

Streszczenie

Osiągnięcie głębokiej dekarbonizacji paliw przy równoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa energetycznego wymaga ścieżek, które przekształcają odnawialną energię elektryczną oraz biogeniczny węgiel w nośniki energii typu drop-in, o wiarygodnych parametrach sprawnościowych, kosztowych i środowiskowych. Wodór odgrywa w tym kluczową rolę: jako czysty produkt pośredni i zmienna projektowa może sprzęgać elektrolizę, odzysk ciepła, zarządzanie tlenem i węglem oraz syntezę paliw w układy poligeneracyjne współwytwarzające paliwa gazowe i ciekłe. Niniejsza rozprawa weryfikuje hipotezę, że integracja zorientowana na elektrolizer, łącząca wodór z ukierunkowanymi separacjami oraz sprzężeniem ciepłno-elektrycznym, może systematycznie podnosić sprawność konwersji, obniżać poziomowy koszt paliwa i redukować oddziaływania typu cradle-to-gate. Z wykorzystaniem Aspen Plus 12.1 i SimaPro 10.2 opracowano zunifikowane ramy analityczne łączące szczegółowe modelowanie termodynamiczne z oceną techno-ekonomiczną oraz atrybucyjną i konsekwencyjną analizą cyklu życia dla ośmiu konfiguracji: biogaz → metanol (układ bazowy oraz wariant z odzyskiem chłodu LNG i turbiną tlenową), biomasa → metanol przez gazyfikację (z magazynowaniem energii w sprężonym powietrzu i cieple oraz bez niego), trzy zielone ścieżki produkcji amoniaku oparte na elektrolizie lub gazyfikacji oraz reakcji water-gas shift (WGS) oraz wariant zrównoważonego paliwa lotniczego (SAF) metodą Fischera-Tropscha. Kluczowe wskaźniki efektywności obejmują całkowitą sprawność energetyczną, poziomowy koszt paliwa (LCOF), potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) oraz wskaźnik wyczerpywania zasobów kopalnych (FDP).

We wszystkich ścieżkach główną dźwignią pozostaje integracja wokół elektrolizera stałotlenkowego (SOEC). System biomasa → metanol, uzupełniony o magazynowanie energii w sprężonym powietrzu i cieple, zamienia przejściowe strumienie ciepła odpadowego w stabilną produkcję biometanolu i osiąga ok. 95% sprawności, koszt ok. 602 USD/t oraz GWP rzędu 0,135 kgCO₂eq/kg paliwa. W przypadku poligeneracji opartej na gazyfikacji, współwytwarzającej substytut gazu ziemnego oraz biometanol przy skoordynowanym zarządzaniu tlenem i CO₂, uzyskano ok. 82% sprawności, koszt ok. 961 USD/t, GWP ok. 0,167 kgCO₂eq/kg paliwa oraz FDP ok. 0,0345 kg ropy ekw./kg paliwa. Nakłady inwestycyjne koncentrują się na elektrolizerze i pętli syntezy. Konfiguracja biogaz → metanol zasilana energią wiatrową, z odzyskiem chłodu LNG i turbiną tlenową, osiąga GWP ok. 0,206 kgCO₂eq/kg paliwa oraz FDP ok. 0,042 kg ropy ekw./kg paliwa.

Dla amoniaku wyniki zależą od konstrukcji układu WGS oraz zakresu pracy elektrolizera. Preferowany jest wariant biomasa → amoniak z przeciwpłądowym, membranowym reaktorem WGS, który osiąga ok. 54,6% sprawności, koszt 513 USD/t oraz GWP ok. 0,175 kgCO₂eq/kg paliwa dzięki lepszemu odzyskowi wodoru i zintegrowanemu zarządzaniu wodorem, tlenem i azotem.

Ścieżka zrównoważonego paliwa lotniczego uwiadczenia kompromisy charakterystyczne dla paliw silnie zelektryfikowanych: sprawność elektryczna wynosi ok. 56,2%, koszt reprezentatywny ok. 1 893 USD/t, a GWP 0,464 kgCO₂eq/kg paliwa. Sekcje elektrolizera i syntezy dominują w strukturze nakładów inwestycyjnych. Kluczowe jest źródło energii elektrycznej: zasilanie wiatrowe wyraźnie poprawia wskaźniki środowiskowe, istotnie obniżając GWP i FDP względem polskiej sieci, podczas gdy obecne ceny energii z sieci pozostają korzystniejsze ekonomicznie.

Podsumowując, reguły optymalizacji projektowej są następujące: preferowanie wysokotemperaturowych SOEC tam, gdzie możliwa jest integracja cieplna; dla amoniaku – stosowanie przeciwpłądowego, membranowego układu WGS; odzysk chłodu LNG i wykorzystanie turbin tlenowych tam, gdzie priorytetem jest odciążenie sieci oraz recyrkulacja spalin; współwytwarzanie paliw gazowych i ciekłych w celu ograniczenia ryzyka związanego ze zmiennością cen energii elektrycznej; oraz priorytetowe traktowanie energii odnawialnej w sytuacji dominacji kryteriów środowiskowych.

Słowa kluczowe:

Optymalizacja, energetyka wodorowa, analiza cyklu życia (LCA), analiza techno-ekonomiczna, biopaliwa, CCUS (wychwytywanie, wykorzystanie i składowanie CO₂).