a crucial tool for characterizing the fuel's composition.

This is the approximate analysis using the given data:

Moisture content: As received, the moisture content ranged widely, from 2.10% to 5.71%. This is crucial information for comprehending the fuel's handling and combustion properties, as it shows the amount of water present in the fuel during analysis.

Ash presented by the ash content. There are two ways to report the ash content in the table: "analytical" and "dry." These fuels had ash contents ranging from 25.08% to 88.30% on a dry basis and from 23.65% to 86.45% on an analytical basis. The "dry" basis readings were somewhat higher since the moisture content is subtracted from the calculation.

Volatile Matter (VM): This term describes the components of fuel – apart from moisture – that are discharged as vapor or gas at high temperatures. Additionally, two values of the VM are reported: "analytical" and "dry". On an analytical basis, it varied from 6.00% to 58.96%, while on a dry basis it varied

Table 1. Analysis of different types of fuel

#	Fuel	Moisture _{as receive}	Moisture _{analytical}	Ash _{analytical}	Ash _{dry}	VM _{analytical}	VM _{dry}	HHV _{analytical}	HHV _{dry}	HHV _{ar}	LHV _{analytical}	LHV _{dry}	LHV _{ar}
1	With HTC ASH after gasification	5.45	5.45	78.58	83.11	8.66	9.16						
2	Without HTC ASH after gasification	2.10	2.10	86.45	88.30	6.00	6.12						
3	Dry SS after HTC	2.75	2.75	32.70	33.63	52.29	53.77	15.91	16.36	15.91	14.81	15.30	14.81
4	Dry SS before HTC	5.71	5.71	23.65	25.08	58.96	62.54	15.90	16.86	15.90	14.58	15.61	14.58
5	Plasma ASH	4.10	4.10	44.53	46.43	21.53	22.45	14.47	15.09	14.47	13.80	14.50	13.80

from 6.12% to 62.54%. The “dry” basis percentage was larger than the ash content since moisture is not included in the computation.

It is possible to deduce the fuels’ energy and combustion properties from the proximate analysis data shown in the table. To start and maintain combustion, for example, fuels with a higher moisture content often have lower heating values. Reduced combustion efficiency and more residue after burning may be indicated by a higher ash content. Increased VM usually translates into a fuel that burns more quickly and can ignite more easily.

The fixed carbon content – which is normally included in the proximate analysis and can be indirectly determined by deducting the total content of volatile matter, ash, and moisture from 100% – is not included in the table. This indicator is significant since it shows the percentage of flammable carbon in the fuel. The proximal analysis is incomplete without this data.

Table 2. Flammable carbon in the fuel, ultimate analysis

#	Fuel	C _{dry} (%)	H _{dry} (%)	N _{dry} (%)	S _{dry} (%)	O _{dry} (%)
1.	Ash after gasification with HTC	10.37	0.40	1.30	0.82	4.00
2.	Ash after gasification without HTC	9.37	0.10	1.41	0.75	0.07
3.	Dry SS after HTC	37.57	4.85	6.57	1.69	15.69
4.	Dry SS before HTC	38.94	5.53	7.51	1.74	21.20
5.	Plasma ash	41.22	1.36	3.32	1.11	6.58

The final analysis calculates a fuel’s elemental composition, or how much carbon (C), hydrogen (H), nitrogen (N), sulfur (S), and oxygen (O) it contains.

Carbon (C_{dry}): The carbon content varied from 9.37% to 41.22%. Plasma ash had the highest carbon concentration, indicating that it may have a larger energy content since it is a major combustible element.

Hydrogen (H_{dry}): The hydrogen content ranged from 0.10% to 5.53%, with the maximum hydrogen content being found in dry SS prior to HTC. Since hydrogen is a component of the combustible gases generated during fuel combustion, it also adds to the fuel’s energy content.

Nitrogen (N_{dry}): The range of nitrogen content was 1.30% to 7.51%, with the maximum amount seen in dry SS before HTC. Although nitrogen does not directly add to the energy content, its combustion produces NO_x emissions, which raises concerns.

