

*Effects of stream impurities on CO₂ pipeline transportation***Wpływ zanieczyszczeń na rurociągowy transport ditlenku węgla**

DOI: 10.15199/62.2025.9.6

The hydraulic characteristics of CO₂ flow in the pipeline were presented for 5 stream compns., taking into account permissible impurities levels in accordance with standards. Two variants of CO₂ transport in the liq. phase at pressures of 10 and 15 MPa and CO₂ transport in a supercritical state at the starting point of the pipeline were adopted. Impurities such as nitrogen (N₂), hydrogen (H₂), and methane (CH₄) significantly affected thermodynamic properties and phase behavior of CO₂ stream. For obsd. contg. permissible amts. of N₂ and H₂, a two-phase system was observed for an inlet pressure of 10 MPa, while the permissible CH₄ content had no significant effect on pipeline transport conditions.

Keywords: carbon dioxide, CO₂ transport, pipeline transportation, impurities

Przesył rurociągowy pozostaje najskuteczniejszą metodą transportu CO₂ na dużą skalę, ale jego wydajność w dużym stopniu zależy od składu strumienia CO₂. Zanieczyszczenia, takie jak azot (N₂), wodór (H₂) i metan (CH₄) znacząco wpływają na właściwości termodynamiczne i zachowanie fazowe strumienia CO₂. W przypadku strumieni zawierających dopuszczalne ilości N₂ i H₂ zaobserwowano układ dwufazowy przy ciśnieniu wlotowym 10 MPa, podczas gdy dopuszczalna zawartość CH₄ nie wpływa znacząco na warunki transportu rurociągowego.

Słowa kluczowe: ditlenek węgla, transport CO₂, transport rurociągowy, zanieczyszczenia

Globalne ocieplenie jest określane jako poważne wyzwanie klimatyczne spowodowane rosnącą emisją gazów cieplarnianych (GHG) do atmosfery. Antropogeniczna emisja ditlenku węgla (CO₂) ze spalania paliw kopalnych jest uważana za główną przyczynę globalnego ocieplenia¹⁻³). Technologia wychwytu, składowania oraz wykorzystania procesowego ditlenku węgla CCUS (*carbon capture utilization and storage*) może stać się elementem efektywnej strategii dla ograniczenia emisji CO₂ i spowolnienia procesów zmiany klimatu^{4, 5}). Istotnym elementem powodzenia implementacji technologii CCUS jest efektywny transport wychwyconego CO₂ od emitora do wyznaczonych lokalizacji składowania lub zakładów, gdzie ditlenek węgla mógłby być przemysłowo wykorzystany. Transport rurociągowy jest uznany za najbardziej efektywny do przesyłu dużych

ilości CO₂ na duże odległości^{6, 7}). Technologia transportu CO₂ rurociągami jest rozwijana od lat 70. XX w., a transportowany ditlenek węgla jest wykorzystany głównie do zwiększenia współczynnika wydobywania ropy naftowej (metoda EOR, *enhanced oil recovery*)⁸). Łączna długość rurociągów CO₂ na świecie przekracza 10 000 km, z czego większość znajduje się w Stanach Zjednoczonych. Według Międzynarodowej Agencji Energii (IEA) w samej Ameryce Północnej długość sieci rurociągowej do transportu ditlenku węgla wzrosła z 8 do 43 tys. km, a globalnie do 2050 r. nawet do 200 tys. km⁸). Jednak oprócz metod EOR głównym celem projektów CCUS będzie ograniczenie emisji CO₂ poprzez jego sekwestrację geologiczną⁹).

Wychwycony CO₂ nie jest czysty w 100% i zawiera różne zanieczyszczenia, takie jak: azot (N₂), wodór (H₂), tlen (O₂), metan (CH₄), argon (Ar), siarkowodór (H₂S), ditlenek siarki (SO₂), para wodna (H₂O), tlenek węgla (CO), amoniak (NH₃) oraz śladowe ilości amin¹⁰). Zanieczyszczenia, ich rodzaj i udział w strumieniu wychwyconego CO₂ zależą od zastosowanej metody jego wychwytu (*post-combustion*, *pre-combustion* i *oxy-fuel combustion*)^{11, 12}). W tabeli 1 zawarte są typowe zakresy stężeń zanieczyszczeń występujących w strumieniu CO₂ w procesach CCUS^{9, 13}). Te zanieczyszczenia mogą znacząco wpływać na parametry strumienia CO₂ istotne dla rurociągowego transportu, takie jak gęstość, lepkość i przewodność termiczna, wpływając w konsekwencji na charakterystykę termo-hydrauliczną transportu rurociągowego¹⁴). Ponadto zanieczyszcze-



Dr inż. Tomasz WŁODEK (ORCID: 0000-0002-3129-9565) w roku 2010 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie, gdzie w 2018 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Katedrze Inżynierii Gazowniczej na tym samym wydziale. Specjalność – transport paliw gazowych, w tym gazowych paliw odnawialnych, transport rurociągowy ditlenku węgla oraz technologia skroplonego gazu ziemnego (LNG).

