

Białystok 04. 12. 2018

Dr hab. inż. Sławomir Poskrobko
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Politechnika Białostocka
Białystok, ul Wiejska 45A

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Gałko pt.:

„Wytwarzanie gazu generatorowego w procesie zgazowania węgla i odpadów”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Gałko pt.: **„Wytwarzanie gazu generatorowego w procesie zgazowania węgla i odpadów”**, zrealizowana pod kierunkiem Promotora dr hab. inż. Danuty Joanny Król. W/w praca doktorska stanowiła załącznik do pisma Pani Dziekan ds. Nauki i Organizacji Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej dr. hab. inż. Joanny Kalki prof. Pol. Śl., będącego zleceniem na wykonanie recenzji.

Tematyka podjęta w dysertacji wpisuje się w trend racjonalnej gospodarki węglem i odpadami biomasowymi z wykorzystaniem ich do wytwarzania w technologii zgazowania, palnego gazu zwanego nieraz syntezyowym. Należy dodać, że gaz syntezyowy znajduje zastosowanie w technologiach syntezy chemicznych, a ostatnio coraz częściej stosuje się go jako paliwo gazowe w niskoemisyjnych technologiach energetycznych.

Autor rozprawy skoncentrował się na badaniach eksperymentalnych procesów generatorowych, gdzie w warunkach ciśnienia atmosferycznego badał zgazowanie powietrzem wybranych paliw tj. niskopopiołowych węgli kamiennych i odpadowej biomasy. Badał skład i kaloryczność gazów syntezyowych w zależności od wartości parametru technologicznego, zdefiniowanego jako stosunek paliwa do powietrza. Dla różnych technologicznych warunków procesowych badał efektywność procesu określając sprawność chemiczną, stopień konwersji węgla i współczynnik metanizacji. Proces zgazowania realizował w skali laboratoryjnej w reaktorze nowej konstrukcji (wg koncepcji Promotora), który nazwał przeciwpłwowym reaktorem rurowym. W procesach chemicznych reaktor rurowy jest stosowany i charakteryzuje się przepływającym w rurze (reaktorze) substratem, a produkty procesu uzyskuje się w końcowym etapie przepływu. Biorąc pod uwagę ideę procesów reaktora rurowego uważam, że w rozpatrywanym przez Doktoranta przypadku, przyjęta nazwa reaktora (gazogenerator rurowy) jest właściwa, ponieważ gazowe produkty przemian (wraz z parami związków wielkocząsteczkowych) i popiół przemieszczały się wzdłuż komory reakcyjnej

