

TRANSPORT RUROCIĄGOWY CO₂

CZESŁAW RYBICKI, MARIUSZ ŁACIAK

Wstęp

Dwutlenek węgla (CO₂) jest gazem, który występuje w przyrodzie w stanie naturalnym a także otrzymywany jest w procesach spalania paliw w skład których wchodzi węgiel jak też może pochodzić z innych źródeł np. wybuchy wulkanów.

Dwutlenek węgla jest jednym z dwóch gazów (oprócz CH₄) należących do grupy tzw. gazów cieplarnianych. Zatem dla utrzymania właściwego stanu atmosfery ziemskiej koniecznym jest ograniczanie emisji CO₂ jak też jego składowanie. Wiąże się z tym problem optymalnego jego przesyłu., często na znaczne odległości.

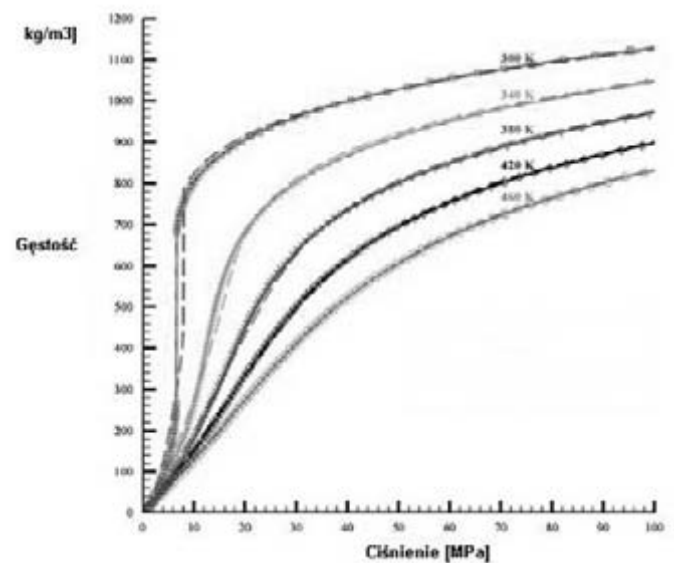
Transport rurociągowy CO₂

Specyfika transportu dwutlenku węgla jest związana z jego właściwościami fizykochemicznymi. Dwutlenek węgla może występować w trzech stanach skupienia: stałym, ciekłym i gazowym oraz w fazie nadkrytycznej. Stany te pokazano na rys.1.

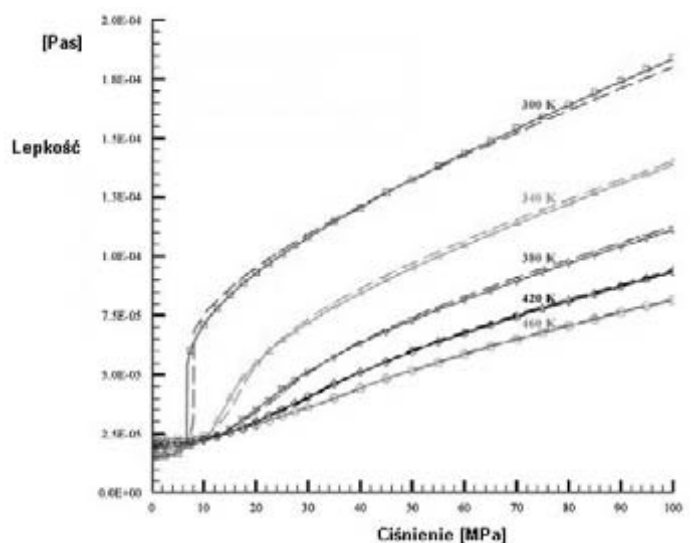
Z termodynamiki wiadomo, że dwutlenek węgla jak każdy inny czynnik posiada dwa charakterystyczne punkty tj. punkt krytyczny o parametrach: ciśnienie krytyczne wynosi 73,8 bary a temperatura krytyczna 304K oraz punkt potrójny o parametrach: ciśnienie 5.2 bar i temperatura 216.6 K. Charakterystycznym jest to, że dwutlenek węgla powyżej punktu krytycznego (stan nadkrytyczny) ma gęstość cieczy, zaś jego lepkość i ściśliwość są charakterystyczne jak dla gazu. Wynika z tego, że najlepiej jest przesyłać go w stanie nadkrytycznym. Drugim sposobem transportu jest przesyłanie dwutlenku węgla w postaci przechłodzonej cieczy (ang. subcooled liquid). W transporcie dwutlenku węgla należy zwrócić uwagę na jego czystość, bowiem na zmianę warunków przesyłu ma wpływ zawartość w strumieniu różnych zanieczyszczeń. Mają one