Sulfur (S_{dry}): The range of sulfur content in all samples was 0.75% to 1.74%, which is a comparatively modest amount. The emissions of SO_x, which are bad for the environment, can be caused by sulfur.

Oxygen (O_{dry}): The oxygen content varied greatly, from 0.07% to 21.20%, with the maximum oxygen percentage in dry SS prior to HTC. Since it is a com-

ponent of the molecular structure of organic materials, oxygen is frequently present in them even though it is not a fuel.

The final analysis of the fuels under study is provided in Table 2. A comprehensive understanding of the combustion characteristics and environmental impacts of fuels necessitates an ultimate analysis. Typically, high concentrations of carbon and hydrogen are favored for high-energy fuels, whereas elevated levels of nitrogen and sulfur are often undesirable due to their potential to generate NO_x and SO_x emissions during combustion. The oxygen content in a fuel can indicate the extent of prior oxidation. All figures and tables in this study are presented under the condition of “dry,” signifying that the fuel’s moisture content was not factored into the calculations.

Designing combustion systems, evaluating fuel quality, and calculating the environmental impact of combusting the fuels all depend on this approach. The composition of the fuels varies significantly, which could result in disparate combustion behaviors and energy outputs.

2.2. Scanning Electron Microscopy (SEM) morphology

The following SEM images, which are displayed at $500\times$ magnification in Figures 1–4, demonstrate a notable change in surface morphology following HTC. This change is explained by the organic compounds in sewage sludge breaking down – this manifests as small, spherical particles on the surface. As illustrated in Figures a and b, the hydrochar surfaces were found to be more

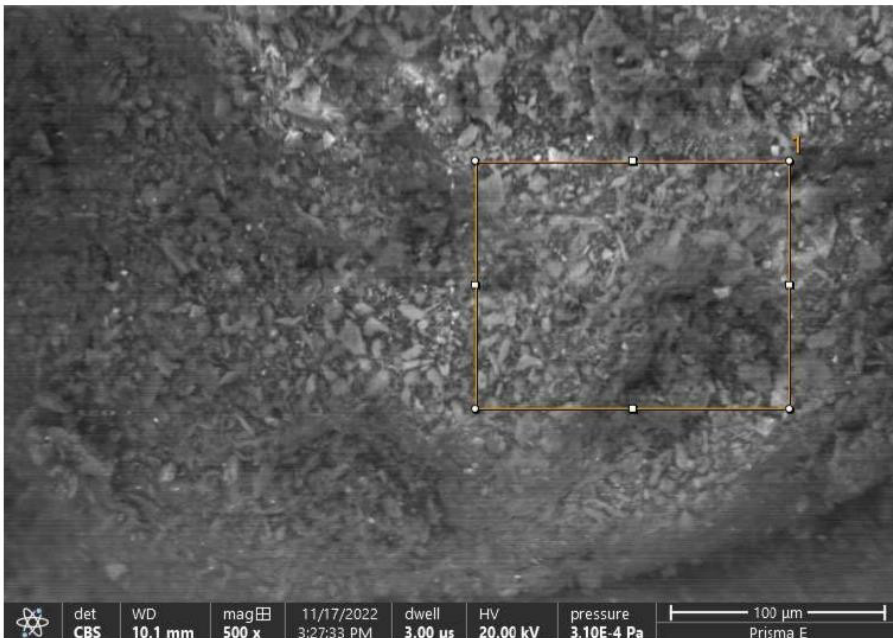


Fig. 1. Raw material

porous and both rougher and tougher than the raw materials. Following gasification, the porosity rose, as seen in Fig. 3. Because of the porosity, there will be greater air movement and a higher rate of [32] char burning. According to M. Puccini et al. [33], the remarketing of volatile matter causes an increase in porosity following gasification. Figure 4 illustrates how the plasma char has less fibrous structures, which is a result of the total breakdown that enhances the HHV. Because the samples underwent varying degrees of disintegration during HTC and plasma, which degraded the biopolymer present in the sludge, the results differ when compared to plasma.

