

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
mgr inż. Krzysztofa Pajączka**

**pt. „Analiza i optymalizacja układu skraplania gazu ziemnego wykorzystującego  
egzergię odpadową z systemu przesyłu i dystrybucji gazu”**

**1. Charakterystyka ogólna pracy doktorskiej**

Recenzowana praca doktorska zawiera 7 podstawowych rozdziałów oraz literaturę, spis rysunków oraz spis tabel. Praca zawiera łącznie 181 stron. Praca zawiera wykaz (niepełny) symboli i oznaczeń. Praca zawiera liczne rysunki (w sumie 58) i tablice (łącznie 18). Spis literatury obejmuje 107 pozycji włącznie ze źródłami elektronicznymi.

**2. Charakterystyka szczegółowa pracy doktorskiej**

**2.1. Wybór tematu pracy i analiza stanu wiedzy**

Wybór tematyki pracy doktorskiej uważam za ważny z punktu widzenia rozwoju przemysłu gazowniczego w Polsce oraz procesów transformacji energetycznej związanej z polityką klimatyczną EU. Wprawdzie, w szeregu publikacji naukowych i raportach związanych z procesem transformacji umniejsza się rolę gazu ziemnego (jako paliwa kopalnego), tym niemniej gaz ziemny w najbliższych 50 lat będzie stanowił 'paliwo przejściowe' - jako wsparcie dla niskoemisyjnej gospodarki. Rola skroplonego gazu ziemnego (LNG) rośnie w ostatnich latach z uwagi na znaczne zmniejszenie kapitałochłonności budowy terminali

skraplających oraz gwałtowny rozwój rynku. Przewiduje się, że do roku 2035 transport gazu ziemnego w postaci skroplonej (LNG) będzie miał co najmniej 50% udział w odniesieniu do globalnego handlu gazem ziemnym.

Przedmiotem recenzowanej pracy doktorskiej jest analiza możliwości skraplania gazu ziemnego w instalacjach tzw. małej skali (tzw. „small scale LNG”-(SSLNG)) lub skali „mikro LNG”. Podział na instalacje w skali dużej, średniej i małej ma umowne znaczenie, jednak przyjmuje się, że ‘mała skala’ w procesie skraplania gazu odnosi się do wytwarzania LNG w zakresie 0,05-1 mln t LNG rocznie<sup>1</sup>. Pierwsze instalacje typu SSLNG” zostały zrealizowane do regazyfikacji gazu odparowanego w trakcie transportu morskiego LNG (skraplanie gazu „BOG”). Oznacza to, że do instalacji SSLNG zalicza się te, które skraplają powyżej 17 t LNG/d, co z kolei odnosi się do strumienia skraplanego gazu większego powyżej 200 tys. Nm<sup>3</sup> na dobę.

Skala poniżej 50 tys.t LNG na rok odnosi się z kolei do instalacji „micro LNG”. O ile instalacje „SSLNG” funkcjonują w przemyśle od co najmniej 10 lat, głównie z uwagi na konieczność zagospodarowania małych złóż gazu ziemnego położonych w dużej odległości od systemu przesyłowego (tzw. ‘stranded gas’), małych ilości gazu wydobywanych z izolowanych złóż metanu z pokładów węglowych (CBM), małych złóż gazu położonych w strukturach podmorskich lub na wyspach, zagospodarowania nadmiarowego gazu z odparowania transportowanego LNG na gazowcach w procesie „boil-off”. Nowe zastosowania instalacji „SSLNG” oraz „micro LNG” mogą dotyczyć wytwarzania paliwa (gazu skroplonego - LNG) dla ciężarowych pojazdów samochodowych (aktualnie ok. 150 tys. takich pojazdów w świecie) , zasilania innych systemów transportowych (transportu kolejowego, napędu statków morskich (np. na Morzu Bałtyckim)), czy też do wykorzystania w ramach tzw. „wyspowej” gazyfikacji wykorzystującej lokalnie systemy magazynowania i odparowania gazu skroplonego (LNG).

Instalacje SSLNG te mogą również być wykorzystane do skraplania, gromadzenia i ponownego odparowania gazu ziemnego w tzw. rozwiązaniach „LNG peak shaving”. Przypomnieć należy, że pierwsza instalacja LNG działająca w latach 1941-1943 była przeznaczona na takie zastosowanie LNG. Instalacje typu ‘peak shaving’ wykorzystują ‘nadmiarowy’ transport gazu ziemnego do jego lokalnego magazynowania w postaci skroplonej (LNG)

---

<sup>1</sup> Definicja wg IGU (2015). IGU – International Gas Union.

z przeznaczeniem na późniejsze jego wykorzystanie w okresie zwiększonego zapotrzebowania lub wykorzystanie do zasilania transportu kołowego. Na świecie jest ponad 300 takich instalacji.

