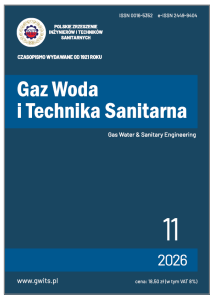
DOI: 10.65545/GWITS.2026.11.02

POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH

Gaz Woda i Technika Sanitarna
Gas Water & Sanitary Engineering



Artykuł dostępny / Open Access: www.gwits.pl

Rola precyzyjnego pomiaru i analityki w łańcuchu dostaw dwutlenku węgla

The role of precise measurement and analytics in the carbon dioxide supply chain

*Tomasz Włodek[1], Grzegorz Rosłonek[2]**

[1] *Wydział Wiertnictwa Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie*
[2] *Orlen S.A.*
* *Kontakt / Correspondence: grzegorz.roslonek@pgnig.pl*

Streszczenie:
Zaprezentowano analizę wpływu zanieczyszczeń na gęstość CO_2 w warunkach operacyjnych przesyłu rurociągowego oraz konsekwencje dla projektowania i eksploatacji systemów wychwytywania i magazynowania CO_2. Wyniki podkreślają konieczność utrzymywania stabilnych warunków termodynamicznych oraz stosowania zaawansowanych metod pomiarowych w celu zapewnienia wysokiej dokładności bilansowania masy transportowanego CO_2 w rozliczeniach emisji i niezawodności infrastruktury przesyłowej. Artykuł przedstawia również wymagania jakościowe określone w normach międzynarodowych i krajowych, metody analityczne stosowane do monitorowania składu CO_2 oraz technologie pomiaru ilościowego.
Słowa kluczowe: dwutlenek węgla, CO_2, CCUS, CCS, pomiar ilościowy, pomiar jakościowy

Abstract:
This article presents an analysis of impurity-induced density variations under operating conditions and their implications for the design and operation of carbon capture and storage infrastructure. The results highlight the necessity of maintaining stable thermodynamic conditions and employing advanced metrological systems to ensure high-accuracy mass balancing for emission accounting and reliable long-distance CO_2 transport. The study includes the quality specifications defined in international and national standards, analytical methods used for monitoring CO_2 composition, and quantitative measurement technologies, with particular emphasis on Coriolis meters as the reference solution for custody transfer.
Keywords: carbon dioxide, CO_2, CCUS, CCS, quantitative measurement, qualitative measurement

1. Wstęp

Rosnąca presja regulacyjna związana z polityką klimatyczną Unii Europejskiej oraz konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych sprawiają, że technologie wychwytu, transportu i składowania dwutlenku węgla (CCS/CCUS) stają się jednym z kluczowych elementów transformacji energetycznej. Wraz z rozwojem instalacji wychwytu CO_2 oraz planowanych sieci przesyłowych CO_2 pojawia się potrzeba precyzyjnego, powtarzalnego i odpornego na zmienne warunki procesowe monitorowania zarówno ilości, jak i jakości transportowanego medium. Dwutlenek węgla, w przeciwieństwie do gazu ziemnego, charakteryzuje się silną zależnością właściwości fizykochemicznych od niewielkich zmian temperatury, ciśnienia oraz składu przesyłanego strumienia. Dodatkowo istotne zmiany fazowe zachodzą w zakresie ciśnień typowych przesyłu rurociągowego i temperatur zbliżonych do temperatur otoczenia. Wprowadza to istotne wyzwania metrologiczne, szczególnie w obszarach warunków ciśnienia i temperatury bliskich punktowi krytycznemu oraz w obecności zanieczyszczeń strumienia CO_2, które mogą znacząco modyfikować jego równowagę fazową i gęstość.