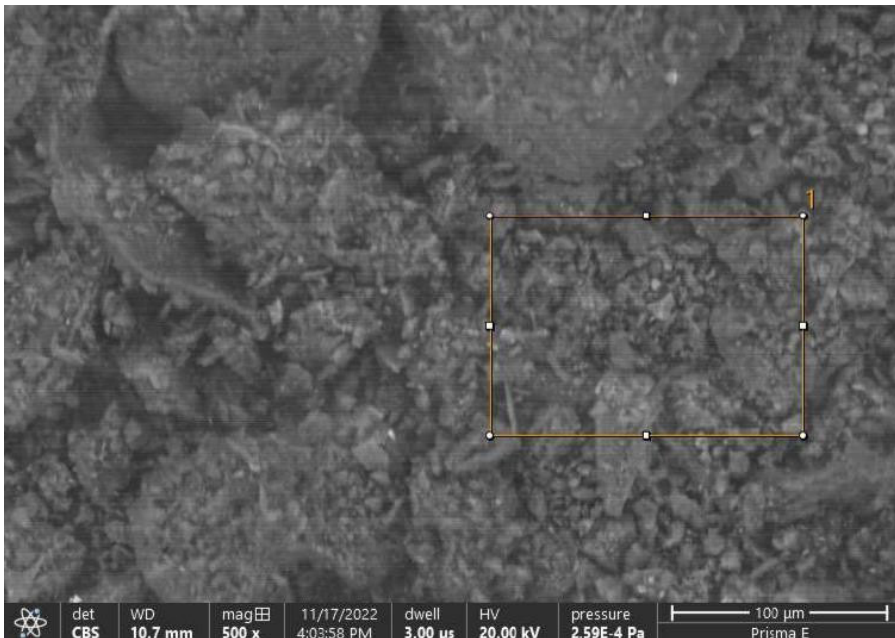


Fig. 2. Hydrochar

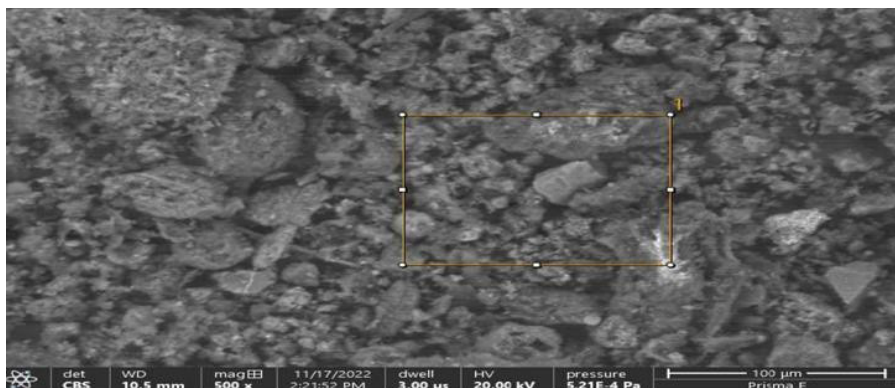


Fig. 3. Hydrochar after gasification

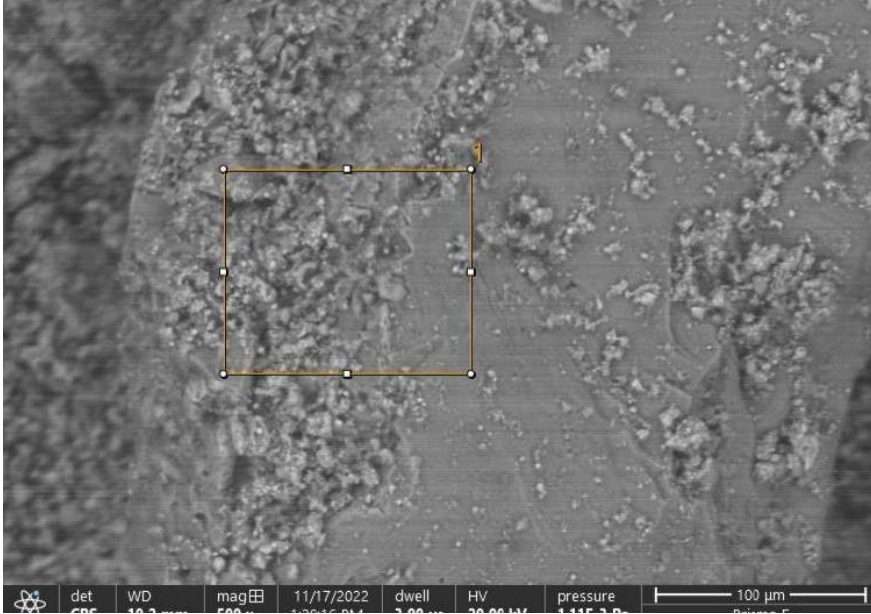


Fig. 4. Plasma char

2.3. RETScreen software

RETScreen Clean Energy Management Software, or simply RETScreen Expert, is a software program created by the government of Canada that enables the comprehensive identification, assessment, and optimization of the technological/economic viability of renewable energy sources, energy efficiency, and cogeneration projects, as well as the measurement and verification of facilities' actual performance, the identification of opportunities for energy production and savings, and portfolio management of numerous facilities.

The tool's core consists of standardized and integrated clean energy project analysis software that can be employed worldwide for evaluating energy production, lifecycle costs, and reductions in greenhouse gas (GHG) emissions for various energy-efficient and renewable energy technologies. Firstly, the user needs to select the weather zone where the analysis is being carried out from the list of default locations or the nearest place. The software then gives the complete weather details of the area, including daily solar radiation, heating and cooling days, wind speed, etc.