## 2.2. Cel pracy doktorskiej

Podstawowym celem pracy – jak wskazano w rozdziale 1.6 – jest zaprojektowanie modelu jednostki skraplającej o mini skali, która powinna się charakteryzować się zerową energochłonnością. Doktorant założył, utworzenie jednostki skraplającej gaz ziemny, która będzie korzystać z egzergii odpadowej dostępnej w sieci przesyłu lub dystrybucji gazu. Założył, że przedmiotem analizy termodynamicznej będą najpopularniejsze jednostki skraplania gazu ziemnego (NEC, C3MR, MFCP<sup>2</sup>), zostanie też przeprowadzona identyfikacja potencjalnych źródeł energii odpadowej oraz wybór źródła energii odpadowej. Doktorant założył, że zostanie przeprowadzona analiza termodynamiczna układu skraplania gazu ziemnego zintegrowanego z zaproponowanym układem odzysku egzergii odpadowej. Wariant o najlepszych parametrach oraz o najniższej energochłonności i najwyższej sprawności egzergetycznej miał zostać poddany optymalizacji względem uzyskania najlepszej sprawności egzergetycznej. Ostatecznym wynikiem pracy miał być projekt jednostki skraplających zintegrowanej z układem odzysku energii o tzw. „zerowej energochłonności” i możliwie najwyższej uzyskanej sprawności egzergetycznej. Analiza treści pracy wskazuje, że Doktorant zajmował się także koncepcja i analizą tzw. kosztu termoeologicznego. Zagadnienie to nie zostało wymienione jako cel pracy w rozdz. 1.6.

Problem ograniczenia zużycia energii w trakcie procesu skraplania gazu ziemnego w instalacjach „SSLNG” i „micro LNG” można traktować jako bardzo ważny. Niemniej z uwagi na konieczność uwzględnienia kosztów wytworzenia wspomnianej instalacji w odniesieniu do uzyskanego nieznacznego strumienia skroplonego gazu taka analiza może okazać się nieistotna. Zwykle przyjmowana jest granica stosowalności w odniesieniu do przyjętej rentowności przedsięwzięcia, chyba, że efekty ekonomiczne nie są istotne. Rozwój wydajnych systemów do skraplania gazu ziemnego oferuje potencjalne oszczędności energii w odniesieniu do wcześniejszych rozwiązań w poprzez optymalizację kosztów eksploatacji. Można wskazywać na inne rozwiązania optymalizacyjne m.in. poszukujące minimalizacji kosztów kapitałowych, kosztów operacyjnych.

---

<sup>2</sup> NEC, C3MR, MFCP – brak opisu skrótów w pracy. Chodzi o cykl rozprężania azotu (NEC), układ z system wstępnego schładzania propanem (C3MR), ulepszony system kaskadowy Linde (MFCP)

Teoretyczną podstawą analizy energetycznej jest pierwsza zasada termodynamiki. Analiza energetyczna jest często niewystarczająca do oceny wydajności systemu, uwzględnia jedynie ilość strat termodynamicznych występujących w systemie, a nie jakość energii. Analiza egzergetyczna, z kolei, wykorzystująca drugą zasadę termodynamiki, jest przydatna w identyfikacji przyczyn, lokalizacji i skali nieefektywności procesów. Minimalizacja strat egzergii jako rozwiązanie optymalizacyjne umożliwia zmniejszenie zużycia egzergii (i energii). Zagadnienie optymalizacji procesów skraplania gazu ziemnego jest wyzwaniem obliczeniowym jeżeli problem optymalizacyjny traktuje się optymalizacją wielokryterialną.

Recenzowana praca doktorska dotyczy m.in. zagadnień związanych z możliwością realizacji procesu skraplania gazu ziemnego na tłoczniach gazu oraz na stacjach redukcyjnych wysokiego, podwyższonego ciśnienia oraz średniego ciśnienia.<sup>3</sup> Zakłada się w pracy możliwość wykorzystania wysokometanowego gazu ziemnego (grupy E)<sup>4</sup>. Parametry gazu ziemnego w instalacjach przesyłowych są wystarczające do transportu oraz wykorzystania gazu w celach komunalnych, energetycznych czy przemysłowych. Transportowany gaz może zawierać małe ilości siarki (H<sub>2</sub>S, merkaptany, SO<sub>x</sub> – sumarycznie <56mg/m<sup>3</sup>), CO<sub>2</sub> (<3%), azotu (brak wymagań ilościowych). Gaz transportowany w sieci zawiera wodę w ilości znacznie powyżej 1 ppmv (zwykle 80-100 ppmv) dlatego wymagane jest osuszenie gazu metodą adsorpcyjną (na sitach molekularnych).

W pełni zrozumiałe jest poszukiwanie źródeł odpadowej egzergii w celu jej wykorzystania w procesie skraplania. Takie rozwiązania technicznie wykorzystania dodatkowych źródeł energii są możliwe w realizacji przemysłowej, ale powinny uwzględniać wszystkie procesy towarzyszące głównemu procesowi skraplania. W tym miejscu pojawiają się pytania odnośnie możliwości zastosowania takich instalacji na stacjach redukcyjnych czy

---

<sup>3</sup> Nazewnictwo i definicje stacji redukcyjnych podane w pracy są niewłaściwe (zob. Dz. Ust. z dnia 4 czerwca 2013 r., poz. 640, ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI z dnia 26 kwietnia 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie). Zwyczajowo nazewnictwo opisujące stacje redukcyjne pierwszego i drugiego stopnia odnosiło się odpowiednio do redukcji ciśnienia wysokiego ciśnienia do średniego oraz średniego ciśnienia do niskiego ciśnienia. Wprowadzenie pojęcia 'podwyższonego' ciśnienia wymusiło zmianę nazewnictwa stacji redukcyjnych.