wpływ na zmianę m.in. gęstości i lepkości w funkcji ciśnienia i temperatury. Zmianę gęstości czystego dwutlenku węgla w funkcji ciśnienia i temperatury pokazano na rys. 2. Natomiast zmianę lepkości czystego CO₂ pokazano na rys. 3.

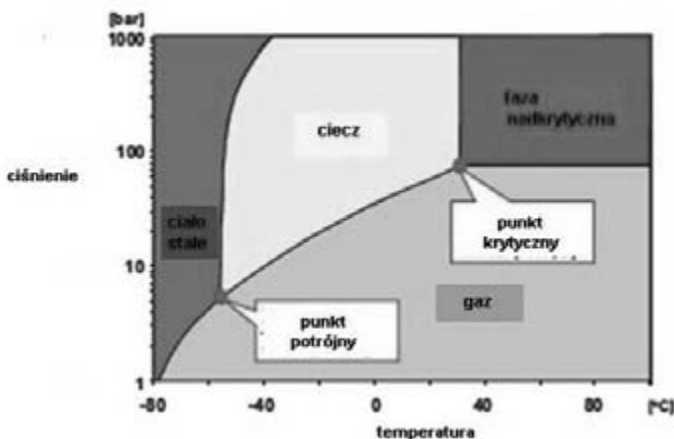
Niezmiernie istotnym problemem związanym z transportem dwutlenku węgla jest korozja rurociągów i armatury a także tworzenie się korków hydratowych często uniemożliwiających przepływ. Wynika to z faktu zawartości wody w strumieniu a dwutlenek węgla należy do gazów silnie



Rys.2. Zmiana gęstości dwutlenku węgla w funkcji ciśnienia i temperatury.[2]



Rys.3. Zmiana lepkości dwutlenku węgla w funkcji ciśnienia i temperatury.[2]



Rys. 1 Charakterystyczne obszary termodynamiczne dla dwutlenku węgla.

hydratotwórczych. Problem korozji wymusza stosowanie materiałów o odpowiedniej odporności na nią co nie jest bez wpływu na koszt całego przedsięwzięcia. Przesył dwutlenku węgla na duże odległości w postaci gazowej jest nieopłacalny ze względu na duży spadek ciśnienia z uwagi na małą gęstość. Zatem jak wspomniano wcześniej najlepszym stanem w jakim można przesyłać dwutlenek węgla jest stan nadkrytyczny, stąd konieczność jego sprężenia i schłodzenia dla otrzymania stanu ciekłego