Much emphasis is being placed on reducing both the carbon footprint and energy cost of buildings. The energy usage of a building depends on many factors, including local weather and climate conditions to which its electrical, heating, and air conditioning systems should respond. To cut down costs and emissions, it is crucial to implement renewable energy systems that augment

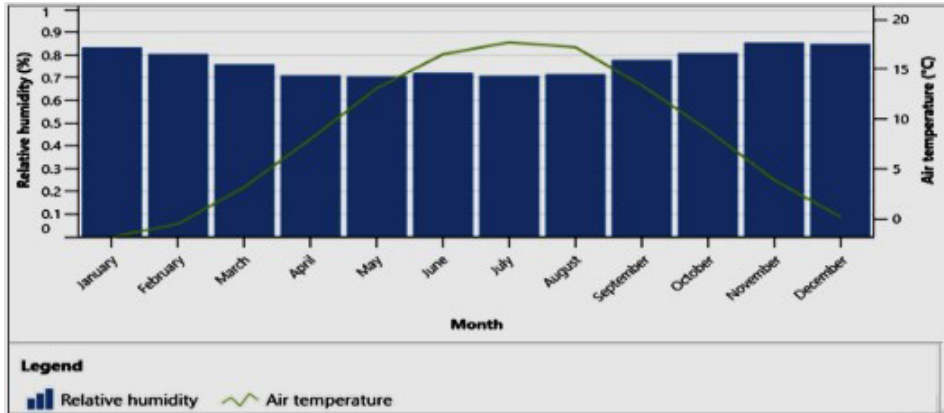


Fig. 5. Climate data for Wrocław, Poland

energy sources and boost energy efficiency. This study assesses the energy potential of sewage sludge gasification using RETScreen and its tendency to simultaneously reduce GHG emissions. The energy utilization is proposed to be in a commercial or institutional building.

The climate data chosen here is for the city of Wrocław, Poland, where the study was conducted. The NASA station nearest to the project location was selected as the climate data location for calculating a “normal year” based on 20 years of historical data. The daily weather parameters generated by NASA satellite data function are provided according to the geographical coordinates of the project location. Relative humidity remains almost constant throughout the year (Fig. 5).

Energy extracted from sewage sludge is proposed to be utilized in a commercial or institutional facility with an area of 3000 m² and a target fuel consumption of 40% by 2025. This will reduce the dependency on conventional energy sources by 40%. The conventional/base case energy use intensity is reported to be around 800 MJ/m². The benchmark for the fuel consumption pattern is shown in (Fig. 2). The net-zero energy is predicted to be achieved by 2050.

