

Tomasz Włodek*

WYBRANE ASPEKTY TECHNICZNE RUROCIĄGOWEGO TRANSPORTU DWUTLENKU WĘGLA

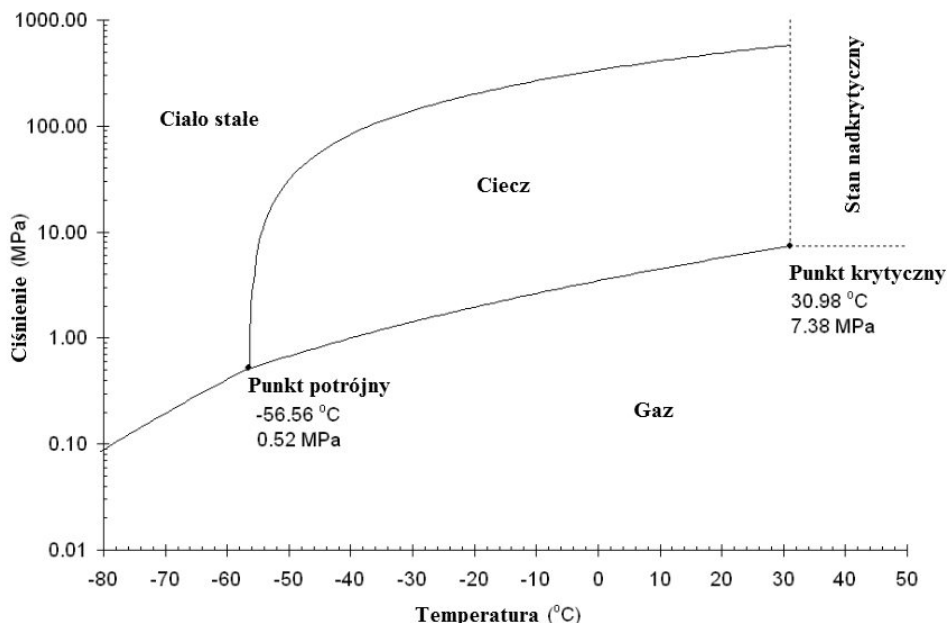
1. WSTĘP

Światowe tendencje ukierunkowane na ograniczenie antropogenicznej emisji dwutlenku węgla niosą za sobą wyzwania wprowadzenia rozwiązań technicznych mających na celu redukcję emisji CO₂, będącego jednym z tzw. gazów cieplarnianych. Jedną z możliwości osiągnięcia tego celu jest wprowadzanie technologii wychwytu oraz geologicznego składowania CO₂ (CCS). Podstawowym etapem łańcucha technologii CCS jest rurociągowy transport dwutlenku węgla, ponieważ przesył dużych ilości wychwyconego CO₂ (powyżej 2 MtCO₂/rok) na znaczne odległości jest ekonomicznie uzasadniony jedynie za pomocą rurociągów.

2. WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOCHEMICZNE CO₂

Podstawowe zagadnienia rurociągowego transportu dwutlenku węgla są ściśle powiązane z jego właściwościami fizykochemicznymi. Dwutlenek węgla to substancja, która w warunkach otoczenia jest bezwonny, bezbarwny, nietoksyczny oraz cięższym od powietrza gazem, może występować także w stanie ciekłym, stałym o budowie krystalicznej oraz w fazie nadkrytycznej (tzw. gęsta faza gazowa). Stan skupienia jest zależny od warunków ciśnienia i temperatury. Diagram fazowy CO₂ jest pokazany na rysunku 1. Dla rurociągowego transportu dwutlenku węgla największe znaczenie mają dwa obszary: fazy ciekłej w warunkach ciśnienia nadkrytycznego oraz fazy nadkrytycznej. Położenie punktu krytycznego ($T_c = 304,2$, $K = 31,05$ °C, $p_c = 7,38$ MPa przy gęstości 468 kg/m³) warunkuje przesył dwutlenku węgla w zakresie bardzo wysokich ciśnień od 8 MPa do 15 MPa.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków



Rys. 1. Diagram fazowy dwutlenku węgla [1]

3. TRANSPORT RUROCIĄGOWY CO₂

Dwutlenek węgla technicznie może być transportowany klasycznie w fazie gazowej, w fazie ciekłej oraz w stanie nadkrytycznym.

Termodynamiczny obszar występowania fazy gazowej jest bardzo ograniczony w odniesieniu do rurociągowego transportu CO₂. Pierwszym problemem, który się pojawia po przyjęciu modelu transportu CO₂ w fazie gazowej jest maksymalne ciśnienie tłoczenia w rurociągu. Może ono osiągać maksymalnie 4–4,5 MPa, a w warunkach klimatu umiarkowanego podczas półrocza chłodnego może wynosić nawet poniżej 3,5 MPa, jest to związane z położeniem krzywej skraplania. Przekroczenie wartości ciśnienia, przy którym następuje wykroplenie ciekłego CO₂ w danej temperaturze powoduje powstanie początkowo układu dwufazowego, a następnie jednolitej fazy ciekłej w rurociągu. Powstaje wtedy duże zagrożenie dla urządzeń i armatury pracujących w warunkach dla transportu fazy gazowej, dodatkowo nieoczyszczony i niedokładnie osuszony dwutlenek węgla może powodować powstawanie hydratów. Kolejnym problemem występującym przy transporcie CO₂ w fazie gazowej jest gęstość dwutlenku węgla. Gaz ten jest ponad półtora razy cięższy od powietrza oraz ponad dwa i pół razy cięższy od typowego gazu ziemnego. Gęstość medium odgrywa szczególną rolę przy wyznaczeniu długości krytycznej rurociągu, przy transporcie CO₂ w fazie gazowej pierwszym problemem jest niskie ciśnienie tłoczenia kolejnym problemem staje się duży spadek ciśnienia wzdłuż rurociągu z relatywnie niską gęstością fazy gazowej [2]. Z tych względów transport CO₂ w fazie gazowej należy odrzucić jako nieefektywny i energochłonny.