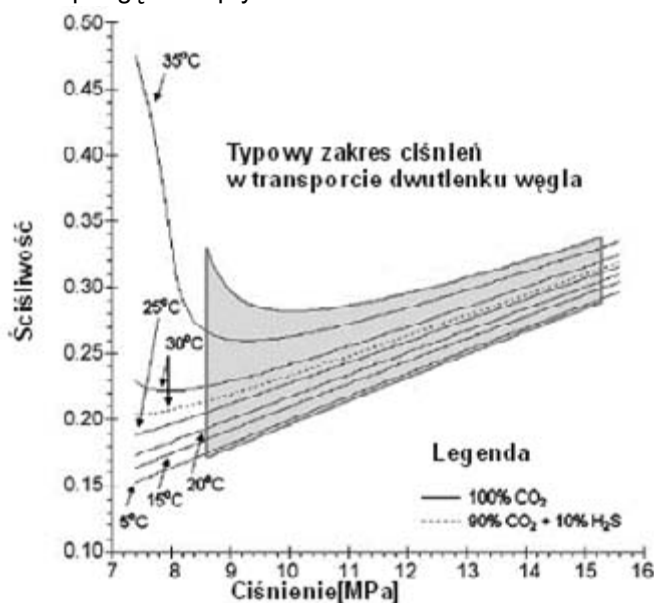
Jak wspomniano wcześniej na zachowanie się transportowanego dwutlenku węgla mają znaczny wpływ różne domieszki innych gazów takich jak siarkowodor (H₂S) czy metan (CH₄). Na rys. 4. pokazano wpływ zawartości metanu i siarkowodoru na ściśliwość transportowanego CO₂, oraz zaznaczono typowy zakres ciśnień stosowany przy transporcie dwutlenku węgla.

Z rys. 4 wynika, że widoczny wpływ siarkowodoru na ściśliwość dwutlenku węgla jest wyraźnie widoczna w zakresie niskich ciśnień. Przy ciśnieniach wysokich wpływ ten ulega zatarciu. W celu analizy przepływu dwutlenku węgla w rurociągu można skorzystać z równania zachowania energii Bernoulliego. Równanie to można zapisać w postaci [1]:

$$gdh + wdw + \frac{dp}{\rho} + \frac{\lambda w^2}{2D} dL = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- g – stała grawitacji,
- w – rzeczywista prędkość przepływu,
- p – ciśnienie,
- λ – współczynnik liniowego oporu przepływu,
- D – średnica rurociągu,
- L – długość rurociągu,
- ρ – gęstość płynu.



Rys.4. Zmiana ściśliwości czystego CO₂ oraz mieszaniny z siarkowodorem w funkcji ciśnienia [1]

Równanie (1) jest bilansem nieskończenie małych zmian energii: potencjalnej, kinetycznej, energii ciśnienia i energii strat (dysypacji energii). Z doświadczeń praktycznych wynika, że zmiany energii kinetycznej są do zaniedbania. Wynika to przede wszystkim z faktu, że prędkość przepływu może być uznana za stałą.

Zatem równanie (1) można zapisać:

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

Traktując, że przetwarzany dwutlenek węgla jest fazą dla której można napisać równanie stanu w postaci:

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

gdzie:

- z- współczynnik pseudościśliwości,
- R – indywidualna stała gazowa,
- T – temperatura.

można wyliczyć zmianę gęstości:

$$\rho = \frac{p}{zRT} \quad (4)$$

Rzeczywistą prędkość przepływu można wyliczyć z zależności:

$$w = \frac{4\dot{m}}{\pi D^2 \rho} \quad (5)$$

gdzie:

- ṁ – wydatek masowy,

Wstawiając zależności (4) i (5) do równania (2) i dokonując przekształceń otrzymamy zależność w postaci:

$$\frac{g\bar{p}^2}{z^2 R^2 T^2} dh + \frac{p dp}{zRT} + \frac{8\lambda \dot{m}^2}{\pi^2 D^5} dL = 0 \quad (6)$$

Przyjmując, że w czasie przepływu w rurociągu płyn posiada średnie parametry takie jak:

- ciśnienie średnie obliczane z zależności:

$$\bar{p} = \frac{2}{3} (p_2 + p_1 - \frac{p_2 p_1}{p_2 + p_1}) \quad (7)$$

- średni współczynnik pseudościśliwości liczony dla średniego ciśnienia

$$\bar{z} = z(\bar{p}) \quad (8)$$

oraz

- średnia temperatura liczona jako średnia arytmetyczna temperatur brzegowych.

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (9)$$

Przyjmując powyższe założenia można obliczyć skończone zmiany energii w rurociągu.

