

Streszczenie

Globalne przejście na zrównoważone systemy energetyczne wymaga efektywnej konwersji biomasy i zasobów odpadów biodegradowalnych. Procesy termochemiczne, takie jak zgazowanie i spalanie, są kluczowe dla tych działań, jednak ich inherentna złożoność, wynikająca ze sprzężonych zjawisk fizycznych i chemicznych oraz ich wieloskalowości, stanowi poważne wyzwanie dla optymalizacji. Modelowanie matematyczne pozostaje podstawowym wsparciem w zakresie rozwoju innowacyjnych efektywnych technologii, jako komplementarne do nierzadko kosztownych i czasochłonnych badań eksperymentalnych. Tradycyjne podejścia modelowe często koncentrują się albo na szczegółowej analizie samego urządzenia, albo na wydajności układu, tworząc lukę między fundamentalnym zrozumieniem a zastosowaniem operacyjnym. Celem pracy badawczej było opracowanie i przedstawienie holistycznych, wielkoskalowych ram do analizy, monitorowania i optymalizacji systemów konwersji termochemicznej. Obejmują one numeryczne modelowanie szczegółowych zagadnień wymiany ciepła i masy w ośrodku reaktywnym oraz zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego do przewidywania charakterystyki systemu.

Badania opierają się na trzech połączonych ze sobą filarach. Po pierwsze, aby poszerzyć fundamentalne rozumienie zjawisk na poziomie urządzenia jako komponentu systemu, opracowano nowatorską, własną sprzężoną metodę eulerowsko-lagranżowską (z ang. Dynamic Coupled Eulerian-Lagrangian (DCEL)), do modelowania zjawisk fizykochemicznych w skali zbioru cząstek paliwa, z uwzględnieniem ich kurczenia się, wymiany ciepła i uwalniania gazu, wewnątrz zgazowarki. Syngas może być wykorzystywany bezpośrednio jako paliwo w układach produkcji ciepła i energii elektrycznej, jako surowiec do produkcji innych nośników energii, takich jak wodór oraz paliwa syntetyczne, jak również chemikaliów. Jednym z czynników istotnych dla stopnia konwersji paliwa, a zatem jakości i ilości generowanego gazu jest szybkość przesuwu paliwa. Zaproponowany model DCEL, w przeciwieństwie do jednowymiarowych modeli bazujących na podejściu eulerowskim, powszechniej stosowanych do modelowania małoskalowych reaktorów zgazowujących ze złożem paliwa, umożliwia określenie zmiennej wzdłuż reaktora prędkości przemieszczania się paliwa, powiązanej ze zmienną objętością odgazowujących cząstek. Tym samym, badania koncentrują się na dynamice rozkładu biomasy, która ma kluczowe znaczenie przy rozważaniu optymalnej ścieżki technologicznej dla konkretnego surowca. Zdolności predykcyjne i wydajność obliczeniową metody porównano jakościowo z bardziej zaawansowaną metodą, tak zwaną eXtended Discrete Element Method (XDEM), a ich przewidywania porównano z rezultatami badań eksperymentalnych.

Po drugie, zakres analizy poszerzono na poziom systemowy poprzez zastosowanie metod uczenia maszynowego (ML). Opracowano, oparty na danych, model przemysłowej instalacji spalania osadów ściekowych. Integruje on symulacje Aspen Plus z algorytmami ML, w tym algorytm wzmacniania gradientowego (z ang. Gradient Boosting) oraz nowatorską technikę regresji łańcuchowej, w celu przewidywania kluczowych wskaźników wydajności i identyfikacji optymalnych warunków pracy dla poprawy efektywności energetycznej instalacji. Po trzecie, kontynuując analizę spalarni osadu ściekowego pod kątem optymalizacji zużycia energii, praca obejmuje także wdrożenie cyfrowego bliźniaka (ang. digital twin), działającego w czasie rzeczywistym. Integruje on modele fizyczne, obliczenia analityczne oraz dane operacyjne w środowisku symulacji dynamicznej (AnyLogic). Cyfrowy bliźniak umożliwił optymalizację energetyczną układu w pętli zamkniętej poprzez analizę scenariuszy, pokazując zweryfikowaną strategię, która pozwala zredukować zużycie paliwa wspomagającego w postaci biogazu o 40%, przy jednoczesnym utrzymaniu zgodności operacyjnej.

Niniejsza praca dostarcza kompleksowych ram, które integrują zaawansowane modelowanie numeryczne skomplikowanych procesów transportu w złożu paliwa stałego, z analityką opartą na danych oraz technologią cyfrowych bliźniaków. Uzyskane wyniki pokazują, że takie wieloaspektowe podejście jest niezbędne dla pełnego wykorzystania potencjału złożonych systemów energetycznych, dedykowanych do racjonalnego zagospodarowania dostępnych zasobów paliw biogenicznych, trudnych z uwagi na charakterystykę fizykochemiczną i jej zróżnicowanie.