Przesył dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym (powyżej parametrów krytycznych) zwanym inaczej gęstą fazą gazową jest bardziej efektywny. Charakterystycznymi właściwościami dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym jest gęstość porównywalna do stanu ciekłego oraz lepkość i ściśliwość porównywalne do gęstości fazy gazowej. Przytoczone cechy CO₂ w stanie nadkrytycznym decydują o tym, że z termodynamicznego punktu widzenia ten sposób rurociągowego transportu CO₂ jest najlepszy. Z punktu widzenia technicznego posiada jednak pewne wady. Ze względu na wysoką temperaturę krytyczną trudno jest utrzymanie stanu nadkrytycznego na całej długości rurociągu. Spadek temperatury poniżej wartości krytycznej powoduje natychmiastowe przejście dwutlenku węgla w fazę ciekłą, a gwałtowny spadek ciśnienia – w fazę gazową. Pojawienie się układu dwufazowego gaz – stan nadkrytyczny powoduje szybki spadek gęstości transportowanego CO₂, który pociąga za sobą gwałtowny spadek ciśnienia. Utrzymanie wysokiej temperatury transportowanego dwutlenku węgla jest energochłonne i wymaga ogrzewania dwutlenku węgla do bardzo wysokich temperatur na wejściu do rurociągu z jednoczesnym zastosowaniem dobrej izolacji termicznej, tak by temperatura na całej długości rurociągu nie spadła poniżej wartości temperatury krytycznej lub zamontowania wzdłuż rurociągu kilku dodatkowych stacji ogrzewania CO₂.

Konieczność utrzymywania wysokiej temperatury w transporcie CO₂ w fazie nadkrytycznej zwłaszcza w klimatach umiarkowanych o dużej zmienności temperatury gruntu w ciągu roku lub w gruntach o dużej przewodności cieplnej powoduje, że w tych warunkach transport rurociągowy CO₂ w stanie nadkrytycznym jest z technicznego punktu widzenia mało praktyczny. Analiza wykresu fazowego dwutlenku węgla wskazuje na szeroki zakres ciśnienia i temperatury dla fazy ciekłej tego związku. Dwutlenek węgla w fazie ciekłej posiada nieznacznie większą gęstość niż w fazie nadkrytycznej, fakt ten wraz z niewielką ściśliwością ciekłego CO₂ jest dodatkową zaletą ze względu na mniejsze spadki ciśnienia wzdłuż rurociągu. Dzięki temu można transportować ciekły CO₂ na stosunkowo duże odległości przy zastosowaniu mniejszych niż w przypadku fazy gazowej lub stanu nadkrytycznego średnic rurociągu. Problematycznym parametrem dla transportu CO₂ w fazie ciekłej staje się przede wszystkim większa w stosunku do fazy gazowej i stanu nadkrytycznego lepkość. Największym zagrożeniem w przypadku transportu ciekłego CO₂, które ma zdecydowanie większe znaczenie niż w przypadku fazy nadkrytycznej (ze względu na większą różnicę w gęstości CO₂ między fazą ciekłą i gazową) jest niekontrolowany spadek ciśnienia w rurociągu oraz pojawienie się układu dwufazowego ciecz – gaz a następnie przejścia CO₂ w stan gazowy. Aby uzyskać dwutlenek węgla w fazie ciekłej należy go sprężyć a następnie schłodzić. Chłodzenie rurociągu dla ciekłego CO₂ może być konieczne również w klimatach o dużych dobowych amplitudach temperatury. Kolejnym problematycznym zagadnieniem związanym z rurociągowym transportem ciekłego CO₂ jest zapewnienie dokładnego oczyszczenia i przede wszystkim osuszenia strumienia dwutlenku węgla. Dopuszczalna zawartość zanieczyszczeń dla transportu CO₂ wynosi: dla azotu i metanu do 1,5% [3], tlenu – 400 ppm, argonu – 10 ppm, dwutlenek węgla powinien być osuszony do poziomu, w którym jego temperatura punktu rosy wyniesie –40 °C [4].

Słabe osuszenie strumienia transportowanego CO₂ może stanowić istotne zagrożenie dla rurociągu. Obecna w strumieniu woda reaguje z dwutlenkiem węgla, tworząc nietrwały kwas węglowy, który ma znaczące działanie korozyjne na ścianki rurociągu oraz zamontowaną na nim armaturę.