S. Poskrobko

(rury) aż do wylotu. Ze względu na wysoką temperaturę, w której mogą zachodzić przemiany smół, w tych warunkach temperaturowych występujących w postaci par organicznych, skład gazu w procesie krakingu mógł się zmieniać. Należy zaznaczyć, że znane i stosowane technologie zgazowania nie są realizowane w takich warunkach rozkładu temperatur w poszczególnych strefach procesu tj. ok. 800°C – strefa nad rusztem, $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ w warstwie paliwa i ok. 800°C nad warstwą paliwa w strefie konwekcyjnej, gdzie zachodził proces rozkładu (krakingu) par organicznych między innymi do postaci metanu. Należy dodać, że taka konstrukcja gazogeneratora, ze względu na swoją prostotę, może znaleźć szerokie zastosowanie do wytwarzania ciepła i elektryczności w obiektach energetyki prosumenckiej (rozproszonej) oraz w systemach zasilania „off grid”, gdzie badane przez Doktoranta paliwa są łatwo dostępne, a zastosowana konstrukcja gazogeneratora w postaci adiabatycznej rury, może się sprawdzić dla źródeł małej mocy. W rezultacie przeprowadzonych badań uzyskano nisko i średniokaloryczny gaz syntezowy o obniżonej zawartości wodoru oraz podwyższonej zawartości metanu. Z uwagi na taką charakterystykę syngazu przedstawiony w rozprawie rezultat badawczy uznaję za oryginalny, ponieważ zazwyczaj efektem zgazowania substancji palnych w warunkach atmosferycznych i z zastosowaniem powietrza jako czynnika zgazowującego, jest gaz syntezowy bogaty w wodór i tlenek węgla, ale ubogi w metan. Należy zaznaczyć, że małe zawartości wodoru w syngazie, a podwyższone zawartości metanu znacznie ułatwiają jego zastosowanie w małej energetyce prosumenckiej ze względu na stabilność (laminarność) płomienia podczas jego spalania w źródłach małej mocy charakteryzujących się niewielkimi wymiarami paleniska. Obok badań eksperymentalnych Doktorant podjął zadanie analitycznej interpretacji badanych procesów, gdzie na podstawie wyodrębnionych głównych reakcji chemicznych zgazowania, w celu obliczenia stechiometrycznych stężeń składników gazowych, sformułował algorytm obliczeniowy. W algorytmie uwzględnił procesy metanotwórcze Fischera Tropscha i Sabatiera Sandersa zachodzące w warstwie paliwa w temperaturze $450\text{-}500^{\circ}\text{C}$. Wyniki obliczeń uzasadniły zgodność z wynikami uzyskanymi na drodze eksperymentu. W dalszej części rozprawy model obliczeniowy wzbogaca analiza efektywności chemicznej procesu tzw. „sprawność zimna zgazowania” oraz efekt przemiany węgla. Na podstawie tych wyników Doktorant dokonał oceny efektywności zgazowania w odniesieniu do badanych paliw tj. węgla kamiennych i biomasy. Wyodrębnił paliwa, w których poprzez zgazowanie w założonych warunkach procesowych o charakterze metanotwórczym uzyskano wysokie efektywności wynoszące powyżej 60% - były to paliwa biomasowe charakteryzujące się wysoką zawartością części lotnych. Paliwa węglowe, pomimo wyższych zawartości węgla pierwiastkowego, w założonych warunkach procesowych eksperymentu, były znacznie mniej efektywne jeśli chodzi o tzw zimną sprawność zgazowania oraz wskaźnik konwersji węgla.

Na zakończenie rozważań badawczych Doktorant wprowadza nowe kryterium oceny efektywności procesu metanizacji tj. uwodornienia CO i CO₂, gdzie punktem wyjścia są reakcje uwodornienia (Fischera Tropscha i Sabatiera Sandersa). W ramach kryterium analizował stosunki substratów do głównego produktu, jakim jest metan CH₄. Metody takie są stosowane w analizie termodynamicznej efektywności dowolnych reakcji chemicznych, a w tym przypadku zostały ona zaadaptowane przez Doktoranta do oceny efektywności procesów metanizacji (wytwarzania metanu) w procesie zgazowania.

Należy podkreślić, że zastosowana metodyka badawcza w tym uzyskane wyniki wskazują na oryginalny charakter rozprawy i stanowią wartościową wiedzę dla wdrożenia nowych technologii zgazowania, które w tym przypadku polegają na uaktywnieniu reakcji uwodorniania CO i CO₂ do uzyskania CH₄. Na tym etapie badań, które zaprezentował Doktorant, proces taki jest charakterystyczny dla gazogeneratorów o niewielkich mocach np. do 500 kW. Problematyka ta jest istotna ze względu na aktualne potrzeby rozwojowe w zakresie nowych niskoemisyjnych technologii niezbędnych dla budowy (wdrożenia) systemów małej energetyki prosumenckiej, zaopatrywanej w najłatwiej dostępne paliwa stałe.

Przedstawiona do recenzji praca jest poprawnie skonstruowana, aczkolwiek brakuje w rozdziale 2 pt.: „Cel i zakres pracy” zwartej prezentacji tez i ich komentarza. Tez pracy trzeba samemu doszukiwać się w tymże rozdziale.

Strona graficzna pracy, szczególnie w rozdziałach stanowiących kwintesencję rozprawy - to jest własne prace badawcze (rozdziały 7, 8, 9) - budzi wiele zastrzeżeń co do jakości wykonanych rysunków. Dla przykładu Rys. 9.1.1, Rys. 9.1.2 str. 46, Rys. 9.1.3, Rys. 9.1.4 str. 47 są mało czytelne ze względu na brak zastosowania różnorodności kolorystycznej, naniesionych liniowych zależności. Podobne zastrzeżenia odnoszą się do wielu innych rysunków np. niektóre z nich to: 9.2.2., 9.2.3., 9.2.4., 9.3.1., 9.3.2., 9.3.3.