<sup>4</sup> Dz.U. 2018 poz. 1158 z dnia 2018.06.15. Obwieszczenie Ministra Energii z dnia 16 maja 2018 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu gazowego, § 38.1

tłoczniach w Polsce. Drugim i komplementarnym jest oczywiście pytanie o ekonomiczną opłacalność konstrukcji takich układów w połączeniu z kosztami eksploatacyjnymi.<sup>5</sup>

Na pierwsze pytanie wypowiedział się Doktorant oraz profesorowie Wojciech Stanek i Wojciech Kostecki negatywnie – w artykule opublikowanym w Energy (2020) 117726 (publikacja z dn. 5.05.2020) pt. „Natural gas liquefaction using the high-pressure potential in the gas transmission system”. Recenzent zdecydowanie podziela konkluzje przytoczonego artykułu, które nie pokrywają się jednak z ocenami i wynikami tej recenzowanej rozprawy w kontekście możliwości wdrożenia.

Zauważyć należy, że znaczna część niniejszej pracy pokrywa się z tekstem publikowanym we wzmiankowanym artykule, ale do jego autorstwa przypisane są trzy osoby. Z kolei w tekście pracy doktorskiej brak jest odpowiednich przywołań cytatów z wymienionego artykułu.

Odpowiedź na pytanie o ekonomiczną opłacalność konstrukcji takich układów w połączeniu z kosztami eksploatacyjnymi jest częściowo zawarta w pracy w odniesieniu do kosztów egzergii.

### **2.3. Teza pracy doktorskiej**

Praca nie zawiera klasycznej tezy, dlatego trudno w sposób bezpośredni odnieść się do niej. Pośrednio można wnioskować, że Doktorant uważa, że możliwe jest zbudowanie układu do skraplania o tzw. zerowej energochłonności wykorzystując egzergię odpadową z instalacji transportu gazu<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> W przypadku rekomendacji proponowanych technologii, zagadnienia związane z bezpieczeństwem i niezawodnością systemu gazowniczego są i powinny być analizowane w sposób szczególny, z uwagi na potencjalne zagrożenia dla środowiska naturalnego, zdrowia i życia, z także z uwagi na znaczenie ekonomiczne systemu energetycznego.

<sup>6</sup> Innym rozwiązaniem związanym z redukcją ciśnienia w stacjach redukcyjnych jest np. koncepcja redukcji ciśnienia gazu o zerowej energii dostarczonej netto, tj. samowystarczalnego pod względem energetycznym, oraz o zerowej emisji dwutlenku węgla., w której energia odpadowa dostępna w procesie redukcji ciśnienia gazu jest przekształcana na energię elektryczną i ciepło, odpowiednio do procesów osuszania i podgrzewania gazu, bez jego skraplania (Osładacz A., M. Chaczykowski, M. Kwestarz, N. Isoli, 2018, Koncepcja zero-energetycznej stacji gazowej dla przemysłu gazowniczego, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, t.4, p. 122-126)

## 2.4. Opis istotnych elementów pracy

Rozdział pierwszy obejmuje podstawowe informacje dotyczące rozwoju gazownictwa w świecie, definiuje możliwe wykorzystanie gazu ziemnego w gospodarce, a także opisuje system dystrybucji i przesyłu gazu ziemnego w Polsce. Rozdział ten zawiera także informacje o możliwości skraplania gazu ziemnego, a także opisuje w sposób uproszczony technologie skraplania gazu ziemnego z wyszczególnieniem metod skraplania oraz skali przedsięwzięcia. Dość nieszczęśliwie Doktorant używa pojęcia 'wyprodukowanego LNG' co dotyczy skroplonego gazu ziemnego. Doktorant definiuje typy instalacji do skraplania gazu ziemnego zgodnie z literaturą, wskazując na zakres tzw. dużej skali, średniej, małej oraz tzw. mini skali skraplania LNG<sup>7</sup>. Doktorant definiuje też pojęcie energochłonności procesów LNG wskazując przy tym na klasę tzw. „wysokiej energochłonności” (>0,6 kWh/kg) , „przeciętnej energochłonności” (0,3 kWh/kg – 0,6 kWh/kg), „niskiej energochłonności” (< 0,3 kWh/kg), wreszcie „zerowej”. „Zerowa energochłonność” według autora wiąże się z wykorzystaniem energii spoza układu, jest to dość nieprecyzyjna definicja. Doktorant wskazuje, że nie istnieją w tej chwili komercyjne układy tzw. „zerową energochłonnością”. W rozdziale tym Doktorant omówił też zagadnienie uzdatniania gazu przed procesem skraplania.

Jednym z istotnych zagadnień pracy jest identyfikacja źródeł energii odpadowej. Zagadnienie to omawiane jest w rozdziale 2. Przeprowadzono analizę danych pomiarowych 14 obiektów: dwóch stacji redukcyjnych zasilających tłocznie, dwóch tłoczni gazu ziemnego, a także 10-ciu stacji redukcyjnych, które Doktorant nazywa 'miejskimi'. Wynikiem analizy jest oszacowanie potencjalnych źródeł energii odpadowej, wskazano na kluczowe źródło energii, które wykorzystano do stworzenia modelu jednostki redukcyjnej ze skraplaniem gazu o tzw. „zerowej energochłonności”. Autor omówił kwestę zastąpienia zaworu JT przez gazową turbinę rozprężną. W dalszej części Doktorant opisał model układu zintegrowanej stacji redukcyjnej z jednostką skraplającą gaz ziemny. W rozdziale tym oszacowano możliwości zagospodarowania ciepła odpadowego na tłoczniach i stacjach redukcyjnych. Doktorant klasyfikuje stacje redukcyjne z uwagi na możliwą konwersję energii mechanicznej na elektryczną.