Pomimo wyzwań związanych z dokładnym osuszaniem transportowanego CO₂, przesył ciekłego CO₂ jest z technicznego punktu widzenia najbardziej korzystny spośród przedstawionych w artykule sposobów przesyłu ze względu na korzystne parametry dwutlenku węgla w fazie ciekłej, które umożliwiają transport CO₂ na znaczne odległości przy zastosowaniu mniejszych średnic rurociągu.

4. ZAGADNIENIA PROJEKTOWE

Podstawowe wytyczne podczas wyznaczania trasy rurociągu transportującego CO₂ skupiają się w sześciu podstawowych zagadnieniach [3]:

- uzyskanie stosunkowo niewielkiego kosztu inwestycji poprzez jak najkrótszą trasę i jak najmniejszy poziom jej skomplikowania;
- integralność i bezpieczeństwo rurociągu;
- wpływ na środowisko;
- bezpieczeństwo publiczne;
- efektywne wykorzystanie terenu.

Oprócz wspomnianych wyżej czynników takich jak przekroczenia cieków wodnych, infrastruktury liniowej, przekraczania terenów leśnych itp. przy projektowaniu rurociągu transportującego CO₂ należy wziąć pod uwagę takie czynniki jak podatność gleb na erozję szczególnie w terenach pagórkowatych i górzystych, rodzaj i nośność gleb, obecność obszarów objętych ochroną konserwatorską oraz obecność obszarów badań archeologicznych.

Wybór materiału rur, z których zostanie wybudowany projektowany rurociąg wymaga wcześniejszej analizy warunków jego przyszłej pracy, agresywności przesyłanego medium oraz warunków zewnętrznych oraz warunków montażu [5]. W przypadku rurociągów transportujących dwutlenek węgla materiał musi być wytrzymały na wysokie ciśnienia robocze pracy rurociągu (do 16 MPa) oraz na możliwość wystąpienia agresywnego środowiska wewnątrz rurociągu w przypadku niedokładnego osuszenia dwutlenku węgla.

Podstawowymi gatunkami stali stosowanymi dla rurociągów transportujących CO₂ według standardów API 5L są stale X60, X65, X70 oraz dla największych stosowanych średnic przy ciśnieniu roboczym rzędu 16 MPa X80. Według europejskiej normy PN EN 10208-2 odpowiednikami powyższych stali są stale stopowe specjalne uzyskane na drodze termomechanicznej przeróbki plastycznej L415MB (X60), L450MB (X65), L485MB (X70) oraz L555MB (X80) [6]. Stale te charakteryzują się wysoką wartością granicy plastyczności oraz wytrzymałością na rozciąganie, w ich składzie występują domieszki takich pierwiastków jak wanad, niob czy tytan [6].

Podstawowym problemem w projektowaniu każdego rodzaju rurociągu jest wyznaczenie optymalnej średnicy. Projektowany rurociąg transportujący CO₂ powinien być dostosowany do efektywnego przesyłu zakontraktowanych ilości CO₂ przy zachowaniu jak najmniejszych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, które znacząco wzrastają wraz ze średnicą rurociągu.

W celu analizy przepływu transportowanego dwutlenku węgla w rurociągu oraz wyznaczenia średnicy rurociągu należy skorzystać z równania zachowania energii Bernoulliego z uwzględnionym członem dotyczącym oporów liniowych. Równanie to ma postać [1, 7, 8]:

$$g \cdot dh + w \cdot dw + \frac{dp}{\rho} + \frac{\lambda w^2 dL}{2D} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- g – stała grawitacji [m/s²],
- w – rzeczywista prędkość przepływu [m/s],
- p – ciśnienie [Pa],
- λ – współczynnik liniowego oporu przepływu,
- D – średnica rurociągu [m],
- L – długość rurociągu [m],
- ρ – gęstość płynu [kg/m³].

Równanie (1) jest bilansem nieskończenie małych zmian energii: potencjalnej, kinetycznej, energii ciśnienia i energii strat. Zmiany energii kinetycznej można zaniedbać, ponieważ prędkość przepływu może być uznana za stałą:

$$g \cdot dh + \frac{dp}{\rho} + \frac{\lambda w^2}{2D} dL = 0 \quad (2)$$

Przy wykonaniu kilku założeń przy czym najważniejsze to stała temperatura średnia, przepływ turbulentny, transportowany dwutlenek węgla jest w fazie, dla której możemy zapisać równanie stanu:

$$\frac{p}{\rho} = zRT \quad (3)$$

Rzeczywista prędkość przepływu wyznaczana jest z zależności:

$$w = \frac{4M}{\pi D^2 \cdot \rho} \quad (4)$$

gdzie M – masowy wydatek przepływu [kg/s].