Rozdział 3 pt.: „Uwarunkowania prawne procesów termicznego przetwarzania paliw i odpadów” nie odnosi się do zagadnień badanych przez Doktoranta. Doktorant zawarł w nim, w krótkiej charakterystyce, uwarunkowania prawne z zakresu gospodarki odpadami regulujące kwestie termicznego ich przetwarzania. Pragnę, zaznaczyć, że Doktorant badał dopuszczone do obrotu rynkowego paliwa tj. węgiel kamienny i biomasę. W rozdziale tym na str. 18 między innymi napisał, że cytuję „Przekształcenie surowca w procesie termicznym w sposób samodzielny, określa jego właściwości fizykochemiczne” - tu wymienia te właściwości nie wskazując, że podstawą oceny palności jest wartość opałowa paliwa.

Doktorant niejasno wypowiada się w pierwszym zdaniu rozdziału 4 pt.: „Charakterystyka procesu zgazowania”, że zgazowanie paliwa stanowi cykl przemian i reakcji między paliwem, a czynnikiem konwertującym – jakie przemiany Doktorant miał na myśli – reakcje zaprezentował w dalszej części

rozdziálu. Należy również wyjaśnić w jaki sposób ilość paliwa wpływa na skład gazu syntezowego – wiersz 12 od górnego akapitu str. 19.

W rozdziale 5 niejasne jest (na stronie 23 wiersz 15,16 od dołu) stwierdzenie, że poprzez toryfikację paliwa biomasowego następuje zbliżenie właściwości tego paliwa do parametrów biomasy.

W rozdziale 6 Doktorant, na podstawie literatury, uzasadnia celowość podjętych badań poprzez wskazanie wysokowydajnych technologii stosowanych w przemyśle, pokazując w ten sposób, że tematyka, którą się zajął w rozprawie wpisuje się w trend rozwoju nowych prosumenckich technologii energetycznych. Prezentacja własnego wkładu badawczego Doktoranta stanowi dominującą część rozprawy, zawarta jest od rozdziału 7 „Opis eksperymentu” (str. 36) do rozdziału 13 „Podsumowanie i wnioski” (str. 105). Koncepcja badawcza tj. zaplanowanie eksperymentu, analityczna interpretacja stechiometryczna wybranych badań, dyskusja o efektywności zachodzących procesów oraz przyjęta interpretacja tworzenia metanu nie budzi zastrzeżeń i jak wspomniałem wyżej, stanowi oryginalny wkład Doktoranta w rozwiązywaniu problemów procesowych zgazowania paliw. Rysunek 8.2 str. 43 uzupełniono w opisie przewidywanymi reakcjami chemicznymi jakie mogą zachodzić w badanym procesie zgazowania. Wyniki badawcze procesu wskazują, że w składzie gazu syntezowego ma się do czynienia w każdym przypadku ze wzrostem metanu, a szczególnie jest to widoczne podczas zgazowania biomasy. Przedstawione na rysunku reakcje procesów metanotwórczych odnoszą się tylko do uwodornienia pierwiastka węgla i tlenu węgla, pomija się uwodornienie ditlenku węgla, które z powodzeniem może zachodzić w temperaturach w jakich Doktorant przeprowadzał eksperyment. Natomiast uwodornienie ditlenku węgla zostało uwzględnione w rozdziale 12 str. 98 podczas obliczeń współczynnika metanizacji (wzory 69-71) i wartości tego współczynnika na wykresach 12.1 – 12.7.

Niejasność w rozdziale 8 pt. „Eksperyment” na stronie 43 w piątym wierszu od dołu stanowi zapis, że strefa krakingu nad paliwem w komorze reaktora rurowego jest dogrzewana – pojawia się tu pytanie: w jaki sposób? - w opisie eksperymentu brak jest informacji na ten temat. Na stronie 56 - 2,3,4 linia od góry Doktorant pisze, że ditlenek węgla aktywnie uczestniczy jako substrat w reakcji wtórnej, to jest tworzenia tlenu węgla, reagując z węglem zawartym w substancji palnej. Z tego względu, że jest to ważna reakcja procesu zgazowania - reakcja aktywacji węgla - wymagany jest komentarz odnośnie warunków w jakich ta reakcja zachodzi. Należy pamiętać, że w komorze reakcyjnej gazogeneratora są trzy strefy temperaturowe, w związku z czym w jakiej strefie istnieje prawdopodobieństwo zajścia tej reakcji? Na tej samej stronie w wierszach 8, 9, 10, 11 od góry Doktorant pisze cytując: „.....tzw. reformingu parowym gdzie CH_4 reaguje z parą wodną...” - to wymaga komentarza, w jakich warunkach temperaturowych może zachodzić ten proces, to jest w której strefie temperaturowej jest możliwy. Dalej w tym samym rozdziale strona 57 w