* Adres do korespondencji:

Katedra Inżynierii Gazowniczej, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: twlodek@agh.edu.pl

Table 1. Examples of carbon dioxide streams obtained from various capture processes¹³⁾

Tabela 1. Przykładowe strumienie CO₂ uzyskane w różnych procesach wychwytu¹³⁾

Składnik	Elektrownia węglowa; absorpcja aminowa; wychwyty po spalaniu	Elektrownia węglowa; absorpcja amoniakowa; wychwyty po spalaniu	Elektrownia węglowa; Selexol; wychwyty przed spalaniem	Elektrownia węglowa; spalanie tlenowo-paliwowe	Elektrownia gazowa; absorpcja aminowa	Przetwarzanie gazu syntezowego; Rectisol
CO ₂ , %	99,8	99,8	98,2	95,3	95,0	96,7
N ₂ , ppm _v	2000	2000	6000	2,5%	-	30
O ₂ , ppm _v	200	200	1	1,6%	-	5
Ar, ppm _v	100	100	500	6000	-	-
NO _x , ppm _v	50	50	-	100	-	-
SO _x , ppm _v	10	10	-	100	-	-
CO, ppm _v	10	10	400	50	-	1000
H ₂ S, ppm _v	-	-	100	-	200	9000
H ₂ , ppm _v	-	-	1%	-	-	500
CH ₄ , ppm _v	-	-	1000	-	4,0%	7000
C ₂₊ , ppm _v	-	-	-	-	5000	1,5%
NH ₃ , ppm _v	1	100	-	-	-	-
Aminy, ppm _v	1	-	-	-	-	-

nia wpływają na zachowanie fazowe układu i zmieniają położenie punktu krytycznego, jak i krzywych wrzenia i parowania, co jest szczególnie istotne w rurociągowym transporcie CO₂^{15, 16)}, gdzie wymagane jest utrzymanie stałych warunków transportu. Dodatkowo obecność wody w środowisku kwaśnym jest katalizatorem rozwoju korozji, co negatywnie wpływa na stan techniczny rurociągu¹⁷⁾. Zagadnienia jakości strumienia ditlenku węgla są również istotne w sytuacjach potencjalnych awarii lub uwolnienia CO₂ z systemu transportowego do atmosfery^{18, 19)}, jak również w przypadku wykorzystania CO₂ jako medium w różnych procesach technologicznych²⁰⁾.

Dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń w strumieniu CO₂

Kluczowym zagadnieniem dla rurociągowego transportu ditlenku węgla jest skład przesyłanego medium. Głównymi dokumentami określającymi maksymalne zawartości poszczególnych składników w strumieniu CO₂ są międzynarodowe dokumenty standaryzacyjne, takie jak normy^{21, 22)}, a także dokumenty^{13, 23)}. Na podstawie tych dokumentów można przedstawić zestawienie zalecanych zawartości poszczególnych składników dla transportowanego ditlenku węgla (tabela 2). W normalizacji krajowej w 2025 r. zostały ustanowione Wytyczne Techniczne Izby Gospodarczej Gazownictwa dla rurociągowego transportu ditlenku węgla²⁴⁾.

Table 2. Recommended contents of individual components in the carbon dioxide stream^{21–24)}

Tabela 2. Zalecane zawartości poszczególnych składników w strumieniu ditlenku węgla^{21–24)}

Składnik	Wartość dopuszczalna
Ditlenek węgla (CO ₂), % mol	> 95
Woda (H ₂ O), ppm	< 50–200*
Wodór (H ₂), % mol	< 0,75
Azot (N ₂)	< 2,0
Metan i inne gazy niekondensujące** w strumieniu CO ₂ , % mol	< 4
Tlenek węgla (CO), ppm	< 2000
Tlen (O ₂), ppm	< 100
Siarkowodór (H ₂ S), ppm	< 50
Ditlenek siarki (SO ₂), ppm	< 50
Ditlenek azotu (NO ₂), ppm	< 100
Aminy, ppm	< 100
Cząstki stałe ≤ 10 μm, mg/m ³	≤ 1,0

* docelowa zawartość wody w różnych dostępnych źródłach

** m.in. H₂, N₂, Ar i inne węglowodory

W rzeczywistości przykładowe strumienie CO₂ zawierają zazwyczaj różne zanieczyszczenia, natomiast w artykule skupiono się głównie na wytypowanych składach strumienia CO₂. Takie podejście pozwala na szczegółowe zbadanie wpływu poszczególnych zanieczyszczeń, co stanowi podstawę do zrozumienia efektów występujących w przypadku mieszanin wieloskładnikowych, dostarczając cennych wskazań dla projektowania i eksploatacji sieci rurociągów jako elementu łańcucha technologii CCUS.

Rurociągowy transport ditlenku węgla

Aspekty technologiczne transportu rurociągowego ditlenku węgla są ściśle związane z jego właściwościami fizykochemicznymi, a te z kolei są pochodną składu strumienia przesyłanego CO₂. W warunkach otoczenia CO₂ jest gazem bezwonny, bezbarwny, nietoksyczny i cięższym od powietrza, jednak przy wyższych ciśnieniach w temperaturze otoczenia ditlenek węgla może występować w różnych stanach skupienia, ciekłym lub w fazie nadkrytycznej, zwanej również gęstą fazą gazową. W kontekście transportu rurociągowego szczególne znaczenie mają dwa obszary: faza ciekła w warunkach ciśnienia nadkrytycznego oraz faza nadkrytyczna. W praktyce oznacza to, że transport ditlenku węgla rurociągami odbywa się zwykle przy wysokich ciśnieniach, mieszczących się w przedziale 8–15 MPa. Stan, w którym znajduje się ditlenek węgla zależy od panujących warunków ciśnienia i temperatury, jednak dokładne położenie krzywych wrzenia i parowania oraz punktu krytycznego (dla czystego CO₂ $P_c = 7,38$ MPa, $T_c = 304$ K) jest ściśle zależne od składu strumienia CO₂, co wyraźnie ilustruje diagram fazowy przedstawiony na rys. 1. Przy projektowaniu systemu rurociągów konieczne jest określenie ich reżimu pracy. Technicznie