Właściwe zaprojektowanie systemów pomiarowych w łańcuchu CCS wymaga zatem nie tylko znajomości właściwości termodynamicznych CO_2, lecz także zrozumienia wpływu zanieczyszczeń na stabilność fazową, hydraulikę przepływu oraz dokładność metod pomiarowych. Równie istotne jest spełnienie wymagań normalizacyjnych, wprowadzonych przez standard WTIGG4601:2025 [1] oraz normy ISO 27913 [2] czy DNVRPF104 [3], które definiują dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń oraz wymagania dotyczące jakości strumienia CO_2. W artykule przedstawiono kluczowe aspekty transportu rurociągowego dwutlenku węgla, wymagania jakościowe, metody analityczne oraz technologie pomiarowe stosowane w systemach CCS, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu składu chemicznego na gęstość i niepewność

Artykuł / Article: Nadesłany / Received: 19.10.2026; Zrecenzowany / Revised: 30.10.2026; Zaakceptowany / Accepted: 5.11.2026; Opublikowany / Published: 25.11.2026

Prawa autorskie: © 2026 autorów. Licencjobiorca: PZITS. Artykuł w otwartym dostępie na licencji Creative Commons CC BY 4.0. / Copyright: © 2026 by the authors. Licensee PZITS. This article is an open access under the Creative Commons CC BY 4.0 license.

pomiarową. Analiza ta stanowi podstawę do formułowania zaleceń projektowych i eksploatacyjnych dla przyszłych systemów przesyłowych CO_2.

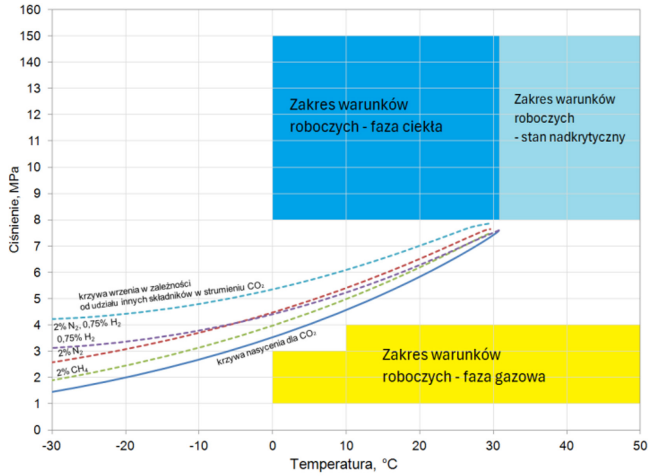
2. Podstawy rurociągowego transportu dwutlenku węgla

Technologiczne oraz operacyjne aspekty rurociągowego transportu dwutlenku węgla (CO_2) są bezpośrednio determinowane przez jego właściwości fizykochemiczne oraz termodynamiczne. W warunkach normalnych dwutlenek węgla charakteryzuje się stanem gazowym, brakiem barwy i zapachu oraz gęstością istotnie wyższą od gęstości powietrza. W zależności od parametrów procesowych układu, CO_2 może występować w fazie gazowej, ciekłej bądź w stanie nadkrytycznym. Stan nadkrytyczny, osiągany po przekroczeniu punktu krytycznego (gdzie parametry Tc i Pc wynoszą odpowiednio 31,04°C oraz 7,38MPa), charakteryzuje się gęstością zbliżoną do fazy ciekłej przy jednoczesnym zachowaniu niskiej lepkości dynamicznej typowej dla fazy gazowej [4–6].