RETScreen software provides an evaluation of project lifecycle costs, financial viability, and risk analysis for various types of energy technologies in order to determine whether or not the balance of costs and savings (i.e., cash flow) over the lifetime of an energy technology makes for a financially attractive proposition. Table 3 shows the financial analysis, wherein the equity payback period for sewage sludge-driven energy systems is 14.1 years.

Savings of approximately 30% are reported in the fuel consumption pattern and 28.8% in the fuel cost when sewage sludge is used for energy extraction. The annual reduction in the emission of greenhouse gases stemming from the proposed technology in place of the base case/conventional technology has been highlighted through the software. The net GHG emission using

the base case was around 71.8 t CO₂; using the sewage sludge, it was 1.1 t CO₂, thus reducing GHG emission by 98.4%, as shown in Fig. 7. A reduction of almost 70.7 t CO₂ is equivalent to around 13 cars and light trucks not used, as given by the GHG equivalence condition.

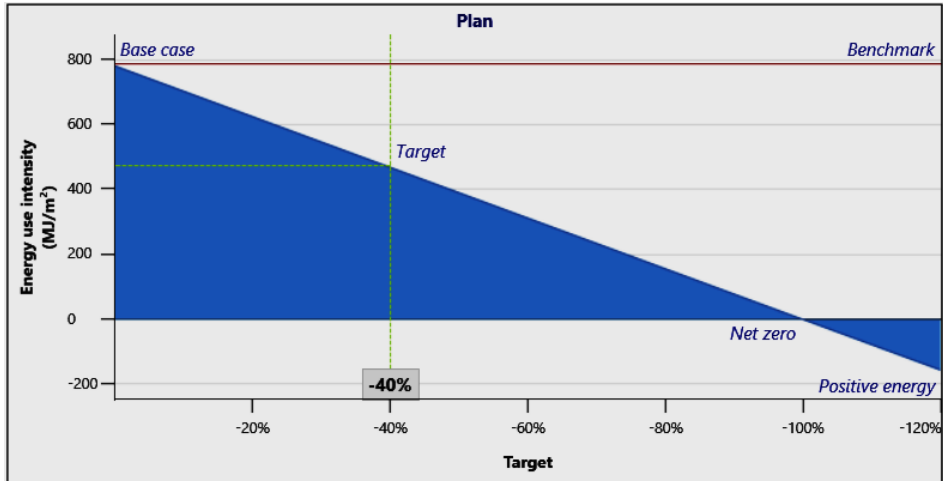


Fig. 6. Fuel consumption benchmark

Table 3. Financial analysis of a sewage sludge-driven energy system

Annual fuel cost	\$45,190
Annual O&M cost	\$3,657
Annual debt payment	\$19,987
Total annual savings and income	\$63,449
Simple payback	11.9 years
Equity payback	14.1 years

The study's findings are noteworthy:

- A 40% reduction in the reliance on traditional energy sources is possible with a sewage sludge-driven energy system.
- The software projects a 14.1-year equity payback period for a sewage sludge energy system.
- Using sewage sludge for energy extraction has been shown to reduce fuel expenses by 28.8% and to reduce fuel use by 30%.
- A significant decrease in greenhouse gas emissions is anticipated, down from 71.8 t CO₂ in the base case to 1.1 t CO₂, or 98.4% less.