możliwe jest przesyłanie CO₂ rurociągami w trzech stanach: gazowym (przy ciśnieniu niższym od krytycznego), ciekłym oraz nadkrytycznym, jednak zmiany stanu skupienia podczas przesyłu są niepożądane. W konsekwencji obecność innych składników w strumieniu ditlenku węgla może prowadzić do powstania układu dwufazowego, który z czasem przechodzi w jednolitą fazę ciekłą lub gazową. Stanowi to poważne zagrożenie dla urządzeń i armatury zaprojektowanych do pracy w danej fazie. Określenie dokładnego zachowania fazowego mieszaniny w zależności od składu strumienia CO₂ jest tutaj zagadnieniem kluczowym. Spośród zanieczyszczeń mających wpływ na parametry fizykochemiczne strumienia CO₂ kluczowe znaczenie mają przede wszystkim azot i wodór, ich zwiększona zawartość powoduje rozszerzenie zakresu ciśnień i temperatur, w których pojawić się może niekorzystny dla transportu rurociągowego układ dwufazowy w warunkach poniżej ciśnienia krytycznego. Dodatkowo jeśli ditlenek węgla nie jest odpowiednio oczyszczony i osuszony, może dochodzić do tworzenia się hydratów, co jeszcze bardziej komplikuje proces przesyłu. Zawartość innych składników (wyłączając wpływ wody na korozję w środowisku strumienia CO₂) nie ma zasadniczego wpływu na rurociągowy transport jedynie w przypadku fazy gazowej, jednak należy podkreślić, że ze względu na właściwości fizykochemiczne ditlenku węgla ten sposób transportu w zakresie ciśnień 2–4 MPa możliwy jest dla niewielkich wolumenów i przy niewielkiej odległości transportu.

Podsumowując, ze względu na opisane ograniczenia najbardziej efektywnymi metodami transportu rurociągowego CO₂ są przesył rurociągowy w fazie ciekłej lub w stanie nadkrytycznym, które umożliwiają utrzymanie wysokich ciśnień i minimalizują straty energetyczne.

Celem pracy była ocena wpływu zanieczyszczeń na transport rurociągowy CO₂. Wcześniejsze badania koncentrowały się na oddziaływaniu zanieczyszczeń na właściwości termofizyczne mieszanin CO₂, jednak implikacje tych efektów w kontekście transportu rurociągowego pozostają niejasne.

Część badawcza

Metodyka badań

Podstawowym celem przeprowadzonego badania było wykazanie i określenie wpływu zanieczyszczeń obecnych w strumieniu CO₂ na charakterystykę hydrauliczną przepływu w przykładowym rurociągu o zadanych

Table 3. Carbon dioxide stream compositions accepted for analysis

Tabela 3. Przyjęte do analizy składy strumienia ditlenku węgla

Składnik/Parametr	I	II	III	IV	V
Ditlenek węgla (CO ₂), % mol	100	98	98	99,25	97,25
Wodór (H ₂), % mol	-	-	-	0,75	0,75
Azot (N ₂), % mol	-	-	2	-	2
Metan (CH ₄), % mol	-	2	-	-	-
Ciśnienie krytyczne, MPa	7,38	7,56	7,71	7,69	7,97
Temperatura krytyczna, °C	31,0	29,7	29,8	31,4	29,9

parametrach. Do analizy wytypowano przykładowy rurociąg o średnicy DN200 i maksymalnym ciśnieniu roboczym (MOP) 15 MPa, o zróżnicowanym profilu pionowym, który zawiera zarówno wzniesienia, jak i obniżenia terenu. Ze względu na gęstość CO₂ zmiany rzędnej terenu znacząco wpływają na ciśnienie panujące w rurociągu. Długość rurociągu określono na 100 km. Do analizy wytypowano 5 składów strumienia CO₂ uwzględniających dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń zadane w przytoczonych normach i standardach. Określone składy strumienia CO₂ przedstawiono w tabeli 3.

Mieszaniny dwu- i wieloskładnikowe w pewnych warunkach ciśnienia i temperatury tworzą układ dwufazowy, który, jak już wspomniano, negatywnie wpływa na hydraulikę przepływu. Kluczowym zagadnieniem jest określenie, jak będzie zachowywał się CO₂ zawierający różne zanieczyszczenia (w granicach dopuszczalnych poziomów) w przyjętych warunkach rurociągowego transportu. W tym celu przeprowadzono obliczenia równowagowe dla zadanych pięciu składów strumienia CO₂, a wyniki w postaci krzywych fazowych przedstawiono na rys. 1.