Z punktu widzenia efektywności energetycznej transportu wielkoskalowego, kluczowe znaczenie ma optymalizacja parametrów ciśnienia i temperatury, która pozwala na prowadzenie przesyłu CO_2 w obszarze nadkrytycznym bądź w fazie ciekłej przy ciśnieniu powyżej 8 MPa. Prowadzenie transportu CO_2 w fazie gazowej poniżej parametrów krytycznych, choć możliwe, napotyka na poważne ograniczenia termodynamiczne. Maksymalne ciśnienie operacyjne w fazie gazowej jest powiązane z przebiegiem krzywej równowagi fazowej ciecz-gaz i wynosi ok. 3,5–4,0 MPa [7]. Przekroczenie tej granicy generuje ryzyko kondensacji i przejścia układu w stan dwufazowy lub ciecz co stanowi bezpośrednie zagrożenie dla armatury zaprojektowanej wyłącznie do obsługi medium ściśliwego. Dodatkowym czynnikiem ograniczającym jest wysoka gęstość gazowego CO_2, która jest ponad 2,5-krotnie większa od gęstości gazu ziemnego z grupy E. Wysoka gęstość generuje znacznie większe opory przepływu i w konsekwencji wyższe hydrauliczne spadki ciśnienia wzdłuż rurociągu, co znacząco ogranicza ekonomicznie uzasadniony dystans przesyłu w fazie gazowej do wartości nieprzekraczających 50 km przy jednocześnie niewielkiej ilości przesyłanego CO_2 [7]. Alternatywny model przesyłu w stanie nadkrytycznym charakteryzuje się wysoką efektywnością ze względu na korzystny stosunek gęstości do lepkości, jednak implementacja tego rozwiązania na całej długości rurociągu wiąże się z wyzwaniami technologicznymi. Podstawowym wyzwaniem jest konieczność ciągłego utrzymywania temperatury powyżej 31°C [7]. W warunkach zmiennych obciążeń termicznych otoczenia i gruntów, stabilizacja temperatury wymaga budowy stacji wymienników ciepła, co obniża efektywność systemu. W procesie sukcesywnego wychładzania i spadku temperatury poniżej warunków nadkrytycznych, CO_2 zwiększa swoją gęstość i przechodzi w fazę ciekłą. Aby zapewnić monotoniczny i bezpulsacyjny charakter tej transformacji fazowej oraz uniknąć uderzeń hydraulicznych, niezbędne jest utrzymywanie wysokiego ciśnienia powyżej 10 MPa. Praktyka przemysłowa wskazuje transport CO_2 w fazie ciekłej (ciśnienia robocze w przedziale od 8 do 15 MPa) jako rozwiązanie optymalne technicznie i ekonomicznie na długich dystansach [4–8]. Ciekły dwutlenek węgla cechuje się wyższą gęstością oraz minimalną ściśliwością, co istotnie ogranicza jednostkowe spadki ciśnienia i pozwala na redukcję średnicy wewnętrznej rurociągu przy zachowaniu wysokiej przepustowości. Przesył CO_2 z różnymi poziomami zanieczyszczeń w stanie ciekłym lub nadkrytycznym generuje istotne wyzwania metrologiczne. Z tego względu tradycyjne, objętościowe metody pomiarowe ustępują miejsca bezpośrednim systemom metrologicznym opartym na pomiarze masy, najmniej zależnym od lokalnych zmian parametrów termodynamicznych i fazy przesyłanego CO_2.

3. Wymagania dotyczące jakości CO_2 i normy techniczne

Wymagania dotyczące jakości strumienia dwutlenku węgla oraz powiązane z nimi normy techniczne są kluczowym aspektem w łańcuchu technologii wychwytu, transportu i składowania dwutlenku węgla (CCS). Transport CO_2 na duże odległości odbywa się efektywnie w fazie ciekłej powyżej ciśnienia krytycznego lub w fazie nadkrytycznej. W takich warunkach fizykochemicznych strumień CO_2 jest wrażliwy na obecność nawet śladowych ilości zanieczyszczeń, co może znacząco zmienić jego właściwości termodynamiczne, wpływając negatywnie na warunki procesu rurociągowego transportu lub zatłaczania.



Rys. 1. Wykres fazowy p-T dla strumienia CO_2 z różnymi poziomami zanieczyszczeń z naniesionymi typowymi zakresami warunków roboczych p i T dla przesyłu CO_2 w różnych fazach (opracowanie własne)

Fig. 1. p-T phase diagram for a CO_2 stream with varying levels of impurities, showing typical operating pressure (p) and temperature (T) ranges for CO_2 transport in different phases (own work)

Specyfikacje czystości strumienia CO_2 w transporcie rurociągowym precyzyjnie określają zalecane dopuszczalne stężenia poszczególnych zanieczyszczeń, które zależą od źródła pochodzenia wychwyconego CO_2 oraz zastosowanej technologii wychwytu. Kluczową grupę zanieczyszczeń stanowią gazy nie podlegające skropleniu w warunkach ciśnień i temperatur typowych dla łańcucha technologii CCS, do których należą przede wszystkim azot, wodór, metan oraz argon. Dodatkowo, obecność zanieczyszczeń powoduje zmiany położenia punktu krytycznego i zmiany parametrów krzywej fazowej na diagramie p-T, co bezpośrednio utrudnia precyzyjne bilansowanie masowe. Ich