I tak:

— skończona zmiana energii potencjalnej będzie wynosić:

$$\int_1^2 \frac{g\bar{p}^2}{z^2 R^2 T^2} dh = \frac{g\bar{p}^2}{z^2 R^2 T^2} (h_2 - h_1) \quad (10)$$

-skończona zmiana energii będzie wynosić:

$$\int_1^2 \frac{p dp}{zRT} = \frac{1}{2zRT} (p_2^2 - p_1^2) \quad (11)$$

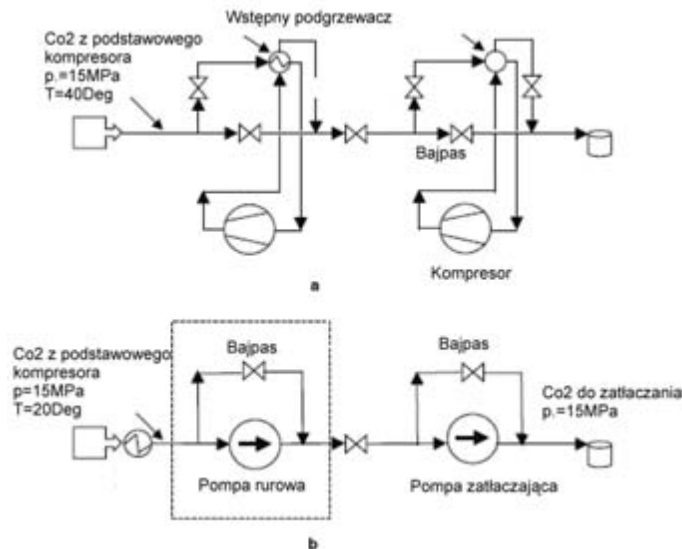
— skończona zmiana energii strat będzie wynosić:

$$\int_1^2 \frac{8\lambda \dot{m}^2}{\pi^2 D^5} dL = \frac{8\lambda \dot{m}^2}{\pi^2 D^5} L \quad (12)$$

Przyjmując, że równanie Bernoulliego obowiązuje dla nieskończonych i skończonych zmian energii, można napisać zależność:

$$\frac{g\bar{p}^2}{z^2 R^2 T^2} (h_2 - h_1) + \frac{1}{2zRT} (p_2^2 - p_1^2) + \frac{8\lambda \dot{m}^2}{\pi^2 D^5} L = 0 \quad (13)$$

Z zależności (13) można dokonywać obliczeń parametrów dotyczących przepływu. Na przykład dla zadanego wydatku przepływu, współczynnika oporu liniowego, różnicy ciśnień na wejściu i wyjściu z rurociągu, oraz różnicy położenia rurociągu Δh można obliczyć jego średnicę D z zależności:



Rys.5. Schematy transportu CO₂, a - w stanie nadkrytycznym, b - w postaci przechłodzonej cieczy.[3]

$$D = \left\{ \frac{16\lambda \dot{m}^2 L z^2 R^2 T^2}{\pi^2 [zRT(p_1^2 - p_2^2) - 2g\bar{p}\Delta h]} \right\}^{0.2} \quad (14)$$

Optymalną średnicę gazociągu do transportu CO₂ (wg Zhang et al, 2005) można obliczać również z zależności:

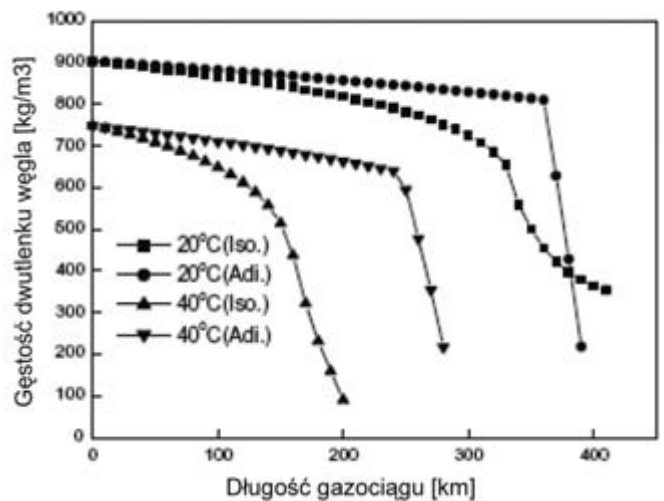
$$D_{opt} = 0.363 \cdot q_{CO_2}^{0.45} \cdot \rho_{CO_2}^{0.13} \cdot \mu_{CO_2}^{0.025} \quad (15)$$