---

<sup>7</sup> w zakresie definicji skali skraplania gazu ziemnego – występują rozbieżności w literaturze i dyskusje, brak jest jednoznacznych definicji, najbardziej znaną jest klasyfikacja IGU (2015).

W rozdziale trzecim Doktorant opisuje możliwe rozwiązania technologiczne linii skraplającej gaz ziemny w połączeniu z wybranym typem stacji redukcyjnej. Omówiono bilans energii i proces osuszania gazu metodą adsorpcyjną, a także proces usuwania CO<sub>2</sub> metodą aminową (Niezbyt szczęśliwie włączono do tekstu pracy podrozdziały 3.2.2.i 3.2.3) . W rozdziale 3 zdefiniowana jest też metodyka obliczeń sprawności energetycznej i egzergetycznej. Omówiono też bilans egzergii (rozd. 3.2.5) oraz wprowadzono pojęcie kosztu termoeologicznego (rozd. 3.2.6). Zestawiono obliczenia energochłonności oraz zapotrzebowania na energię analizowanych układów skraplających (6 instalacji). Wyznaczono też sprawności energetyczne, egzergetyczne oraz tzw. koszt termoeologiczny dla wspomnianych 6-ciu typów instalacji, dla dwóch metod skraplania „C3MR” (wykorzystanie mieszanego czynnika chłodniczego z wstępnym schładzaniem z użyciem propanu) oraz „NEC” (cyklu z rozprężania azotu). Ta część pracy zawiera też analizę ekonomiczną kosztów skraplania LNG w oparciu o przyjęte dwa scenariusze cen gazu (amerykański i belgijski). Nie wiadomo, dlaczego nie ma analizy dla warunków polskich, skoro układ skraplania ma być stosowany na terenie polskich stacji redukcyjnych. Analiza kosztów nie jest opisana w sposób zrozumiały (tzw. ‘wstępna analiza’).

Rozdział 3.3.5 dotyczy sposobu liczenia egzergii chemicznej układów wieloskładnikowych i jest nieszczęśliwie ułożony po sekwencji tekstu dotyczącego wyznaczania sprawności egzergetycznych i efektów ekonomicznych. Ta część jest niezrozumiała, a twierdzenia (tzw. ‘udowodnienia’) powinny zostać pokazane na przykładach. Wyliczenia Doktoranta odnośnie możliwości pominięcia wpływu części egzergii chemicznej (tzw. „egzergii koncentracji”) wymagają szerszego wyjaśnienia. Recenzent nie zauważył, ażeby w innych opracowaniach literaturowych ten człon egzergii chemicznej był pomijany.

Rozdział czwarty obejmuje ‘głęboką integrację stacji redukcyjnej z linią skraplania gazu”. Proponowane rozwiązanie sprowadza się do propozycji zbudowania nowej stacji redukcyjnej wykorzystującej system osuszania gazu ziemnego, usuwania CO<sub>2</sub>, rozprężania gazu w ekspanderze z separacją cieczy w połączeniu z układem skraplania NEC (rys. 30, 31) lub z układem skraplania SMR (rys. 30, 32). Trzecim rozwiązaniem jest zmodyfikowany system kaskadowy (rys. 30, 33, 34, 35). W rozdziale tym opisano również metodykę określania sprawności egzergetycznej wymienionych trzech technologii skraplania. Pokazano kosztochłonność uzdatniania gazu (osuszanie na sitach molekularnych). Omówiono efekty energetyczne i sprawności układów dla sześciu instalacji różnej skali dla trzech technologii. Rozdział zawiera podsumowanie i wnioski.

Rozdział piąty dotyczy optymalizacji parametrów pracy jednostki skraplającej zaproponowanej w rozdz. 4. Omówiono podstawy optymalizacji typu „PSO” (Particle Swarm Optimization /optymalizacja ‘rojem cząstek’). Zdefiniowano funkcję celu w postaci sumy kosztu termoeologicznego, energochłonności i ujemnej sprawności egzergetycznej (równanie 62). Zalety przyjętej funkcji celu powinny być w sposób jednoznaczny pokazane. Zdaniem recenzenta przyjęta funkcja jest niewłaściwa. Model separacji faz opisany w rozdziale 5.4 nie wnosi nic nowego, raczej przywołuje rozwiązania termodynamiczne z początku XX wieku<sup>8</sup>. Wprawdzie w równaniu 75 Doktorant wskazuje możliwość wykorzystania bardziej nowoczesnego podejścia termodynamicznego, to równania 79-82 cofają model do równań Raoult-Daltona. W rozdziale 5.4.8 Doktorant wspomina o budowie ‘zaawansowanego modelu separacji faz’ z wykorzystaniem równania stanu Soave-Redlich-Kwonga. Dość nieszczęśliwie w rozdziale nazywane są reguły mieszania jako tzw. reguły krzyżowe. Równania 88, 90, 91, 96, 97 zawierają błędy. W sposób błędny Doktorant definiuje fugatywność i współczynnik fugatywności dla i-tego składnika w rozworze (gazowym, ciekłym) (rów. 96 i 97).