Wstawiając równania (4) i (5) do równania (2) otrzymujemy:

$$\frac{g \cdot p_{sr}^2}{z^2 R^2 T^2} dh + \frac{p dp}{zRT} + \frac{8\lambda M^2}{\pi^2 D^5} dL = 0 \quad (5)$$

Ciśnienie średnie w rurociągu obliczane jest z zależności:

$$p_{sr} = \frac{2}{3} \left(P_2 + p_1 - \frac{P_2 \cdot P_1}{P_2 + P_1} \right) \quad (6)$$

Dodatkowo należy wykonać pewne założenia jak stała temperatura w rurociągu obliczona jako temperatura średnia temperatury na wejściu i na wyjściu z rurociągu, ponadto współczynnik pseudościśliwości Z obliczany jest dla wyznaczonego ciśnienia średniego w rurociągu. Otrzymane równanie (5) należy całkować w granicach warunków początkowych i końcowych w rurociągu. Następnie należy zsumować otrzymane zmiany energii, otrzymując równanie:

$$\frac{g \cdot p_{sr}^2}{z^2 R^2 T^2} (h_2 - h_1) + \frac{1}{2zRT} (p_2^2 - p_1^2) + \frac{8\lambda M^2}{\pi^2 D^5} L = 0 \quad (7)$$

W celu otrzymania wzoru na średnicę rurociągu transportującego dwutlenek węgla należy przekształcić równanie (7), otrzymując ostatecznie zależność na średnicę rurociągu:

$$D = \sqrt[5]{\frac{16 \cdot \lambda \cdot z^2 \cdot R^2 \cdot T^2 \cdot L \cdot M^2}{\pi^2 \left[zRT (p_1^2 - p_2^2) - 2g \cdot p_{sr}^2 \cdot \Delta h \right]}} \quad (8)$$

Przykładowe obliczenia średnicy rurociągu transportującego dwutlenek węgla wykonano w zależności od masowego natężenia przepływu przesyłanego CO_2 przy następujących założeniach: ciśnieniowy zakres pracy rurociągu 8–15 MPa, długość rurociągu: $L = 200$ km, temperatura przesyłanego CO_2 : $T = 283$, $K = 10$ °C, chropowatość względna rurociągu stalowego: $\varepsilon = 0,1$, współczynnik pseudościśliwości Z wyznaczono w oparciu o równanie Redlicha-Kwonga dla średniego ciśnienia panującego w rurociągu. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1. Przy przesyłaniu ilości rzędu 8–10 MtCO_2/rok należy stosować średnice powyżej 700 mm, natomiast przy natężeniu 20 MtCO_2/rok – powyżej 1000 mm (tab. 1). Podstawowym wnioskiem wynikającym z obliczeń średnic rurociągu transportującego dwutlenek węgla jest konieczność poszukiwania odpowiednich struktur geologicznych w stosunkowo niewielkiej odległości od miejsca wychwyty w celu możliwości przesyłu dużych ilości CO_2 (powyżej 8 MtCO_2/rok), tak by transport CO_2 był ekonomicznie uzasadniony.

Tabela 1

Obliczenie średnicy rurociągu transportującego CO₂
w zależności od masowego wydatku przepływu

Masowe natężenie przepływu [MtCO ₂ /rok]	Obliczona średnica rurociągu [m]
1,0	0,321
2,0	0,423
4,0	0,559
8,0	0,737
10,0	0,806
20,0	1,064

Rurociąg transportujący dwutlenek węgla pod wysokim ciśnieniem powinien być wyposażony w odpowiednie układy technologiczne zamontowane na samym rurociągu oraz na etapie przygotowania dwutlenku węgla do transportu, tak aby rurociągowy transport CO₂ pod wysokim ciśnieniem był efektywny oraz spełniał wymogi bezpieczeństwa. Podstawowymi układami technologicznymi towarzyszącymi rurociągowemu transportowi dwutlenku węgla są:

- stacja przygotowania CO₂ do transportu,
- stacja sprężania i tłoczenia CO₂,
- układy zaporowe,
- zespoły śluz nadawczych i odbiorczych tłoków czyszczących.

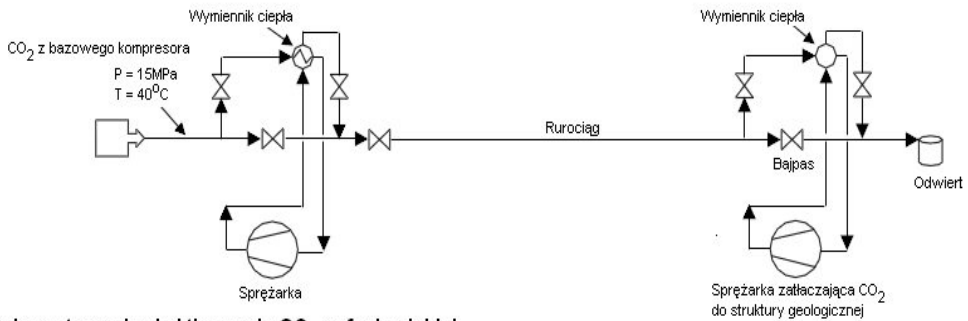
Stacja przygotowania CO₂ do transportu powinna być wyposażona w instalację do głębokiego osuszania strumienia dwutlenku węgla w celu minimalizacji powstawania korozji rurociągu w wyniku oddziaływania środowiska kwaśnego. Do osuszania dwutlenku węgla proponuje się tradycyjną kolumnową metodę absorpcyjną z zastosowaniem dwuetylenoglikolu (DEG) oraz trójetylenoglikolu (TEG) wykorzystywaną w bardzo wielu przypadkach przy osuszaniu gazu ziemnego.