6 wierszu od góry Doktorant pisze, że H_2 ulega redukcji – w tym kontekście niefortunnie i nieprecyzyjnie zostało zastosowane określenie „redukcja”. W opisach procesów chemicznych należy używać jednoznacznych określeń, charakterystycznych dla przemian chemicznych, gdzie redukcja odnosi się do przejścia na niższy stopień utlenienia. Na tej samej stronie w 10 linii od góry niejasne jest wyrażenie w zdaniu cytuję: „*Wzrost średnich stężeń CH_4 pozostawał w korelacji ze spadkiem CO i H_2 .*” - proszę o wyjaśnienie tej myśli. Sytuacja związana z rysunkiem 9.2.6. opisana przez Doktoranta w komentarzach w zasadzie powinna mieć charakter ogólnych wniosków istotnych dla procesu, a nie opisów co znajduje się na wykresach, to przecież jest widoczne. Uwaga ta odnosi się do wszystkich komentarzy stanowiących opis wykresów zamieszczonych w pracy. Wyjaśnienia wymagają rysunki 9.7.5 i 9.7.6 – w jaki sposób należy rozumieć naniesione na wykresy punkty do których przypisano stężenia składników gazowych syngazu.

W rozdziale 10 strona 74 pt.: „Stechiometryczny model równowagowy zgazowania paliw stałych” - Doktorant w pierwszym zdaniu pisze cytuję „*Poznanie dynamiki i procesu zgazowania jest kluczowe...itd...*” całe zdanie jest niezrozumiałe, co oznacza poznanie dynamiki, o jaka dynamikę tu chodzi? W tej części rozprawy (tj. w rozdziale 10) Doktorant w oparciu o równania stechiometryczne wyprowadza i rozwiązuje równania bilansowe procesu zgazowania to jest w oparciu o stechiometrię wylicza wartości stężeń składników gazowych. - o dynamice procesu nie ma tu mowy.

W rozdziale 11 str. 88 komentarz do równania 64, które definiuje stopień konwersji węgla zawartego w substancji palnej jest niezrozumiały. W zasadzie nie ma potrzeby słownego opisowego komentarza równań czy zależności przedstawionych w formie zapisu matematycznego, bowiem taka forma zapisu jest najbardziej doskonałym sposobem prezentacji.

Najważniejsze osiągnięcia badań własnych Doktorant przedstawił we wnioskach, gdzie podsumował uzyskane wyniki, wskazując optymalne parametry procesowe zgazowania badanych paliw, stechiometryczny równowagowy algorytm obliczenia procesu, efektywność chemiczną, wskaźnik przemiany węgla oraz wskazał istotę współczynnika metanizacji. Należy podkreślić, że wprowadzony przez Doktoranta współczynnik metanizacji uzupełnia wskaźniki procesowe takie jak np. wskaźnik Fischera -Tropscha tj. CO/H_2 .

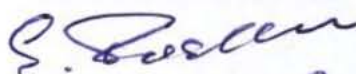
Wnioski końcowe

Wyniki badań, które Doktorant zamieścił w Rozprawie stanowią zbiór wartościowej wiedzy naukowej z zakresu podstaw procesów generatorowych ukierunkowanych na procesy metanizacji Fischera-Tropscha i Sabatiera Sandersa. Wskazał kierunek praktycznego rozwoju badanej technologii zgazowania paliw stałych dla potrzeb małej energetyki prosumenckiej. Zawarte

w recenzji uwagi krytyczne nie pomniejszają wartości merytorycznej pracy, a służą jedynie do jej wnikliwego zrozumienia w środowisku naukowym zajmującym się przedmiotową tematyką.

Stwierdzam, że Rozprawa spełnia wymagania Ustawy z dn. 14 marca 2013 roku (Dz.U.nr 65) o stopniach naukowych oraz stopniach w zakresie sztuki z późniejszymi zmianami i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Sławomir Poskrobko



04. XII. 2018