Równanie 99 definiuje warunek równowagi fazowej wyłącznie dla punktu wrzenia, co wynika wprost z równania 85 (dla  $V=0$ ). Schemat blokowy obliczeń separacji (rys. 43) jest błędny – nie opisuje schematu obliczeń dwufazowych tyłu ‘flash’. Pokazane w tab. 16 przykładowe wyniki składu fazy ciekłej nie są powiązane z żadnym punktem obliczeń Doktoranta, nie wiadomo czego dotyczą (jaka temperatura (raczej nie kriogeniczna), jaki skład wejściowy, jakie ciśnienie).

W rozdziale 6 przedstawiono zgłoszenie patentowe dla nowej stacji redukcyjnej z wstępnym schłodzeniem gazu ziemnego przed skropleniem oraz „do wykroplenia cięższych węglowodorów”. Zdaniem recenzenta zaprezentowane zgłoszenie patentowe jako połączenie chłodnicy, zawodu ekspansyjnego, ekspandera, separatora i rozdzielaczy jest znane od końca lat 60-tych ubiegłego wieku. Rozwiązanie nie dotyczy warunków stacji redukcyjnej, z uwagi na znikomą zawartość węglowodorów  $C_{5+}$  w gazie<sup>9</sup>. Znaczenie rozwiązania jest wątpliwe, z uwagi na wymagania odnośnie składu wejściowego do systemu przesyłowego (zawartość  $C_{5+}$ ), zawartości wody w gazie (zwykle powyżej 50 ppm), wa-

---

<sup>8</sup> np. praca doktorska K. Głowackiego (AGH Kraków, 1980) zawiera przykładowy opis termodynamiczny separacji faz układu metan/azot/hel.

<sup>9</sup> odpowiednie regulacje - cytowane wcześniej - odnośnie jakości gazu ziemnego w systemie przesyłowym



runku temperatury krótkoterminowej (poniżej 0°C). Instalacje opisane na rys. 56 są instalowane jako układy uzdatniania gazu ziemnego-kondensatowego (po wcześniejszym osuszeniu) na kopalniach gazu ziemnego – także w Polsce. Z opisanych wyżej powodów nie nadają się do włączenia na stacjach redukcyjnych.

### **3. Wartość merytoryczna rozprawy doktorskiej i stopień rozwiązania zagadnienia badawczego**

Praca ma pewne znaczenie aplikacyjne, ale analizy sprawności energetycznej oraz analiza kosztów wytworzenia i kosztów operacyjnych powinny zostać powtórzone przed próbą pilotażowego zastosowania w warunkach polskich (pouważeniu warunków bezpieczeństwa i warunków lokalizacyjnych). Zaprezentowana metodyka optymalizacyjna w części poszukiwania minimum funkcji jest poprawna, jednak wartość uzyskanych obliczeń nie jest znana, z uwagi na wady związane z opisem termodynamicznym separacji faz i przyjętym kryterium optymalizacyjnym. Brak jest porównania sprawności proponowanego układu skraplającego do innych zbliżonych instalacji w świecie o podobnej skali.

Zauważyć należy, że proponowane rozwiązanie nowej „stacji redukcyjno-skraplającej” obarczone jest m.in. błędami wyznaczenia ciepła koniecznego do ogrzania gazu opuszczającego ekspander gazu przeznaczonego do dystrybucji ( $T > 0^\circ\text{C}$ ), nie jest konieczne włączenie instalacji do usuwania rtęci. Brak jest analizy wykorzystania gazu przeznaczonego do regeneracji adsorberów. Konieczne jest wykonanie ponownej analizy sprawności układu (ewentualne uzasadnienie pominięcia tych członów).

Pomimo wskazanych wad uznaję, że praca ma wartość naukową, w szczególności analiza wykonana w ramach rozdziału 3. Praca napisana jest trudnym językiem i wielokrotnie wykorzystuje sformułowania potoczne, które nie powinny być formułowane w pracy naukowej. Praca powinna być poprawiona, także od strony edycyjnej, przez jej publikację.

Wielką niezręcznością Doktoranta jest już pierwsze zdanie we wstępie pracy, które ma postać następującą: „**Wzrost zapotrzebowania na energię w życiu współczesnych społeczeństw skłania do ciągłego doskonalenia metod jej wytwarzania**”. Sens tego zdania przeczy istnieniu pierwszej zasady termodynamiki wskazując na możliwość wytwarzania energii. Być może Doktoratowi chodziło o „wytwarzanie energii elektrycznej”.