obecność w strumieniu CO_2 powoduje zwykle zwiększenie ciśnienia punktu pęcherzyków, czyli graniczne ciśnienie, przy którym w rurociągu zaczyna wydzielać się faza gazowa. Zatem obecność tych składników może prowadzić do konieczności podwyższenia ciśnień roboczych w rurociągu w celu uniknięcia niebezpiecznego przepływu dwufazowego, który prowadzi do kawitacji, drgań i nieodwracalnych uszkodzeń pomp oraz kompresorów. Ponadto, gazy te zmniejszają gęstość płynu, co bezpośrednio obniża efektywność ekonomiczną transportu. Szczególne ograniczenia dotyczą wodoru, który wykazuje zdolność do dyfuzji w strukturę krystaliczną metali, wywołując zjawisko kruchości wodorowej stali węglowych, co w warunkach wysokiego ciśnienia niesie ryzyko rozszczelnienia sieci.

W kontekście kryteriów operacyjnych kluczowym i bezwzględnie najważniejszym procesem przygotowania dwutlenku węgla do transportu jest jego głębokie osuszanie. Wymóg dehydratacji wynika bezpośrednio z unikania dwóch zagrożeń: korozji kwasowej oraz powstawania hydratów. Czysty i całkowicie suchy dwutlenek węgla nie wchodzi w reakcje ze zwykłą stalą węglową, co umożliwia budowę rurociągów z powszechnie dostępnych materiałów. Jednak pojawienie się w systemie wody powoduje pojawienie się kwasu węglowego. Kwas ten, ulegając dysocjacji, obniża pH środowiska, inicjując korozję wżerową. Proces ten postępuje szybciej, jeśli w strumieniu CO_2 obecne są również tlenki siarki i azotu.

Równie poważnym problemem operacyjnym wywołanym przez obecność wody jest ryzyko powstawania hydratów gazowych. Są to krystaliczne ciała stałe przypominające strukturą zbity śnieg lub lód, które powstają, gdy cząsteczki gazu zostają uwięzione w sieciach klatkowych tworzonych przez wiązania wodorowe cząsteczek wody. W przypadku dwutlenku węgla proces ten jest szczególnie widoczny, ponieważ pod wysokim ciśnieniem hydraty mogą formować się w temperaturach znacznie przekraczających temperaturę zamarzania wody. Odkładające się na wewnętrznych ściankach rurociągu hydraty zwężają jego przekrój poprzeczny, co zwiększa opory przepływu. W skrajnych przypadkach dochodzi do całkowitego zablokowania przepływu, unieruchomienia armatury regulacyjnej i zaworów bezpieczeństwa.

Kluczowe dokumenty standaryzacyjne i normy techniczne, takie jak ISO 27913, ISO/TR 27921 [9] czy wytyczne DNV-RP-F104, definiują zalecane zakresy zawartości poszczególnych składników w strumieniu CO_2. Wymagają one, aby zawartość wody była utrzymywana na poziomie znacznie poniżej punktu rosy dla najniższej możliwej temperatury otoczenia rurociągu, co najczęściej oznacza limity rzędu kilkudziesięciu ppm. W standaryzacji krajowej, korzystając z doświadczeń zagranicznych i wsparcia interesariuszy krajowych Izba Gospodarcza Gazownictwa wprowadziła wytyczne WT-IGG-4601:2025 Zalecenia dotyczące projektowania i eksploatacji rurociągów do transportu dwutlenku węgla. Wprowadzone tam wartości graniczne zawartości poszczególnych składników strumienia CO_2 są kompromisem pomiędzy wymogami bezpieczeństwa, możliwościami analityki procesowej jak i technicznymi możliwościami uzyskania zadanych wartości. Wartości graniczne zanieczyszczeń umieszczone w WT-IGG-4601:2025 przedstawiono w tabeli 1. Rygorystyczne przestrzeganie norm czystości i kryteriów osuszania stanowi gwarancję bezpiecznej, długotrwałej i bezawaryjnej eksploatacji infrastruktury przesyłowej dwutlenku węgla.