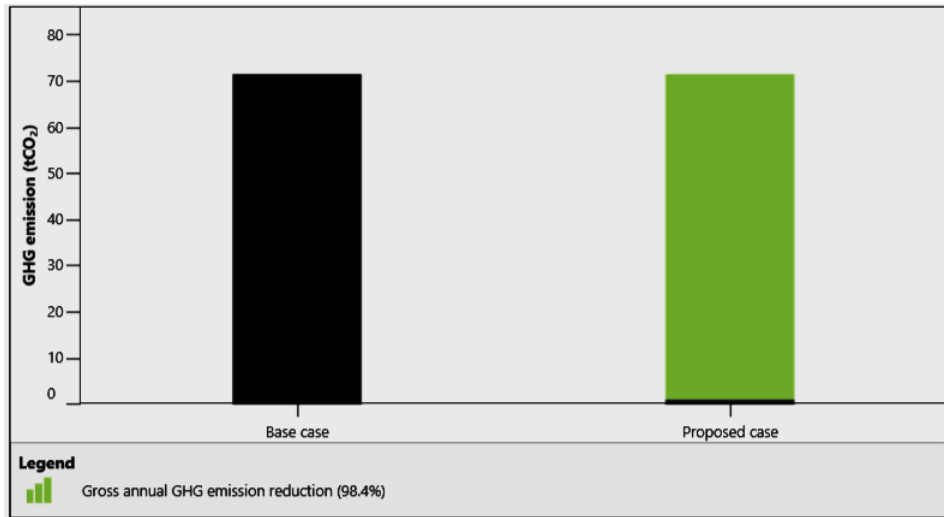


Fig. 7. Conventional versus proposed case GHG emission

The utilization of RETScreen software in this investigation suggests that gasification of sewage sludge can considerably lower greenhouse gas emissions and save energy, making it an economically and ecologically sound energy option for the construction industry. The study conducted by the program facilitates decision-making by offering comprehensive insights into the project's lifecycle costs and potential environmental advantages.

3. Conclusion

In conclusion, the higher carbon and hydrogen contents observed in the plasma ash and dry SS samples, both before and after HTC, demonstrate promising potential for higher energy content. However, it is crucial to carefully consider the potential environmental impacts arising from the higher levels of nitrogen and sulfur. The suitability of these fuels will depend on their specific application and the balance achieved between energy output and environmental considerations. Additionally, the presence of oxygen suggests that some of these fuels may have undergone partial oxidation, which could influence their handling and energy production characteristics.

The report provides a comprehensive analysis of the utilization of RETScreen software in evaluating the energy potential and capacity to reduce greenhouse gas emissions associated with the gasification of sewage sludge. RETScreen, developed by the government of Canada, serves as a powerful tool for identifying, evaluating, and optimizing the technical and financial feasibility of various clean energy projects. Specifically, the study assesses the energy potential of gasifying sewage sludge for use in a commercial/institutional

building in Wrocław, Poland. Through lifecycle cost analysis, greenhouse gas emission reductions, financial viability assessments, and risk analysis, RET-Screen facilitates a thorough examination of the energy technologies considered, supplemented by the examination of relevant weather data.

Acknowledgments

The authors would like to thank MPWiK Wrocław for supplying dried sewage sludge samples for this research.

Literature

- [1] M. Kacprzak, E. Neczaj, K. Fijałkowski, A. Grobelak, A. Grosser, M. Worwag, A. Rorat, H. Brattebo, Å. Almås, B.R. Singh, *Sewage sludge disposal strategies for sustainable development*, „*Environ. Res.*” 2017, 156, s. 39–46.
- [2] S. Werle, *Sewage Sludge-To-Energy Management in Eastern Europe: A Polish Perspective*, „*Ecol. Chem. Eng. S*” 2015, 22, s. 459–469.
- [3] T.T. Trinh, S. Werle, K.-Q. Tran, A. Magdziarz, S. Sobek, M. Pogrzeba, *Energy crops for sustainable phytoremediation – Thermal decomposition kinetics*, „*Energy Proc.*” 2019, 158, s. 873–878.
- [4] M. Zubrowska-Sudol, J. Walczak, *Enhancing combined biological nitrogen and phosphorus removal from wastewater by applying mechanically disintegrated excess sludge*, „*Water Res.*” 2015, 76, s. 10–18.
- [5] E. Szatyłowicz, J. Walczak, M. Zubrowska-Sudoł, A. Garlicka, *Deactivation of the Activated Sludge As a Result of Mechanical Disintegration*, „*Inżynieria Ekologiczna*” 2017, 18, s. 114–121.
- [6] M. Zubrowska-Sudol, J. Walczak, *Effects of mechanical disintegration of activated sludge on the activity of nitrifying and denitrifying bacteria and phosphorus accumulating organisms*, „*Water Res.*” 2014, 61, s. 200–209.
- [7] M. Zubrowska-Sudoł, J. Podedworna, A. Bisak, K. Sytek-Szmeichel, P. Krawczyk, A. Garlicka, *Intensification of anaerobic digestion efficiency with use of mechanical excess sludge disintegration in the context of increased energy production in wastewater treatment plants*, *E3S Web. Conf.* 2017, 22, s. 00208.
- [8] E. Szatyłowicz, A. Garlicka, M. Zubrowska-Sudoł, *The Effectiveness of the Organic Compounds Released Due To the Hydrodynamic Disintegration of Sewage Sludge*, „*Inżynieria Ekologiczna*” 2017, 18, s. 47–55.
- [9] J. Mukawa, T. Pająk, T. Rzepecki, *Sewage sludge treatment in the process of thermal hydrolysis and digestion on the Tarnow sewage treatment plant example*, „*Przem. Chem.*” 2018, 1, s. 92–94.
- [10] K. Czerwińska, M. Sliz, M. Wilk, *Hydrothermal carbonization process: Fundamentals, main parameter characteristics and possible applications including an*