Proponowane są dwa systemy sprężania tłoczenia dwutlenku węgla w rurociągu. W pierwszym systemie dąży się do tego, by ciśnienie wejściowe na rurociągu było na tyle wysokie, by mimo spadku ciśnienia wzdłuż rurociągu możliwe było zatłoczenie przesyłanego CO₂ do wytypowanej dla składowania CO₂ struktury geologicznej bez stosowania dodatkowych instalacji pomp tłoczących. Drugi system tłoczenia dwutlenku węgla charakteryzuje się tym, że wskazane jest zamontowanie dodatkowych stacji tłoczenia na rurociągu oraz na końcu rurociągu stacji zatłaczania do struktury geologicznej (rys. 2), umożliwia to stosowanie mniejszych średnic rurociągu.

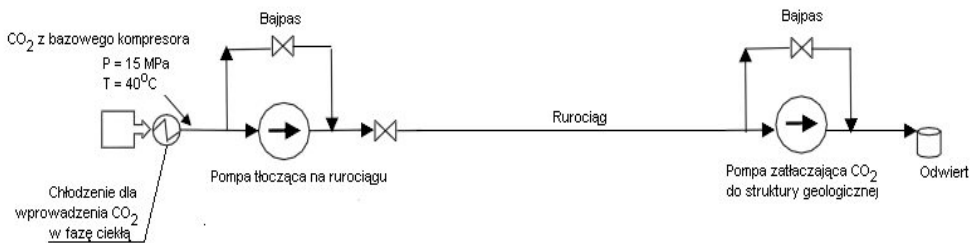
Rurociąg transportujący dwutlenek węgla powinien być podzielony na odcinki wydzielone armaturą zaporową w celu zapewnienia jego bezpiecznej eksploatacji, możliwości wykonania prac konserwacyjno-remontowych oraz odcięcia odcinka, na którym wystąpiła

awaria. Nie istnieją obecnie szczegółowe unormowania dotyczące aparatury zaporowo-upustowej dla systemów przesyłu dwutlenku węgla, dlatego uzasadnionym jest stosowanie odpowiednich przepisów i unormowań jak dla systemów przesyłowych gazów ziemnych.

Schemat sprężania i tłoczenia CO₂ w stanie nadkrytycznym



Schemat sprężania i tłoczenia CO₂ w fazie ciekłej



Rys. 2. Proponowane schematy tłoczenia CO₂ w fazie ciekłej i w stanie nadkrytycznym z wykorzystaniem dodatkowych stacji tłoczenia w celu zatłoczenia dwutlenku węgla do miejsca składowania [2]

Podczas eksploatacji rurociągu transportującego dwutlenek węgla bardzo ważnym aspektem jest kontrola stanu technicznego rurociągu. W przypadku rurociągów przesyłowych wysokiego ciśnienia najskuteczniejszą metodą kontroli stanu technicznego jest tłokowanie rurociągu za pomocą tłoków diagnostycznych. Wymagane jest również okresowe czyszczenie rurociągu z względu na hydratotwórcze właściwości dwutlenku węgla, czyszczenie jest wymagane również w przypadku pojawienia się śladowych ilości wody w rurociągu w celu minimalizacji powstawania korozji w środowisku kwaśnym. Rurociąg transportujący dwutlenek węgla powinien mieć taką konstrukcję, by możliwe było przeprowadzanie inspekcji rurociągu za pomocą tłoków czyszczących, diagnostycznych oraz inteligentnych, dlatego należy przy projektowaniu rurociągu należy unikać łuków o zbyt małych promieniach oraz dobierać armaturę zapewniającą pełny przelot, nie posiadającą większych zagłębień i kanałów [7]. Inspekcja rurociągu polega na wprowadzeniu tłoka na początku rurociągu poprzez specjalnie przygotowany odcinek rurociągu tzw. służę nadawczą tłoka [7] oraz odbiorze tłoka w instalacji służą odbiorczej na końcu rurociągu.

5. WYNIKI SYMULACJI PRZEPIYU STRUMIENIA CO₂ W RUROCIĄGU

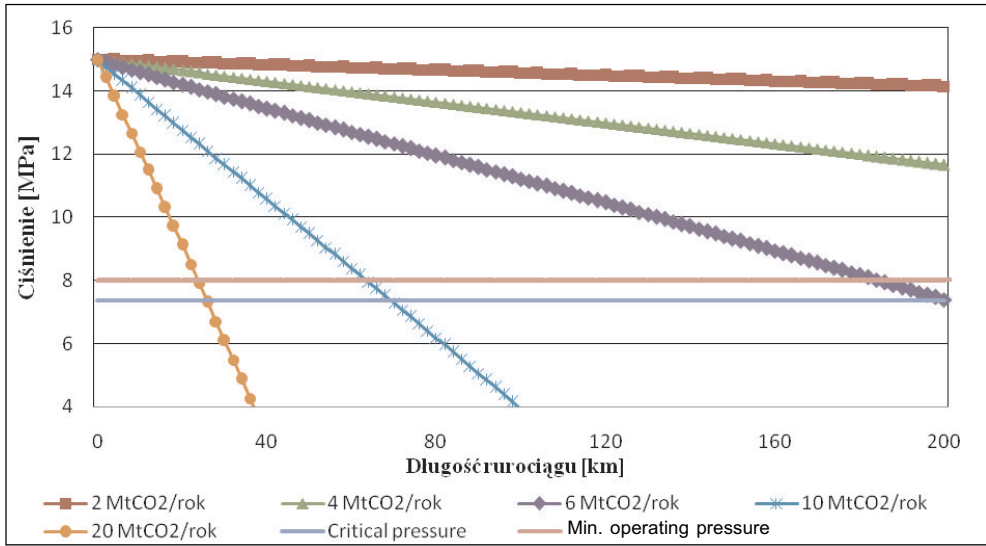
W niniejszej pracy badany będzie rozkład ciśnienia oraz temperatury wzdłuż rurociągu dla różnych danych wejściowych. Symulację przepływu przeprowadzono za pomocą programu PIPESIM 2009 firmy Schlumberger. Do symulacji wybrano kompozycyjny model obliczeniowy oparty na równaniu Soave-Redlicha-Kwonga.