Tabela 1. Zalecane dopuszczalne zawartości zanieczyszczeń w strumieniu dwutlenku węgla zgodnie z WT-IGG-4601:2025 [1]
Table 1. Recommended permissible impurity levels in a carbon dioxide stream in accordance with WT-IGG-4601:2025 [1]

Składnik	Jednostka	Wartość dopuszczalna
dwutlenek węgla (CO_2)	%mol	> 95
woda (H_2O)	ppmv	< 70[1)]
wodór (H_2)	%mol	< 0,75
azot (N_2)	%mol	< 2,0
metan i inne węglowodory (C^{1+})	%mol	< 4[2)]
tlenek węgla (CO)	ppmv	< 2000
tlen (O_2)	ppmv	< 100[3)]
siarkowodór (H_2S)	ppmv	< 50
dwutlenek siarki (SO_2)	ppmv	< 50
dwutlenek azotu (NO_2)	ppmv	< 100
aminy	ppmv	< 100
cząstki stałe ≤ 10mm	mg/m^3 [4)]	≤ 1,0

[1)] wartość docelowa zawartości wody
[2)] dotyczy to łącznej zawartości składników niepodlegających skropleniu w strumieniu CO_2 (m. in. H_2, N_2, Ar, CH_4 i inne węglowodory)
[3)] jako graniczna wartość możliwości analityki procesowej
[4)] m^3 odnosi się do ilości gazu zawartej w objętości 1 m^3 pod ciśnieniem bezwzględnym 1,01325 bar(a) przy temperaturze 0°C

4. Miejsca i metody pomiaru i oceny jakości dwutlenku węgla w systemach przesyłowych

Projektowanie systemów do transportu dwutlenku węgla w technologiach wychwytu, utylizacji i sekwestracji (CCUS, ang.: Carbon Capture, Utilization and Storage) wymaga precyzyjnego i kompleksowego podejścia do analityki procesowej. Monitorowanie strumienia gazu w wybranych punktach sieci do transportu CO_2 pełni dwojaką funkcję:

- zapewnia zgodność z ustalonymi i jednocześnie restrykcyjnymi normami jakościowymi, oraz
- dostarcza informacji nt. faktycznej ilości transportowanego CO_2.

Są to funkcje kontroli jakości i ilości, które implikują nadrzędne funkcje fiskalne i środowiskowe. Aby system monitoringu był efektywny, punkty pomiarowe muszą być rozmieszczone w węzłach o najwyższym ryzyku procesowym a zastosowane metody analityczne i pomiarowe muszą odpowiadać specyfice mierzonych komponentów [1, 10].

W strukturze sieci przesyłowej wyznacza się trzy kluczowe wymienione poniżej lokalizacje, w których ciągła kontrola jakości i ilości transportowanego medium jest krytyczna:

Wlot do rurociągu transportowego (weryfikacja jakości po procesie wychwytu oraz ilości). Jest to pierwszy punkt kontrolny, instalowany bezpośrednio za instalacją wychwytu i wstępnego uzdatniania gazu. Jego głównym celem jest walidacja czystości strumienia przed dopuszczeniem go do publicznej lub dedykowanej sieci magistralnej. Pomiar w tym miejscu zapobiega skażeniu dalszych odcinków rurociągu gazem niespełniającym specyfikacji (np. o zbyt wysokiej zawartości tlenu lub związków siarki). Punkt pomiaru w tym miejscu dostarcza też bardzo ważnej informacji o ilości CO_2 przekazanej do dalszego transportu

DOI: 10.65545/GWITS.2026.11.02

do operatora, która będzie jednocześnie podstawą do dalszych rozliczeń w ramach systemu ETS (Unijny System Handlu Uprawnieniami do Emisji).

Stacje sprężania. W tym punkcie należy przede wszystkim monitorować gaz pod względem jakościowym. Kompresja dwutlenku węgla w celu wprowadzenia go w stan gęsty lub nadkrytyczny wiąże się z gwałtownymi zmianami ciśnienia i temperatury. Monitorowanie gazu na wlotach i wylotach kompresorów pozwala na wczesne wykrycie ryzyka kondensacji fazy ciekłej CO_2, potencjalnych zanieczyszczeń oraz ewentualnego formowania się hydratów, które mogłyby doprowadzić do mechanicznego uszkodzenia łopatek wirników, zaworów, lub innych elementów mechanicznych infrastruktury.