Problemy techniczne przy transporcie CO₂

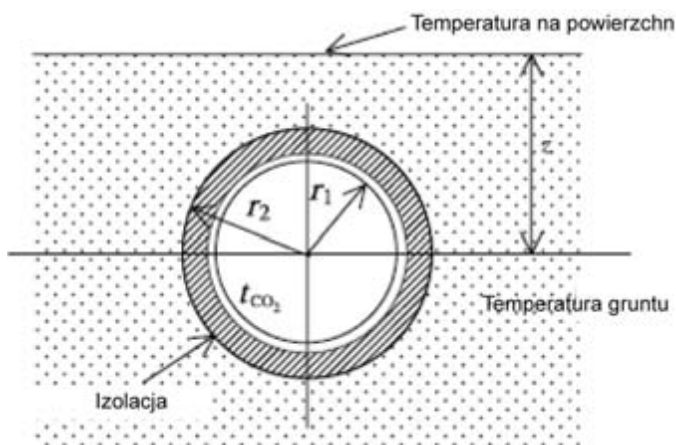
Istotnym zagadnieniem w transporcie dwutlenku węgla jest to aby był on przez cały czas przesyłu w układzie jednofazowym. Zatem albo powinien znajdować się w fazie nadkrytycznej albo w postaci przechłodzonej cieczy.

Na rys. 5 pokazane zostały schematy układów do przygotowania i przetłaczania dwutlenku węgla w obu wcześniej wymienionych postaciach.

W czasie przepływu dwutlenku węgla dochodzi do spadku ciśnienia co ma znaczny wpływ na zmianę parametrów układu. Ponieważ gęstość CO₂ jest bardzo czuła na zmiany ciśnienia i temperatury dlatego też w miarę jak spada ciśnienie zmniejsza się gęstość a tym samym wzrasta prędkość przepływu co z kolei potęguje spadek ciśnienia. Zatem dla prawidłowego transportu należy zwrócić na ten fakt uwagę. W miarę możliwości przy użyciu odpowiednich programów komputerowych powinno się przewidywać ten spadek. We wszelkich rozważaniach przyjmuje się, że parametry dwutlenku węgla na wejściu są niezmiennie. Do tych parametrów dokonuje się obliczeń pozostałych parametrów charakteryzujących przepływ. Przy transporcie dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym rurociągiem o stałe średnicy wrasta prędkość przepływu w miarę odległości powodując jak wspomniano znaczny spadek ciśnienia. W konsekwencji może dojść



Rys.6. Zmiana gęstości dwutlenku węgla w funkcji długości gazociągu. oraz warunków termodynamicznych.[3]



Rys. 7. Przekrój poprzeczny przez rurociąg do transportu dwutlenku węgla. [3]

do tzw. zaczopowania rurociągu wskutek dużej turbulencji. Aby zapobiec temu zjawisku potrzebne jest ponowne jego sprężanie. Przyjmuje się, że bezpieczna długość rurociągu do przesyłu dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym powinna być o 10% krótsza od miejsca punktu gdzie może dojść do zaczopowania rurociągu. Na rys. 6. pokazano zmianę gęstości dwutlenku węgla przy różnych temperaturach w funkcji długości rurociągu a zatem w funkcji spadku ciśnienia.