Symulacje przepływu strumienia dwutlenku węgla w rurociągu została przeprowadzona dla kilku odrębnych przypadków:

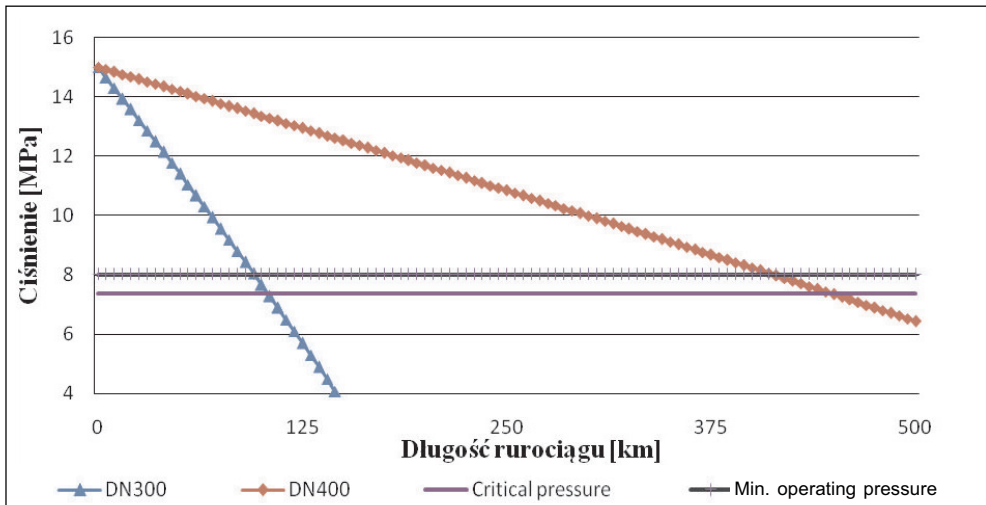
- 1) stałej średnicy rurociągu: porównanie spadków ciśnienia dla różnych wydatków masowych;
- 2) stałego wydatku masowego: porównanie spadku ciśnienia dla różnych średnic rurociągu;
- 3) zmiennego składu strumienia CO₂: porównanie przepływu układu 100% CO₂, 90% CO₂ i 10% N₂, 90% CO₂ i 10% CH₄ oraz strumienia 90% CO₂ i 10% H₂S dla założonej średnicy rurociągu i przepływu;
- 4) porównania wpływu zmian temperatury otoczenia na spadek temperatury w rurociągu dla rurociągów bez oraz z izolacją termiczną.

W pierwszym przypadku analizowano profil ciśnienia dla następujących danych: średnica rurociągu: $D = 400$ mm, temperatura tłoczonego strumienia CO₂: $T = 10$ °C, ciśnienie tłoczenia: $P_1 = 15$ MPa. Przyjęto minimalne ciśnienie pracy rurociągu na poziomie 8 MPa – w celu utrzymania warunków ciśnienia nadkrytycznego w zależności od masowego natężenia przepływu. Jako wynik porównawczy dla przeprowadzonych symulacji przyjęto odległość, w której ciśnienie osiągnie przyjęte minimalne ciśnienie pracy rurociągu. Dla wydatku 20 MtCO₂/rok uzyskano odległość jedynie 24 km, dla 10MtCO₂/rok – 64 km, rurociąg o przyjętych parametrach dla transportu powyższych ilości CO₂ może być zastosowany w przypadku lokalizacji odpowiedniej dla składowania CO₂ struktury geologicznej w stosunkowo niewielkiej odległości od miejsca wychwytu. Dla wydatku 2 MtCO₂ uzyskany wynik przekracza 1600 km, stąd zastosowanie przyjętej średnicy rurociągu nie ma uzasadnienia (rys. 3).

Wspomniany w pierwszym przypadku symulacji problem doboru średnicy w zależności od przyjętego strumienia dwutlenku węgla został przedstawiony w drugim wariancie symulacji, w którym analizie poddano profile ciśnienia w rurociągu dla dwóch przyjętych średnic DN300 oraz DN400 przy stałym wydatku masowym wynoszącym 4MtCO₂/rok. W pierwszym przypadku uzyskano odległość 97 km, w drugim 412 km (rys. 4). Wyniki uzyskane w pierwszych dwóch wariantach symulacji pokazują, że dobór odpowiednich parametrów rurociągu do transportu CO₂ przy ściśle określonych uwarunkowaniach termodynamicznych jest zagadnieniem wymagającym uwzględnienia licznych warunków technicznych i logistycznych.