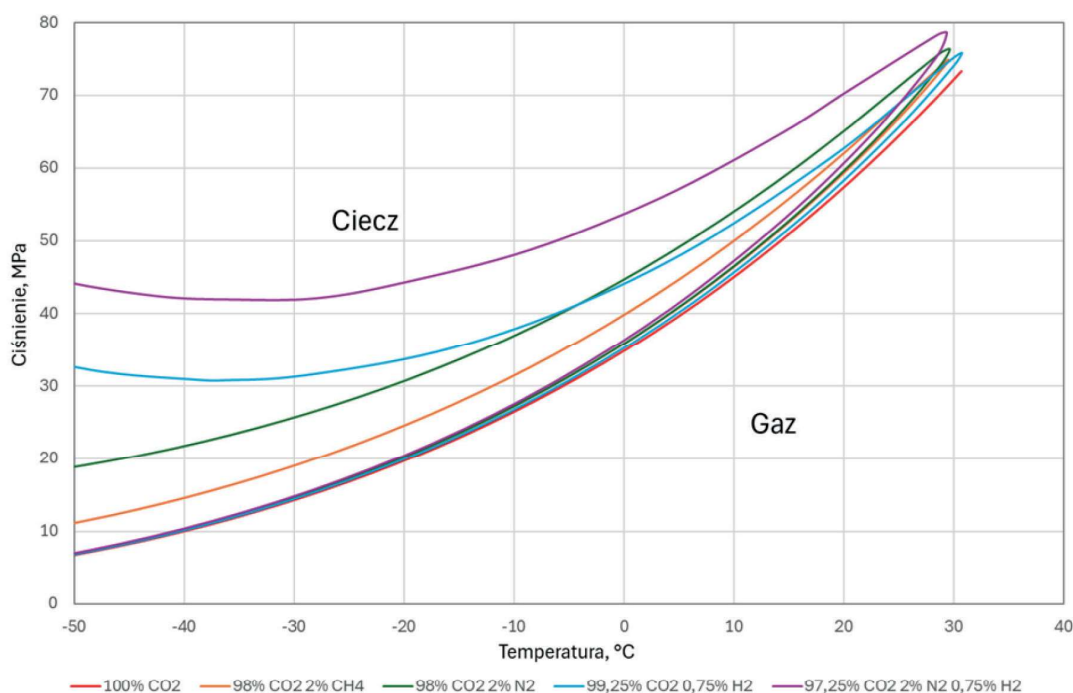


Fig. 1. Phase diagrams for given CO₂ stream compositions

Rys. 1. Krzywe fazowe dla zadanych składów strumienia CO₂

W analizie hydraulicznej założono dla przyjętego rurociągu dwa warianty przesyłu w fazie ciekłej, obejmujące dwa różne ciśnienia wejściowe: 15 MPa oraz 10 MPa. W przypadku fazy ciekłej założono stałą temperaturę strumienia CO₂ na poziomie 15°C. Przyjęto również dwa warianty przesyłu CO₂ będącego w stanie nadkrytycznym w punkcie początkowym rurociągu, gdzie założono ciśnienie wejściowe na poziomie 15 MPa i 10 MPa w temperaturze w rurociągu na poziomie 50°C.

We wszystkich analizowanych wariantach rozpatrywano masowy przepływ CO₂ na poziomie 1 Tg/r, czyli ok. 31,7 kg/s. Obliczenia przeprowadzono za pomocą oprogramowania specjalistycznego PIPESIM firmy SLB, które służy do modelowania przepływu płynów w systemach wydobywczych ropy i gazu na podstawie założonego modelu kompozycyjnego i umożliwia symulację przepływu wielofazowego w rurociągach.

Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń równowagowych stwierdzono, że najszersze zakresy warunków ciśnienia i temperatury dla pojawienia się układu dwufazowego występowały dla składów IV i V, czyli zawierających wodór. Najwęższy zakres warunków ciśnienia i temperatury dla układu dwufazowego występował dla składu II, czyli mieszaniny CO₂ i CH₄. Należy zauważyć, że dla czystej substancji, w analizowanym przypadku dla składu I, zmiana fazy w warunkach w pobliżu krzywej nasycenia może przebiegać płynnie z pojawieniem się przejściowo układu dwufazowego. W rurociągowym transporcie CO₂ kluczowe jest utrzymywanie stałej fazy strumienia. Z uwagi na efektywność przesyłu w rurociągowym transporcie CO₂ kluczowe są przede wszystkim faza ciekła i stan nadkrytyczny (faza gazowa powyżej parametrów krytycznych).

Wyniki wykonanych analiz dla przesyłu CO₂ w fazie ciekłej wykazały, że dla ciśnienia wejściowego 15 MPa strumień CO₂ o zadanych składach na całej długości rurociągu pozostają w fazie ciekłej, a spadki ciśnienia są dla wszystkich składów podobne (ciśnienie na końcu rurociągu wyniosło ok. 11 MPa) (rys. 2).

Sytuacja zmieniała się w przypadku ciśnienia wejściowego do rurociągu na poziomie 10 MPa. Dla składów III, IV oraz V pojawił się w rurociągu układ dwufazowy. Dla

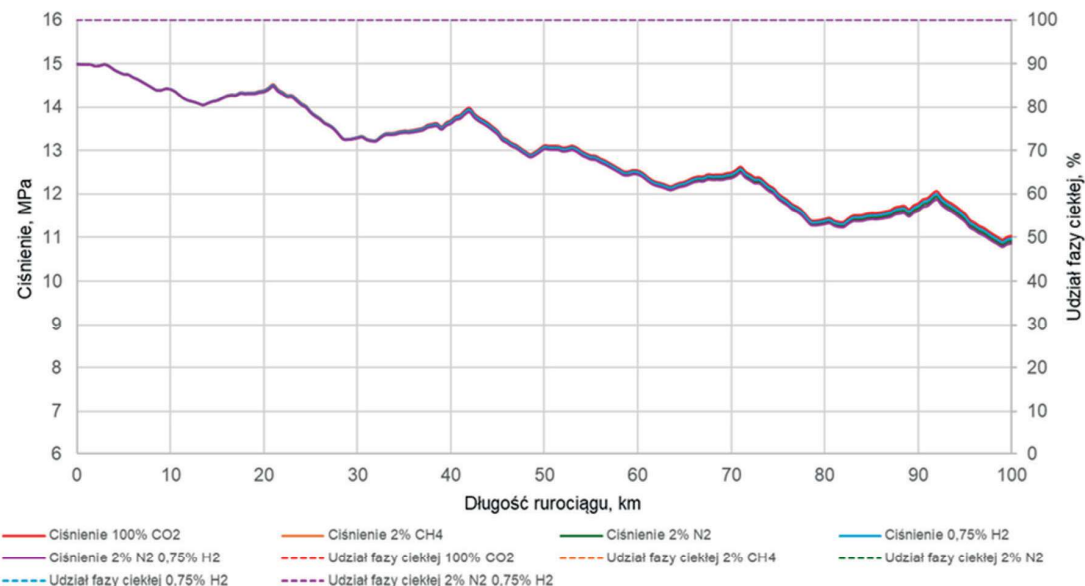


Fig. 2. Pressure profiles for the liquid phase transmission variant; inlet pressure 15 MPa