Gwałtowna zmiana gęstości dwutlenku węgla pokazana na rys.6. spowodowana jest pojawieniem się układu dwufazowego. W stanie dwufazowym wzrastają znaczne opory przepływu a tym samym co wspomniano wcześniej rośnie spadek ciśnienia. Na podstawie prowadzonych analiz dobiera się miejsce i ilość stacji ponownego sprężania dwutlenku węgla.

Na zmianę warunków przetłaczania dwutlenku węgla ma też wpływ temperatura i jej zmiany. Jest zatem istotne aby zmiany temperatury na trasie przesyłu były minimalne. Zatem rurociągi do transportu CO₂ powinny być odpowiednio izolowane. Rodzaj i stan izolacji jest zależny od temperatury otoczenia, głębokości zakopania rurociągu oraz rodzaju gruntu w którym prowadzony jest rurociąg. Na rys. 7 pokazano przekrój poprzeczny rurociągu wraz z otuliną do transportu CO₂.

Na zachowanie się w czasie transportu dwutlenku węgla mają wpływ warunki termodynamiczne panujące w rurociągu i wokół niego. Warunki te oscylują pomiędzy warunkami adiabatycznymi a warunkami izotermicznymi. Wpływ ten dotyczy głównie długości bezpiecznej rurociągu. W pracy [2,3] wykazano, że w przypadku transportu dwutlenku węgla w postaci przechłodzonej cieczy warunki termodynamiczne nie mają większego wpływu. Natomiast przy transporcie CO₂ w fazie nadkrytycznej warunki mają już wpływ. Szczególnie to dotyczy sytuacji gdy temperatura przesyłu jest rzędu 40°C. Przy temperaturze rzędu 20°C wpływ ten jest mniejszy.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych w artykule analiz na leży stwierdzić, że jest możliwy i opłacalny transport dwutlenku węgla albo w postaci fazy nadkrytycznej albo w postaci przechłodzonej cieczy. System przesyłu jest bardzo wrażliwy na zmiany temperatury, dlatego rurociągi powinny posiadać odpowiednią izolację termiczną. Istotne znaczenia w transporcie rurociągowym dwutlenku węgla ma tzw. bezpieczna długość tzn. odcinek rurociągu gdzie nie dojdzie do pojawienia się układu dwufazowego i pojawienia się zjawiska „zaczopowania przepływu”. Należy także przeciwdziałać zjawisku korozji na jakie narażony jest gazociąg a także cała armatura.

Literatura

1. McCoy S.T., Rubin E.S., An Engineering- Economic Model of Pipeline Transport of CO₂ With Application Carbon Capture and Storage, Science Direct, V.2, Issue 2, April 2008.
2. McPherson B.J.J.O.L., Han W. S., Cole B.S., Two Equations of State Assembled for Basic Analysis of Multiphase CO₂ Flow and Deep Sedimentary Basin Conditions , Science Direct, V.34, Issue 5, May 2008.
3. Zhang Z.X., Wang G.X., Massarotto P., Rudolph V Optimization of Pipeline Transport for CO₂ Sequestration. Elsevier Energy Conversion and Management 47 (2006).
4. http://www.pzr.org.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=107&Itemid=79, 2008
5. <http://www.pe24.pl/content/view/11204/>, 2008



dr inż. Czesław Rybicki (1949). Główne kierunki działalności naukowej i specjalności: inżynieria złożowa, eksploatacja złóż gazu zimnego, podziemne magazynowanie gazu; aktualne stanowisko pracy: adiunkt AGH, WWNiG, Katedra Inżynierii Gazowniczej; liczba publikacji: 90 w tym książek: 2; patentów: 2.



dr inż. Mariusz Łaciak, (1963), pracuje w AGH od 1986; główne kierunki działalności naukowej: gazownictwo, inżynieria środowiska, energetyka gazowa; aktualne stanowisko pracy: adiunkt AGH Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu; liczba publikacji: 40 w tym książki 9, rzeczoznawca SITPNiG NOT.