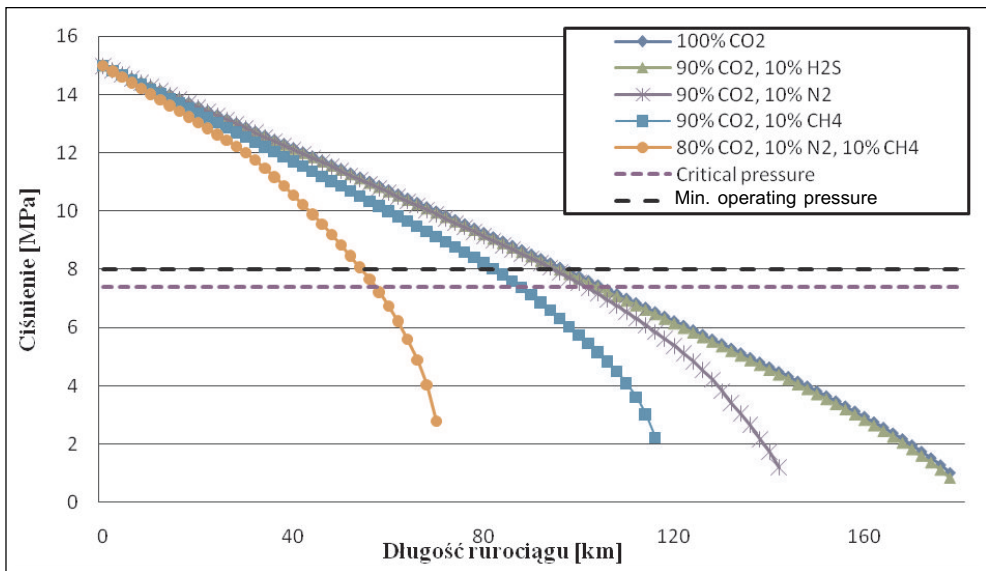
Rys. 3. Spadek ciśnienia w rurociągu transportującym dwutlenek węgla w zależności od masowego wydatku przepływu



Rys. 4. Porównanie spadków ciśnienia w rurociągu dla zadanego wydatku przepływu dla dwóch różnych średnic rurociągu

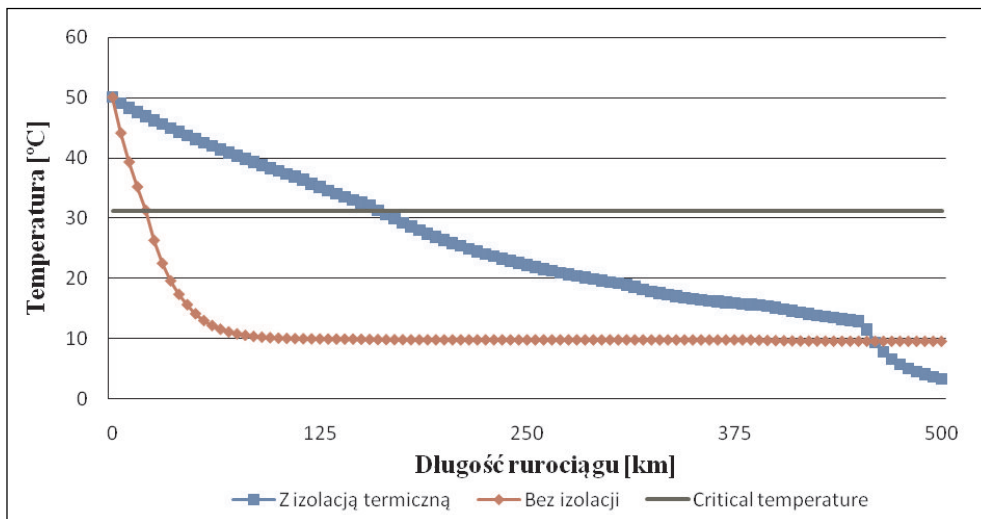
Kolejny wariant symulacji przepływu dwutlenku węgla w rurociągu obejmował problem wpływu składu przesyłanego strumienia CO₂ na warunki transportu. Standardy międzynarodowe dopuszczają maksymalny udział azotu oraz metanu w strumieniu transportowanego CO₂ na poziomie 1,5%. W celu wykazania negatywnego wpływu powyższych

składników na warunki transportu w przyjętym wariantcie zwiększono ich udział do 10% oraz sumarycznie do 20% w strumieniu przesyłanego CO₂. Dla przyjętej średnicy 300 mm oraz masowego wydatku przepływu na poziomie 4 MtCO₂/rok, uzyskano dla strumienia z 10% udziałem metanu odległość: 75 km, dla strumienia z 10% udziałem azotu: 82 km, w stosunku do strumienia czystego dwutlenku odległości te są odpowiednio o 22 km i 15 km mniejsze, co potwierdza negatywny wpływ tych składników na warunki transportu CO₂. W przypadku sumarycznego udziału 10% CH₄ i 10% N₂ odległość, w której uzyskano minimalne ciśnienie pracy wyniosła jedynie 55 km (rys. 5). Natomiast nie wykazano negatywnego wpływu 10% udziału siarkowodoru w strumieniu CO₂, dla takiej mieszaniny uzyskano odległość 96 km – jest to porównywalny wynik jak dla strumienia czystego CO₂ (97 km).