Rys. 2. Profil spadku ciśnienia dla wariantu przesyłu w fazie ciekłej; ciśnienie początkowe w rurociągu 15 MPa

czystego CO₂ (skład I) i dla CO₂ z domieszką metanu (skład II) nie stwierdzono układu dwufazowego, w tych przypadkach końcowe ciśnienia wyjściowe wyniosły dla czystego CO₂ 5,7 MPa, a dla składu II z udziałem metanu 5,6 MPa. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku pojawienia się układu dwufazowego spadek ciśnienia w funkcji długości rurociągu zwiększał się, przyspieszając jednocześnie przejście pozostałej fazy ciekłej w fazę gazową, co z kolei dalej zwiększało spadek ciśnienia. Spośród pozostałych składów najwcześniej (w odległości 61 km od początku rurociągu) układ dwufazowy pojawił się dla składu zawierającego jednocześnie azot i wodór (skład V). Dla składu V ciśnienie na końcu rurociągu spadło do 3,7 MPa, a udział fazy ciekłej do 31%. W przypadku składu III i IV ciśnienie na końcu rurociągu było podobne i wyniosło odpowiednio 4,8 i 4,9 MPa, a udział fazy ciekłej spadł do odpowiednio 50 i 56%. Wyniki dla ciśnienia wejściowego 10 MPa dla fazy ciekłej przedstawiono na rys. 3.

W przypadku wariantu, w którym strumień CO₂ przy ciśnieniu w punkcie wejściowym do rurociągu na poziomie 15 MPa był w stanie nadkrytycznym, nie zaobserwowano przejścia fazowego dla żadnego z analizowanych składów. Wynikało to z faktu, że w stanie nadkrytycznym w zadanej temp. 50°C i pod ciśnieniem 15 MPa gęstość CO₂ (ok. 700 kg/m³) była tylko relatywnie niewiele mniejsza niż gęstość ciekłego CO₂ (ok. 900 kg/m³), natomiast była niemal dwukrotnie większa niż pod ciśnieniem 10 MPa (ok. 380 kg/m³). Z powyższego wynika, że dla ciśnienia wejściowego 15 MPa spadki ciśnienia w rurociągu były tylko nieznacznie większe w stosunku do fazy ciekłej (rys. 4).

Różnice były natomiast wyraźnie widoczne dla wariantu strumienia CO₂ w stanie nadkrytycznym przy ciśnieniu wejściowym 10 MPa. Przy niższym ciśnieniu gęstość CO₂ w stanie nadkrytycznym była wyraźnie mniejsza, CO₂ w temp. 50°C, jak każda substancja w stanie nad-

krytycznym, zachowywał się jak „gęsta” faza gazowa. W takim przypadku w pierwszej fazie przesyłu, na początkowym odcinku rurociągu, strumień CO_2 znajdował się w fazie gazowej i wraz z obniżaniem się temperatury na skutek oddawania ciepła do otoczenia płynnie przechodził w fazę ciekłą. Początkowo występowała faza gazowa, stan nadkrytyczny wywoływał znacznie większe spadki ciśnienia.

Ze względu na ten fakt, pomimo schłodzenia strumienia CO_2 , dość szybko przechodził on ponownie z fazy ciekłej w fazę gazową (już poniżej ciśnienia krytycznego), powodując powstanie układu dwufazowego i pogłębiając spadki ciśnienia w rurociągu w funkcji jego długości. W przypadku czystego CO_2 (skład I) widoczne było powolne przechodzenie z fazy gazowej w ciekłą (udział fazy ciekłej osiągał 100% w odległości 14 km od początku rurociągu), a dla pozostałych składów to przejście na skutek zmiany temperatury było bardziej wyraźne (udział fazy ciekłej przyrastał dość

szybko i osiągał 100% w odległości ok. 10 km od początku rurociągu). W odległości ok. 10 km temperatura przesyłanego CO_2 spadała poniżej temperatury krytycznej, co przedstawiono dla dwóch wariantów ciśnień początkowych na rys. 5. W przypadku znacznego obniżania się ciśnienia można zauważyć wyraźne obniżanie się temperatury na skutek rozprężania ditlenku węgla, szczególnie dla wariantu o niższym ciśnieniu wejściowym.

Początkowe występowanie fazy gazowej przyczyniło się do obniżenia ciśnienia w rurociągu, przez co ponowne pojawienie się fazy gazowej i układu dwufazowego dla składu V (zawierającego jednocześnie azot i wodór) nastąpiło już w odległości 25 km, przyczyniając się do dalszego szybszego spadku ciśnienia, co w konsekwencji określiło

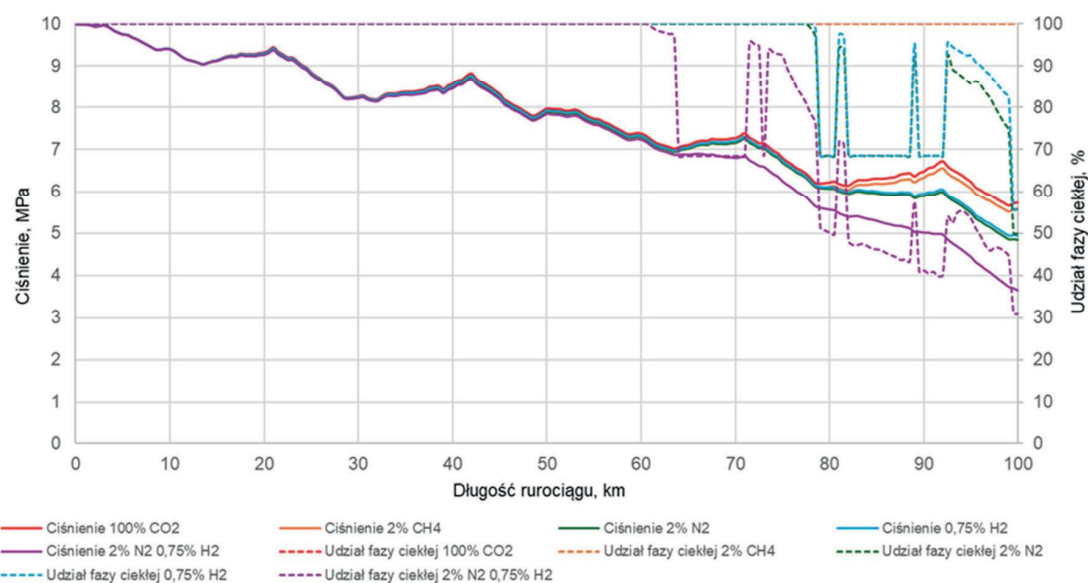


Fig. 3. Pressure profiles for the liquid phase transmission variant; inlet pressure 10 MPa