- effective method of SARS-CoV-2 mitigation in sewage sludge. A review*, „Renew. Sustain. Energy Rev.” 2022, 154, s. 111873.
- [11] C.I. Aragón-Briceño, O. Grasham, A.B. Ross, V. Dupont, M.A. Camargo-Valero, *Hydrothermal carbonization of sewage digestate at wastewater treatment works: Influence of solid loading on characteristics of hydrochar, process water and plant energetics*, „Renew. Energy” 2020, 157, s. 959–973.
- [12] M. Wilk, A. Magdziarz, K. Jayaraman, M. Szymańska-Chargot, I. Gökalp, *Hydrothermal carbonization characteristics of sewage sludge and lignocellulosic biomass. A comparative study*, „Biomass Bioenergy” 2019, 120, s. 166–175.
- [13] C. Aragón-Briceño, A.B.B. Ross, M.A.A. Camargo-Valero, *Evaluation and comparison of product yields and bio-methane potential in sewage digestate following hydrothermal treatment*, „Appl. Energy” 2017, 208, s. 1357–1369.
- [14] C.I. Aragón-Briceño, A.B. Ross, M.A. Camargo-Valero, *Mass and energy integration study of hydrothermal carbonization with anaerobic digestion of sewage sludge*, „Renew. Energy” 2021, 167, s. 473–483.
- [15] H. Pawlak-Kruczek, K.K. Krochmalny, M. Wnukowski, L. Niedźwiecki, *Slow pyrolysis of the sewage sludge with additives: Calcium oxide and lignite*, „J. Energy Resour. Technol.” 2018, 140, s. 062206.
- [16] H. Pawlak-Kruczek, M. Wnukowski, K. Krochmalny, M. Kowal, M. Baranowski, J. Zgóra, M. Czerep, M. Ostrycharczyk, L. Niedźwiecki, *The Staged Thermal Conversion of Sewage Sludge in the Presence of Oxygen*, „J. Energy Resour. Technol.” 2019, 141, s. 070701.
- [17] D. Nagy, P. Balogh, Z. Gabnai, J. Popp, J. Oláh, A. Bai, *Economic Analysis of Pellet Production in Co-Digestion Biogas Plants*, „Energies” 2018, 11, s. 1135.
- [18] S. Wang, H. Persson, W. Yang, P.G. Jönsson, *Pyrolysis study of hydrothermal carbonization- treated digested sewage sludge using a Py-GC/MS and a bench-scale pyrolyzer*, „Fuel” 2020, 262, s. 116335.
- [19] S. Wang, P. Mandfloen, P. Jönsson, W. Yang, *Synergistic effects in the co-pyrolysis of municipal sewage sludge digestate and salix: Reaction mechanism, product characterization and char stability*, „Appl. Energy” 2021, 289, s. 116687.
- [20] M. Dudziak, S. Werle, K. Grübel, *Evaluation of Contamination of Dried Sewage Sludge and Solid By-Products of Dried Sewage Sludge Gasification By Infrared Spectroscopy Method*, „Inżynieria Ekologiczna” 2016, 50, s. 195–200.
- [21] S. Werle, *Gasification of a Dried Sewage Sludge in a Laboratory Scale Fixed Bed Reactor*, „Energy Proc.” 2015, 66, s. 253–256.
- [22] S. Werle, M. Dudziak, *Pollution of liquid waste-products from sewage sludge gasification*, Proc. ECOpole 2015, 9, s. 15–17.
- [23] S. Werle, *Gasification of a Dried Sewage Sludge in a Laboratory Scale Fixed Bed Reactor*, „Energies” 2015, 8, s. 8562–8572.
- [24] N. Gao, Q. Cui, N. Miskolczi, A. Egedy, *A new method combining hydrothermal carbonization and mechanical compression in-situ for sewage sludge dewatering: Bench-scale verification*, „Journal of Analytical and Applied Pyrolysis” 2019, 139, s. 187–195.