Przed zatłaczaniem do składowiska. Końcowy węzeł pomiarowy, zlokalizowany bezpośrednio przed głowicą odwiertu zatłaczającego do struktur geologicznych (np. wyeksploatowanych złóż węglowodorów lub głębokich poziomów wodonośnych). Pomiar w tym punkcie pełni funkcję rozliczeniowo-fiskalną (dokładny bilans masy zdeponowanego dwutlenku węgla oraz bezpieczeństwa środowiskowego (ochrona formacji skalnej przed zanieczyszczeniami mogącymi wywołać niepożądane reakcje chemiczne).

Zróżnicowanie pod względem wymagań dotyczących czasu odpowiedzi, czułości oraz rodzaju wykrywanych substancji wymusza stosowanie hybrydowych układów analitycznych łączących trzy komplementarne technologie [11]:

Chromatografia gazowa (GC, ang.: Gas Chromatography). Wykorzystywana jako metoda referencyjna do pełnej, wieloskładnikowej analizy składu zanieczyszczeń. Pozwala na selektywne i ilościowe oznaczanie domieszek takich jak: azot, tlen, metan, wodór, lotne związki siarki, oraz wyższe węglowodory. Ze względu na dyskretny charakter pracy i czas analizy rzędu kilku lub kilkunastu minut, GC doskonale sprawdza się w cyklicznym raportowaniu jakościowym i bilansowaniu masowym.

Analizatory optyczne (NDIR, ang.: Non-Dispersive Infrared). Technologia niedyspersyjnej podczerwieni służy do ciągłego monitorowania stężenia głównego składnika (CO_2) w czasie rzeczywistym. Dzięki wysokiej stabilności, odporności na zatrucia katalityczne oraz natychmiastowemu czasowi odpowiedzi, układy NDIR stanowią podstawę systemów automatyki i wczesnego ostrzegania w przypadku nagłego spadku czystości przesyłanego medium.

Metody laserowe (TDLAS, ang.: Tunable Diode Laser absorption). Spektroskopia absorpcyjna z użyciem przestrajanego lasera diodowego dedykowana jest do bardzo selektywnego wykrywania śladowych ilości polarnych zanieczyszczeń, głównie wilgoci (H_2O). Ponieważ obecność wody w suchym CO_2 decyduje o powstawaniu korozyjnego kwasu węglowego i ewentualnych hydratów, czułość metod TDLAS na poziomie pojedynczych ppm (części na milion), oraz odporność na interferencje tła gazowego, są kluczowe dla ochrony rurociągów.

Szczegółowy dobór metod badawczych dla strumieni dwutlenku węgla o jakości rurociągowej przedstawiono w standardzie Izby Gospodarczej Gazownictwa WT-IGG-4601:2025 [1].

W odróżnieniu od analizy składu chemicznego, pomiar ilościowy ma na celu precyzyjne określenie masy lub objętości przepływającego czynnika w jednostce czasu. Zadanie to stanowi jedno z największych wyzwań inżynieryjnych w łańcuchu CCS ze względu na silną zmienność gęstości, lepkości i ściśliwości dwutlenku węgla pod wpływem nawet niewielkich wahań temperatury i ciśnienia. Ponadto, w zależności od etapu transportu, CO_2 może występować w fazie gazowej, ciekłej lub w stanie nadkrytycznym [1, 10–12].

W instalacjach przemysłowych i systemach przesyłowych przewiduje się wykorzystanie poniższych metod pomiaru strumienia:

Przepływomierze masowe Coriolisa. Są uznawane za technologię referencyjną i najbardziej niezawodną w systemach rozliczeń fiskalnych (custody transfer). Ich kluczową zaletą jest bezpośredni pomiar strumienia masy, całkowicie niezależny od zmian gęstości, temperatury, profilu przepływu oraz stanu skupienia CO_2 (gaz, ciecz, stan nadkrytyczny). Dzięki temu eliminowane są błędy wynikające z konieczności matematycznego przeliczania objętości na masę [12, 14].