Rys. 3. Profile spadku ciśnienia dla wariantu przesyłu w fazie ciekłej; ciśnienie początkowe w rurociągu 10 MPa

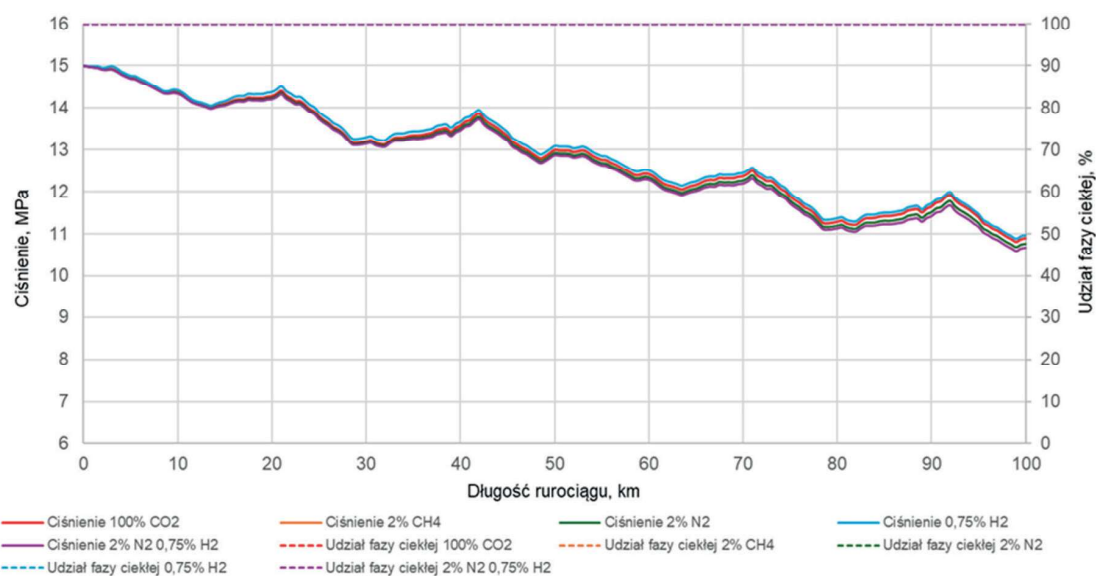


Fig. 4. Pressure profiles for the supercritical phase transmission variant; inlet pressure 15 MPa

Rys. 4. Profile spadku ciśnienia dla wariantu przesyłu w stanie nadkrytycznym; ciśnienie początkowe w rurociągu 15 MPa

maksymalną odległość przesyłu na poziomie 84 km, czyli poniżej projektowanej odległości rurociągu. Podobna sytuacja wystąpiła dla składu strumienia CO_2 zawierającego 2% azotu (skład III), gdzie maksymalna odległość przesyłu wyniosła 95 km. W pozostałych przypadkach, dla składu IV zawierającego 0,75% wodoru w strumieniu CO_2 , na wyjściu z rurociągu ciśnienie wyniosło 2,9 MPa przy udziale fazy ciekłej na poziomie 30%. Dla składu II zawierającego 2% metanu w składzie strumienia CO_2 nie zaobserwowano pojawienia się układu dwufazowego, przez co ciśnienie na wyjściu z rurociągu było dla tego składu najwyższe i wyniosło 4,7 MPa. W przypadku czystego CO_2 ciśnienie na końcu rurociągu wyniosło 3,3 MPa, przy udziale fazy ciekłej 43%. Na rys. 6 przedstawiono profile ciśnienia i udziału fazy cie-