Rys. 5. Spadek ciśnienia w rurociągu w zależności od składu strumienia przesyłanego dwutlenku węgla

W ostatnim wariantcie symulacji badano przepływ CO₂ w stanie nadkrytycznym, w szczególności rozkład temperatury wzdłuż rurociągu dla dwóch przypadków: posadowienia rurociągu bez izolacji termicznej (współczynnik przenikania ciepła $U = 12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) oraz z izolacją termiczną ($U = 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Przyjęto następujące parametry: ciśnienie wejściowe 15 MPa, temperatura początkowa CO₂ 50 °C, temperatura otoczenia 10 °C, masowy wydatek przepływu 4MtCO₂/rok, średnica rurociągu 300 mm. Jako wynik porównawczy dla przeprowadzonej symulacji przyjęto odległość, w której temperatura osiągnie wartość temperatury krytycznej tj. 31,1 °C. W przypadku zastosowania izolacji termicznej przesyłany strumień CO₂ ochłodzi się do temperatury krytycznej w odległości 161 km o początku rurociągu, w przypadku braku izolacji termicznej – w odległości zaledwie 20 km (rys. 6).



Rys. 6. Zmiany temperatury przesyłanego dwutlenku węgla wzdłuż rurociągu

6. WNIOSKI

Genezą rurociągowego transportu dwutlenku węgla są międzynarodowe ustalenia dotyczące ograniczenia emisji CO₂ związane z próbami ograniczenia badanego negatywnego wpływu wzrostu udziału dwutlenku węgla w składzie ziemskiej atmosfery na globalne zmiany klimatyczne. Transport CO₂ jest etapem pośrednim technologii CCS pomiędzy wychwytem dwutlenku węgla a składowaniem w wytypowanej strukturze geologicznej. Podstawowe wnioski dotyczące projektowania rurociągów transportujących dwutlenek węgla pod wysokim ciśnieniem to:

- najkorzystniejszy z punktu widzenia termodynamiki jest transport CO₂ w stanie nadkrytycznym (lepkość i ściśliwość gazu, gęstość cieczy), biorąc pod uwagę aspekty techniczne i technologiczne najbardziej korzystny jest przesył dwutlenku węgla w fazie ciekłej w warunkach ciśnienia nadkrytycznego;
- system przesyłu dwutlenku węgla jest wrażliwy na zmiany temperatury i ciśnienia przesyłanego medium, gwałtowne spadki ciśnienia bądź zmiany temperatury mogą doprowadzić do pojawienia się niepożądanego układu dwufazowego w rurociągu;
- przesyłany dwutlenek węgla w połączeniu z wodą tworzy nietrwały kwas węglowy wpływający na szybkie powstawanie korozji, dlatego rurociągi do transportu CO₂ powinny być konstruowane ze stali specjalnych o podwyższonej odporności na korozję oraz posiadających dostateczną wytrzymałość na naprężenia występujące przy ciśnieniach do 16 MPa, proponowane stale to L415MB, L450MB, L485MB oraz w przypadkach najwyższych ciśnień L555MB (odpowiedniki wg standardu API 5L to: X60, X65, X70 oraz X80);

- d) udział metanu i azotu w strumieniu przesyłanego CO₂ wpływa negatywnie na warunki przepływu w rurociągu, udział siarkowodoru nie wykazuje wpływu na warunki przesyłu strumienia transportowanego CO₂;
- e) w celu utrzymania wysokiej temperatury transportowanego dwutlenku węgla konieczne jest zastosowanie izolacji termicznej rurociągu.

LITERATURA

- [1] McCoy S.T.: *The Economics of CO₂ Transport by Pipeline and Storage in Saline Aquifers and Oil Reservoirs*. PhD Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2008.
- [2] Zhang Z.X., Wang G.X., Massarotto P., Rudolph V.: *Optimization of Pipeline Transport for CO₂ Sequestration*. Elsevier Energy Conversion and Management, 47, 2006.
- [3] Murray A., Mohitpour M., Golshan H.: *Pipeline Design and Construction*. A practical approach. ASME PRESS 2003.
- [4] Vandeginste V., Piessens K.: *Pipeline design for a least-cost router application for CO₂ transport in the CO₂ sequestration cycle*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2, 2008, s. 571–581.
- [5] Chromik D.: *Nowoczesne technologie spawalnicze*. „Rurociągi” nr 4/54/2008.
- [6] PN-EN 10208-2:1999 „Rury stalowe przewodowe dla mediów palnych” .
- [7] Rybicki C., Łaciak M.: *Transport rurociągowy CO₂*. „Rurociągi” nr 4/54/2008.
- [8] McCoy S.T., Rubin E.S.: *An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage*. International Journal of Greenhouse Gas Control, iss. 2, 2008, p. 219–229.