- [25] P. Munsik, L. Sunkyoung, Y. Seungjae, Ji Hae Seo, P. Donghee, *A study of solubilization of sewage sludge by hydrothermal treatment*, „Journal of Environmental Management” 2019, 250, s. 109490.
- [26] Ch. Wang, U. Hornung, W. Zhu, N. Dahmen, *Char and tar formation during hydrothermal treatment of sewage sludge in subcritical and supercritical water: Effect of organic matter composition and experiments with model compounds*, „Journal of Cleaner Production” 2020, 242, s. 118586.
- [27] J.M. Jarvis, J.M. Billing, A.J. Schmidt, R.T. Hallen, T.M. Schaub, *Assessment of Hydrothermal Liquefaction Biocrudes from Sewage Sludge, Microalgae, and Pine Feedstocks*, „Energy Fuels” 2018, 32, s. 8483–8493.
- [28] M. Escala, Ch. Koller, R. Junge, R. Krebs, *Hydrothermal Carbonization as an Energy Efficient Alternative to Established Drying Technologies for Sewage Sludge: A Feasibility Study on a Laboratory Scale*, „Energy & Fuels” 2013, 27, s. 454–460.
- [29] L. Wang, A. Li, *Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: A review*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2019, 108, s. 423–440.
- [30] M. Pecchi, *Coupling anaerobic digestion with gasification, pyrolysis or hydrothermal carbonization: A review*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2019, 105, s. 462–475.
- [31] K.-H. Lin, J.-Y. Zeng, H.-L. Chiang, *Temperature influence on product distribution and characteristics of derived residue and oil in wet sludge pyrolysis using microwave heating*, „Science of the Total Environment” 2017, 584–585, s. 1248–1255.
- [32] R.Z. Gaur, O. Khoury, M. Zohar, E. Poverenov, R. Darzi, Y. Laor, R. Posmanik, *Hydrothermal carbonization of sewage sludge coupled with anaerobic digestion: an integrated approach for sludge management and energy recycling*, „Energy Conversion Management” 2020, 24:113353; <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.11335341>.
- [33] M. Puccini, A.L. Tasca, M. Gemma, A. Raspolli, S. Vitolo, G. Riccardo, *Hydrothermal carbonization of sewage sludge: process optimization by response surface methodology*, Conference: 3rd IWA Resource Recovery Conference at Venice.
- [34] A. Mlonka-Mędrala, M. Sieradzka, A. Magdziarz, *Thermal Upgrading of Hydrochar from Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste Organic Fraction*, „Fuel” 2022, 324, s. 124435.
- [35] N. Gao, Z. Li, C. Quan, N. Miskolczi, A. Egedy, *A New Method Combining Hydrothermal Carbonization and Mechanical Compression In-Situ for Sewage Sludge Dewatering: Bench-Scale Verification*, „J. Anal. Appl. Pyrolysis” 2019, 139, s. 187–195.
- [36] H.B. Sharma, B.K. Dubey, *Binderless Fuel Pellets from Hydrothermal Carbonization of Municipal Yard Waste: Effect of Severity Factor on the Hydro char Pellets Properties*, „J. Clean. Prod.” 2020, 277, s. 124295.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w sprzedaży wysyłkowej:
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISSN 2658-0799

ISBN 978-83-7493-283-7