#### 4. Inne uwagi krytyczne

1. Następujące błędy dostrzeżono w zakresie listy symboli zamieszczonej na stronach 9-10:
  - fugatywność ma wymiar ciśnienia, nie jest wielkością bezwymiarową;
  - nie używa się w literaturze polskiej pojęcia „energia swobodna Gibbsa”, raczej mówimy „entalpia swobodna Gibbsa”;
  - litera „a” określająca współczynnik kohezji bardzo dziwny sposób jest opisana;
  - na stronie 10 pod znakiem  $\mu$  występuje lepkość kinematyczna, wymiar zaś dotyczy lepkości dynamicznej;
  - oznaczenia  $x_i$  czy  $y_i$  jako skład molowy i tego składnika w fazie gazowej są niezręcznością. Jest to po prostu ułamek molowy i tego składnika w fazie gazowej; podobnie współczynnik  $z_i$  nie jest to skład molowy, a ułamek molowy i-tego składnika w mieszaninie przed skropleniem.
  - brak jest wyjaśnienia skrótów używanych w trakcie pisania pracy odnoszących się do takich nazw jak MDA, NEC itp.
2. w pracy występują lapsusy językowe np.: „polityczne społeczeństwo”, „czystsze paliwa”, itp.;
3. na stronie 12-tej 15-ty wiersz od dołu Doktorant podaje następującą informację: „Według raportów wzrost zużycia gazu ziemnego na świecie w roku 2020 wyniósł 0.16% [1]”. Sądząc z informacji zamieszczonej [1] ten wzrost odnosi się do roku 2019 w stosunku do roku 2018, w roku 2020 w zakresie zużycia gazu zużycia gazu na świecie odnotowano regres - spadek zużycia gazu wyniósł około 2.1% w stosunku do roku 2019, z kolei w roku 2019 nastąpił przyrost zużycia gazu o 1.7% w stosunku do roku 2018. Dane te można znaleźć na stronach ogólnie dostępnych w Internecie.
4. mało precyzyjne informacje o występowaniu gazu ziemnego w Polsce na str. 13: „Gaz ziemny występuje w Polsce w okolicach Jasła i Sanoka, ponadto w Wielkopolsce występują złoża gazu zaazotowanego”;
5. informacja odnośnie gazu ziemnego na Antarktydzie raczej mało wiarygodna. Na szelfie Morza Rosa występują prawdopodobnie hydraty gazu ziemnego o prognostycznych zasobach 277 mld Nm<sup>3</sup>;
6. zapis odnośnie producentów gazu ziemnego raczej odnosi się do mld Nm<sup>3</sup> gazu.
7. powołanie się na źródło GAZPROMU [12] dość niezręczne, raczej należy cytować dane EIA, BP lub IEA;

8. informacja o wydobyciu gazu w Polsce w roku 2012 [13] jest wątpliwa, zwykle ilość gazu podaje się w przeliczeniu na gaz E (wysokometanowy);
9. na stronie 14 wiersz 12 od góry - informacja o sieci przesyłowej i dystrybucyjnej powinna być uzupełniona o sieć gazociągów kopalnianych obejmujących system zbioru gazu ziemnego i łączącego się z systemem rurociągów przesyłowych (w punktach zasilających) a także system gazociągów bezpośrednich;
10. na str. 14 wiersz 14 od dołu: niewłaściwa jest informacja o możliwościach transportu gazu tankowcami. Gaz ziemny skroplony (LNG) transportowany jest w temperaturze poniżej  $-150^{\circ}\text{C}$ . Tankowce nie są przystosowane do takich temperatur;
11. w literaturze polskiej nie operuje się zwykle słowem 'poziom' na określenie zakresu ciśnienia gazu ziemnego jak definiuje termin 'poziom' Doktorant na stronie 15tej. Termin 'poziom ciśnienia' odnosi do tzw. ciśnienia akustycznego lub ciśnienia krwi;
12. stwierdzenie „System przesyłowy ze względu na swój charakter pracy ma znacznie większą przepustowość niż sieć dystrybucyjna” jest bardzo kontrowersyjne. Zwykle gaz wydobyty transportowany poprzez system przesyłu i system dystrybucji gazu do końcowego odbiorcy; być może chodziło o „lokalną przepustowość”;
13. Bardzo niefortunne stwierdzenia:
  - 'sieć ta jest najmniej obecna' - str. 16 wiersz 13 od góry;
  - “zasięg dostarczania gazu ...” str. 16 wiersz 9 od dołu;
  - “Dostawa gazu może być realizowana na równych poziomach ciśnienia” - nie używa się takich sformułowań o “poziomach ciśnieniach”;
14. informacje odnośnie inwestycji firm Gaz-System i PSG na stronie 17 są bezwartościowe dla pracy doktorskiej. Podobnie jak informacje o budowie rurociągów tymczasowych. Informacja o możliwości wykorzystania gazu LNG do awaryjnego wykorzystania w sieciach przesyłowych jest niewłaściwa (str. 17), raczej jest to możliwe w sieciach dystrybucyjnych;
15. bardzo niezręczne sformułowanie: “Zgodnie z wykresem p,T mieszaniny jaką jest gaz ziemny ....” - str. 18 wiersz 6 od góry. Nie wiadomo o jaki konkretnie wykres chodzi Doktorantowi. Dla każdego składu krzywa nasycenia (krzywa rosy) ma inny przebieg. W pracy nie zdefiniowano pojęcia temperatury krykondentermu.
16. bardzo niezręczne sformułowanie (styl): “Dzięki ostatniemu z wymienionych proces ten można wykonać w każdym miejscu dzięki temu, że atmosfera zawsze gwarantuje temperaturę niezbędną do tego procesu”;