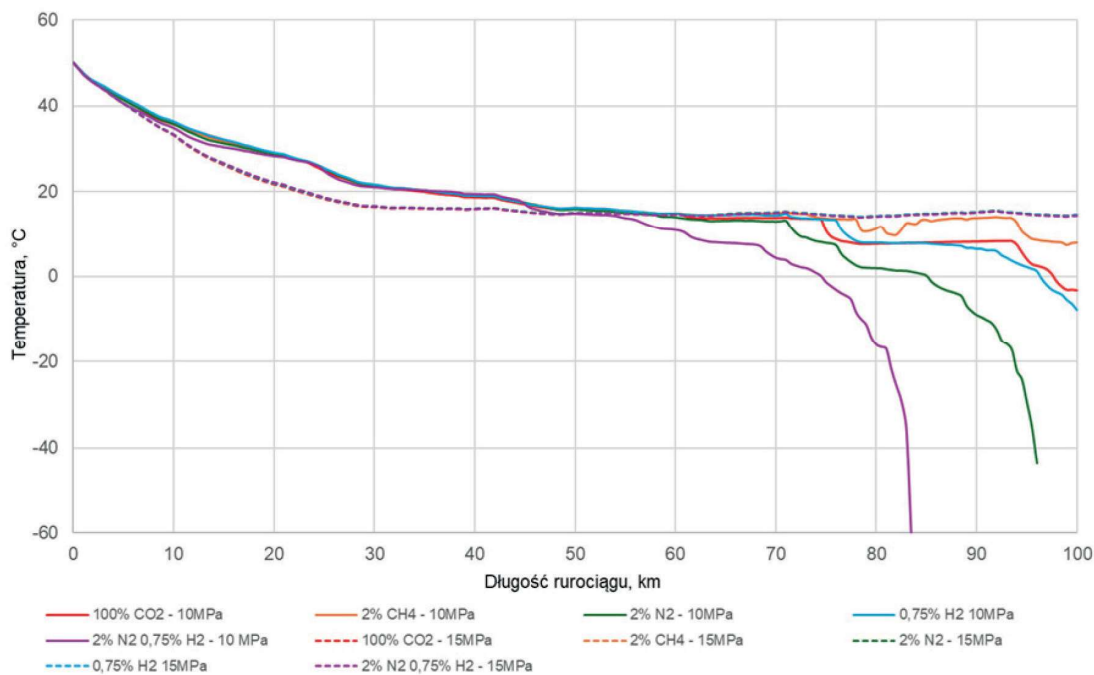


Fig. 5. Temperature profiles for the supercritical phase transmission variants

Rys. 5. Profile temperatury dla wariantów przesyłu w stanie nadkrytycznym

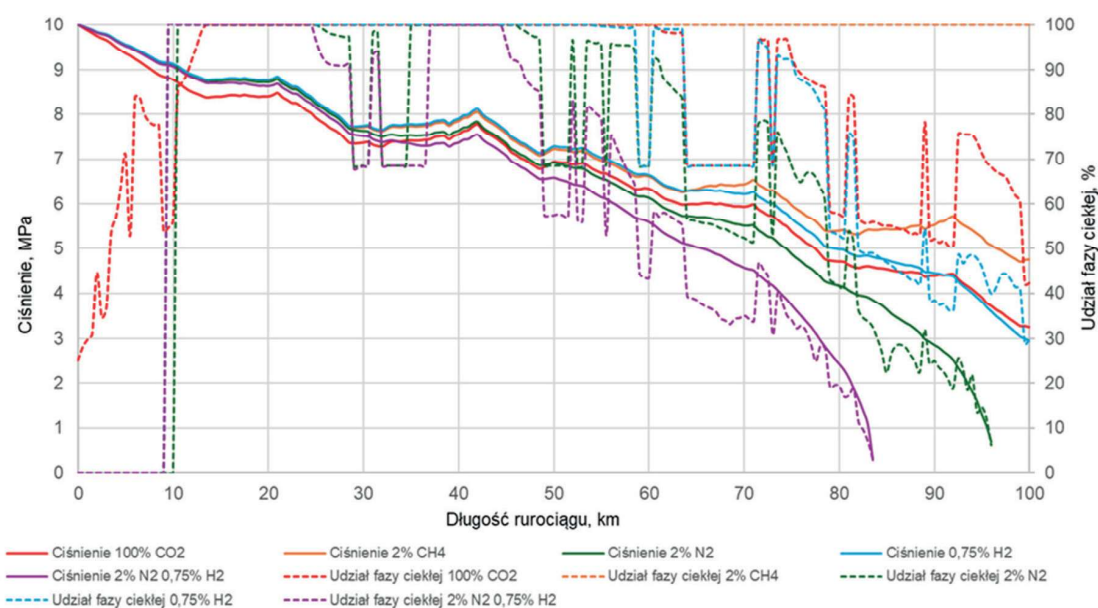


Fig. 6. Pressure profiles for the supercritical phase transmission variant; inlet pressure 10 MPa

Rys. 6. Profile spadku ciśnienia dla wariantu przesyłu w stanie nadkrytycznym; ciśnienie początkowe w rurociągu 10 MPa

klej w funkcji długości rurociągu dla przyjętych do analizy składów strumienia CO_2 .

Podsumowanie i wnioski

Globalne ocieplenie, spowodowane głównie emisją antropogenicznego CO_2 ze spalania paliw kopalnych, wymaga pilnego wdrożenia technologii ograniczających emisję gazów cieplarnianych. Kluczowym elementem strategii niskoemisyjnej jest technologia CCUS, w której efektywny transport wychwyconego CO_2 do miejsc składo-

wania lub wykorzystania przemysłowego odgrywa kluczową rolę. Transport rurociągowy, będący najbardziej efektywną metodą przesyłu dużych ilości CO_2 na duże odległości, wymaga jednak szczegółowych analiz ze względu na wpływ zanieczyszczeń na parametry transportu.

Przeprowadzone analizy wykazały, że nawet niewielkie stężenia zanieczyszczeń (w granicach dopuszczalnych normami) mogą istotnie zmieniać parametry krytyczne, zachowanie fazowe oraz charakterystykę hydrauliczną przepływu. Szczególnie niekorzystny jest wpływ udziału wodoru i azotu, które rozszerzają zakres warunków, w których może pojawić się niepożądany układ dwufazowy.

Symulacje przeprowadzone dla rurociągu o długości 100 km i średnicy DN200 wykazały, że przy ciśnieniu wejściowym 15 MPa wszystkie analizowane mieszaniny (nawet te z maksymalnymi dopuszczalnymi stężeniami zanieczyszczeń) pozostają w stabilnej fazie ciekłej na całej długości rurociągu. Jednak obniżenie ciśnienia wejściowego do 10 MPa prowadziło do pojawienia się układu dwufazowego

w rurociągu w pewnej odległości od początku rurociągu, szczególnie w przypadku mieszanin zawierających azot i wodór, co powodowało zwiększony spadek ciśnienia i zmniejszoną efektywność transportu. W przypadku przesyłu w stanie nadkrytycznym największe problemy zaobserwowano dla składów III i V, zawierających odpowiednio 2% N_2 oraz 2% N_2 i 0,75% H_2 , gdzie dla ciśnienia początkowego 10 MPa maksymalna obliczona odległość przesyłu była mniejsza niż założona długość rurociągu. Z kolei dla składu II (2% CH_4 w strumieniu CO_2) nie pojawia się układ dwufazowy w analizowanych przypadkach.