17. bardzo niezręczne sformułowanie (styl): "Odparowanie gazu ziemnego przy pomocy atmosfery...";
18. bardzo niezręczne sformułowanie (styl): "Tankowiec dostarczający LNG.."
19. bardzo niezręczne sformułowanie (styl): "Z gazu usuwany jest powstały dotychczas kondensat...". (str. 18, w.1 od dołu). Nie wiadomo, czy chodzi Doktorantowi o kondensat węglowodorowy czy wykroploną parę wodną;
20. bardzo niezręczne sformułowanie (styl): "... usunięcie siarczku..." (str. 19 wiersz 1 od góry). Czy Doktorantowi chodzi o siarkowodór ?
21. str. 19 wiersz 7 od góry, bardzo niezręczne sformułowanie (styl): "Powstałe LNG jest magazynowane i w momencie odbioru przez tankowiec bądź cysterny jest przeładowane do transportu". Kolejny raz mowa o tankowcach;
22. str. 21 wiersz 6 od góry, wiersz 8 od dołu. Termin 'mieszanka' ma raczej ograniczoną stosowalność w przemyśle gazowniczym, raczej dotyczy mieszania dwóch cieczy. W omawianym przypadku raczej występuje roztwór (lub mieszanina);
23. na stronie 42 Doktorant definiuje 3 stacje redukcyjne tak zwaną stacją redukcyjną 1go, 2go i 3go stopnia. Stacje redukcyjne zgodnie z polskim prawem definiowane są jako: stacje wysokiego ciśnienia, podwyższonego ciśnienia, wreszcie stacje średniego ciśnienia;
24. bardzo niezręczne stylistycznie sformułowanie na stronie 42, 4 wiersz od dołu i następane: "Skutki te można podzielić na trzy grupy: Termodynamika ....Mechanika...";
25. strona 43 zdanie 1 od góry, bardzo dziwne stwierdzenie: "Procedury pomiaru rozliczeniowego gazu ziemnego nie obowiązują poniżej -10°C.";
26. strona 43, wiersz 13: temperatura ta może wynosić nawet -20oC, co jest sytuacją niedopuszczalną". Stwierdzenie częściowo prawdziwe, możliwe jest rozprężanie do tej temperatury w ekspanderze po wcześniejszym osuszeniu (metodą absorpcyjną lub na sitach molekularnych) do temperatury rosy fazy wodnej niższej niż wspomniane -20°C. Jest natomiast faktem, że rozwiązanie techniczne polegające na redukcji ciśnienia bez podgrzewania gazu przed reduktorem (nazywane w gazownictwie jako tzw. „zimna redukcja”) nie jest powszechnie stosowane;
27. Na str. 43 wiersz 7 od dołu: "Można oszacować niezbędne dodatkowe ciepło do kompensacji efektu Joule'a-Thompsona<sup>1</sup> na podstawie równania (3)". Efekt Joule'a-

- Thomsona dotyczy ekspansji gazu bez wykonania pracy - dławienie ciśnienia na zaworze przebiega izentalpowo. Opisane w równaniu (3) ciepło kompensacji jest wynikiem zmiany entalpii po rozprężeniu quasi-izentropowym w ekspanderze;
28. na str. 43 wiersz 4 od dołu: niezręczne sformułowanie 'produkcja jednego kW mocy mechanicznej na ekspanderze wymaga 1 KW dodatkowej...' Słowo "produkcja" raczej odnosi się do generacji energii elektrycznej. Raczej nie mówimy o "produkcji mocy mechanicznej";
  29. str. 44 wiersz 5 od góry: ... (uzyskanego w wykonywanym projekcie) ..." niezrozumiałe sformułowanie, dotyczy nieznanego analizy;
  30. str. 44 wiersz 6 od dołu: "strumień gazu zasilającego 2716 Nm<sup>3</sup>/h'. Z rys. 14 wynika, że przepływ gazu zasilający turbinę jest zmienny w zakresie 1000-1800 Nm<sup>3</sup>/h, co prawdopodobnie ma wpływ na wyliczenie energii elektrycznej – wskazanej na str. 45 (219 MWh);
  31. str. 44 wiersz 13 od dołu: "... zasilającą tłocznię'. Konieczne doprecyzowanie. Chodzi o liczbę mnogą 'tłocznie' czy o jedną konkretną tłocznię?
  32. str. 44 wiersz 2: 'Wyniki nie uwzględniają podgrzewania paliwa...' - sformułowane niezrozumiałe;
  33. str. 46, wiersz 7 od góry: SCADA – brak definicji skrótu ;
  34. str. 46 wiersz 8 od dołu: 536 MWh. Liczba dotyczy pracy ekspandera ze stałą wydajnością i stałym ciśnieniem przed rozprężeniem. Brak jest informacji o energii koniecznej na podgrzanie gazu;
  35. str. 47 wiersz 6 od góry: "Średnia wartość przepływu gazu przez stację jest równa 1200 Nm<sup>3</sup>/h." Z rysunku można odczytać 3 zakresy pracy: 1800 Nm<sup>3</sup>/h (ok. 800 h), 1600 Nm<sup>3</sup>/h (ok. 1000 h) oraz 1200 Nm<sup>3</sup>/h (ok. 1200 h). Tymczasem na wykresie pokazano dobowe zużycie gazu odbieranego przez wirtualną stację redukcyjną. Jak wiadomo pobór gazu jest silnie powiązany z porą dnia, inny jest w nocy, w porze popołudniowej, porannej. Nie wykonano analizy szczegółowej w tym zakresie.
  36. str. 48 wiersz 2 od góry. Doktorant przypisuje „produkcję energii elektrycznej” do jednostek mocy. Konieczne wyjaśnienia w tym zakresie, np. o czasie pracy ekspandera.
  37. str. 48 wiersz 4 i 5. Wielkości 350 MWh i 750 MWh – raczej przeszacowane; brak odpowiedniego komentarza;