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że dla zapewnienia stabilności procesu transportu niezbędne jest zarówno utrzymanie odpowiednio wysokiego ciśnienia (powyżej 10 MPa), jak i ścisłej kontroli składu strumienia CO₂, szczególnie gdy strumień przesyłanego CO₂ zawiera wodór i/lub azot. Zaproponowane w normach maksymalne dopuszczalne stężenia tych zanieczyszczeń powinny być traktowane jako wartości graniczne, których przekroczenie może znacząco obniżyć efektywność całego systemu transportowego. Ma to kluczowe znaczenie dla projektowania przyszłych systemów rurociągowych, których rozwój jest niezbędny dla skutecznej implementacji technologii CCUS na skalę przemysłową.

Praca wykonana w ramach projektu AGH w Krakowie – Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, nr grantu 501.696.7996/L-34, D2/9025.

Otrzymano: 13-08-2025

Zrecenzowano: 23-08-2025

Zaakceptowano: 01-09-2025

Opublikowano: 18-09-2025

LITERATURA

- [1] M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson, *Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.
- [2] A. Gambhir, T. Napp, A. Hawkes, L. Höglund-Isaksson, W. Winiwarter, P. Purohit, F. Wagner, D. Bernie, J. Lowe, *Energies* 2017, **10**, 602.
- [3] F. Bai, Y. Lu, *Energy Fuels* 2024, **38**, 9958.
- [4] K.R. Simonsen, D.S. Hansen, S. Pedersen, *Carbon Capture Sci. Technol.* 2025, **16**, 100453.
- [5] H. Lu, X. Ma, K. Huang, L. Fu, M. Azimi, J. *Cleaner Prod.* 2020, **266**, 121994.
- [6] K. Zhao, C. Jia, Z. Li, X. Du, Y. Wang, J. Li, Z. Yao, J. Yao, *Fuel* 2023, **351**, No. 128913.
- [7] V. Vandeginste, K. Piessens, *Int. J. Greenh. Gas Con.* 2008, **2**, 571.
- [8] N. Hao, D. Qiong, X. Chuandong, *Environ. Impact Assess.* 2023, **45**, nr 3, 50.
- [9] S. P. Peletiri, N. Rahmanian, I. M. Mujtaba, *Energies* 2018, **11**, nr 9, 2184.
- [10] E. Luna-Ortiz, Materiały konferencji “TCCS-11 – Trondheim Conference on CO₂ Capture, Transport and Storage”, Trondheim, Norwegia, 21–23 czerwca 2021 r.
- [11] M. Vitali, F. Corvaro, B. Marchetti, A. Terenzi, *Int. J. Greenh. Gas Con.* 2022, **114**, 103605.
- [12] R.T.J. Porter, M. Fairweather, M. Pourkashanian, R.M. Woolley, *Int. J. Greenh. Gas Con.* 2015, **36**, 161.
- [13] <https://blog.sintef.com/ocean/what-else-is-there-in-co2-except-co2/>, dostęp 12 lipca 2025 r.
- [14] B. Wetenhall, H. Aghajani, H. Chalmers, S.D. Benson, M.C. Ferrari, J. Li, J. M. Race, P. Singh, J. Davison, *Energy Procedia* 2014, **63**, 2764.
- [15] Z.X. Zhang, G.X. Wang, P. Massarotto, V. Rudolph, *Energ. Conver. Manage.* 2006, **47**, 702.
- [16] J. Wang, D. Ryan, E.J. Anthony, N. Wildgust, T. Aiken, *Energy Procedia* 2011, **4**, 3071.
- [17] T. Włodek, G. Rostonek, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2024, **10**, 2.
- [18] P. Bielka, S. Kuczyński, S. Nagy, *Energies* 2023, **16**, nr 4, 1804.
- [19] P. Bielka, S. Kuczyński, T. Włodek, S. Nagy, *Energies* 2024, **17**, nr 16, 3946.
- [20] R. Kowalski, S. Kuczyński, M. Łaciak, A. Szurlej, *Energies* 2020, **13**, nr 10, 2447.
- [21] PN-ISO 27913:2024, *Wychwytywanie, transport i geologiczne składowanie dwutlenku węgla. Systemy transportu rurociągami*.
- [22] ISO 27921:2020, *Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage. Cross cutting issues. CO₂ stream composition*.
- [23] DNVGL-RP-F104:2020, *Design and operation of carbon dioxide pipeline*.
- [24] WT-IGG-4601:2025, *Zalecenia dotyczące projektowania i eksploatacji rurociągów do transportu dwutlenku węgla*, Izba Gospodarcza Gazownictwa.



Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego – Oddział Gliwice
Sekcja Ochrony Środowiska ZG SITPChem
FSNT NOT Rada Miejska w Gliwicach

23. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna

OCHRONA ŚRODOWISKA
Nauka i Przemysł dla ochrony Ziemi

22–24 października 2025 r. Ustroń – hotel JAWOR

- Przetwarzanie i zagospodarowanie odpadów
- Gospodarka wodno-ściekowa
- Ochrona powietrza
- Wodór nadzieją na rozwiązanie problemów energetycznych?
- Nowoczesna chemia szansą czy zagrożeniem dla środowiska?
- Współpraca nauki i przemysłu

Informacje i kontakt:

tel. 664 421 351, 664 421 349

www.gliwice.sitpchem.org.pl

PATRONAT MEDIALNY

**przemysł
chemiczny**

AURA
OCHRONA ŚRODOWISKA

**PRZEGŁĄD
TECHNICZNY**
GAZETA INŻYNIERSKA

**ochrona
przed korozją**

WYDAMNICTWO
SIGMA-NOT

czasopismo naukowo-techniczne science technical journal
CHEMIK
nauka • technika • rynek science • technique • market