38. str. 48 wiersz 12 od góry: "Charakter pracy stacji redukcyjnych ich ilość oraz ich lokalizację w kraju powodują, że są to obiekty które najlepiej odpowiadają celowi tej pracy." Konieczny jest komentarz Doktoranta do tego stwierdzenia;
39. str. 50 rys. 17. Trudno odnieść się do przedstawionych wykresów, można odnieść wrażenie, że tłocznia pracuje 4000 h lub ok. 7800 h. Brak jest informacji na str. 49 o zmienności strumienia tłoczonego gazu i o zmienności strumienia wykorzystywanego do zasilania turbiny GT10. Na stronie 50 jest krótka informacja informująca o pracy turbiny w sezonie grzewczym; na str. 58 jest informacja o wykorzystaniu egzergii ze spalin turbiny przez 50% czasu pracy turbiny w roku.
40. str. 54 wiersz 1 od góry tekst "zgodnie z dostępną w okresie realizacji projektu ofertą techniczną wymiennika ciepła o tej właśnie" - niezrozumiały styl i niewłaściwe cytowanie;
41. str. 54 wiersz 12 od dołu tekst "W ramach wykonywanej pracy przemysłowej..." uwaga j.w. ;
42. str. 55 wiersz 3 od dołu. Definicja egzergii powinna być w rozdziale opisującym cel pracy (r. 1.6)
43. str. 60 wiersz 9 od dołu: "... z kolei stacji redukcyjnych w sieci dystrybucyjnej przesyłowej jest ponad 9000 sztuk, ....". Wniosek wskazujący na możliwe zastosowanie przedwczesny. Na stronie 56 i 57 Doktorant wskazywał na możliwe kłopoty lokalizacyjne. Takie same kłopoty lokalizacyjne mogą wystąpić w odniesieniu do wspomnianych stacji redukcyjnych (SRIII). Dodatkowym problemem może być kwestia strefy ochronnej wokół projektowanej instalacji, w szczególności zastosowania technologii SMR do skraplania gazu, lokalizacji zbiornika magazynowego czy też instalacji do spedycji i dystrybucji LNG.
44. na stronie 161 Doktorant opisuje zgłoszenie patentowe działające teoretycznie w zakresie temperatur  $-20^{\circ}\text{C}$ - $0^{\circ}\text{C}$ , które Doktorant uważa za nowatorskie osiągnięcie. Rozwiązania takie pod nazwa LTS (Low Temperature Separation) z wykorzystaniem ekspandera stosowane są w przemyśle gazowniczym od lat końca lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Dodatkowy problem z innowacyjnością zgłoszenia patentowego polega na braku znaczącej ilości węglowodorów  $\text{C}_{5+}$  w gazie ziemnym w sieci gazowej. Wymóg temperatury krikodentermu jest określony w rozporządzeniach jako  $0^{\circ}\text{C}$ . W rzeczywistości gaz ziemny w sieci przesyłowej ma niższą temperaturę krikodentermu (np.  $-20^{\circ}\text{C}$ ).

## 5. Wniosek końcowy

Wymieniona praca doktorska zawiera nowości, w szczególności rozdział 3 i rozdział 4 ma wartość naukową. Praca zawiera nowatorski projekt integracji stacji redukcyjnej i instalacji do skraplania gazu. Koncepcja wymaga uzupełnienia (np. nie rozwiązana jest kwestia podgrzewania gazu - przeznaczonego do dystrybucji - po redukcji na ekspanderze). Jako wartościową uznaję też analizę termodynamiczną przedstawioną w rozdz. 4. Część pracy związaną z wykorzystaniem technik optymalizacyjnych uważam za wartościową (rozdz.5), niemniej przyjęta funkcja celu nie jest odpowiednia do poszukiwania najlepszych rozwiązań w zakresie skraplania (zawiera sumę trzech wskaźników o różnym znaczeniu). Wyniki liczbowe uzyskanych sprawności egzergytycznych związane z procesem optymalizacyjnym powinny zostać przeliczone. Opis zjawisk separacji układu wieloskładnikowego dwufazowego dla warunków równowagowych jest niewłaściwy.

Praca napisana jest w sposób wymagający korekty językowej i merytorycznej. Wielokrotnie wykorzystuje się sformułowania potoczne, które nie powinny być formułowane w pracy naukowej. Praca powinna być poprawiona, także od strony edycyjnej, przed jej publikacją.

Uważam, że Doktorant wykazał się znajomością i wiedzą w zakresie zagadnień związanych ze skraplaniem gazu ziemnego. Przychyłam się do stwierdzenia, że praca doktorska (obejmująca wykonane analizy energetyczne i egzergytyczne oraz zastosowane metodyki badawcze) pomimo swojej niedoskonałości spełnia wymagania stawiane w ustawie o stopniach i tytule naukowym (Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. 2018 poz. 1669) i stawiam wniosek o dopuszczenie mgra inż. Krzysztofa Pajączka do publicznej obrony.