Przepływomierze ultradźwiękowe (USGM). Stosowane do pomiaru strumienia objętości w rurociągach o dużych średnicach (gdzie zastosowanie urządzeń Coriolisa staje się nieekonomiczne lub technicznie niemożliwe). Mierzą czas przejścia fali ultradźwiękowej w poprzek strugi gazu lub cieczy. Czas przejścia jest uwikłany poprzez ustalony algorytm z wartością strumienia przepływu gazu. Przepływomierze ultradźwiękowe zapewniają wysoką dokładność i brak spadków ciśnienia w rurociągu, jednak do celów rozliczeniowych wymagają integracji z przelicznikami wskazującymi gęstość w czasie rzeczywistym. Wartości gęstości muszą być na bieżąco wyliczane z wykorzystaniem przyjętego algorytmu, który musi być z kolei zaimplementowany w przeliczniku przepływu.

Metody zwężkowe (kryzy, dysze). Są to tradycyjne metody różnicowo-ciśnieniowe, oparte na pomiarze spadku ciśnienia na elemencie spiętrzającym. Ze względu na prostotę konstrukcji są tanie, lecz charakteryzują się wąskim zakresem pomiarowym oraz dużą podatnością na błędy w przypadku pojawienia się przepływu dwufazowego (np. miejscowego odparowania gazu w fazie ciekłej). Wystąpienie dwu faz praktycznie eliminuje tego typu przepływomierze z pomiaru ilości CO_2. Jeżeli pomiar dokonywany jest w ścisłym reżimie pozwalającym na zachowanie jednej fazy, to w tym przypadku również należy w przeliczniku przepływu zastosować odpowiednie równanie stanu.

Przepływomierze turbinowe. Są właściwie wykorzystywane pomocniczo do pomiaru przepływu objętościowego w stabilnych fazowo warunkach (głównie gazowych lub ciekłych pod stałym wysokim ciśnieniem). Ich działanie opiera się na mechanicznym zliczaniu obrotów wirnika. Ponieważ te przepływomierze są przepływomierzami objętościowymi, dlatego i w tym przypadku bezwzględnie należy zastosować właściwe równanie stanu w przeliczniku przepływu.

Zgodnie z wymaganiami unijnego systemu handlu uprawnieniami do emisji (EU ETS), układy pomiarowe na granicach własnościowych łańcucha CCS, dla dużych emitentów i głównych strumieni transportowych muszą zachować najwyższą niepewność pomiarową poniżej 1,5% dla strumienia masy. Wymusza to stosowanie zaawansowanych systemów redukcji błędów, w tym algorytmów uwzględniających równanie stanu CO_2 dla obliczania gęstości gazu w danych warunkach. Aktualnie, ogólnym zaleceniem jest stosowanie równań: 1) równanie GERG-2008 [15] dla strumieni, gdzie stężenie zanieczyszczeń jest w granicach 1–5%, oraz 2) równanie Span-Wagnera 96 [16] dla strumieni, w których stężenie zanieczyszczeń nie przekracza 1%.

Tabela 2. Rekomendowane równania stanu dla przeliczników przepływu w zależności od rodzaju przepływomierza. (opracowanie własne)
Table 2. Recommended equations of state for flow computers, depending on the type of flow meter. (own work)

Przepływomierz	Wielkość mierzona	Parametr (kluczowy)	Równanie
USGM	objętość + VOS	gęstość	GERG-2008 lub S-W
turbinowy	objętość	gęstość	GERG-2008 lub S-W
kryzowy	różnica ciśnień	gęstość + wykładnik adiabaty	GERG-2008

Z powyższych porównań przepływomierzy wynika, że przepływomierze Coriolisa powinny być uważane za „złoty standard" w pomiarach CCS z powodu podstawowych cech metrologicznych i fizycznych:

- bezpośredni pomiar masy i niezależność od szacowania gęstości,
- brak konieczności doboru równania stanu,
- odporność na zmianę fazy,
- wysoka dokładność, spełniająca wymagania EU ETS,
- brak zewnętrznie ruchomych części i prosta instalacja,
- brak wymagań montażowych.

Pomimo wyraźnych zalet przepływomierze te mają też wady, które należy minimalizować poprzez odpowiedni sposób zaprojektowania układu pomiarowego. Do wad należy zaliczyć:

- wystąpienie spadków ciśnień,
- ograniczenia wynikające z ich średnic (<12") i masy,
- wysokie koszty CAPEX, które wynikają z elementów towarzyszących (np. podpory) a nie samego przepływomierza,
- wysokie koszty OPEX, np. okresowe wzorcowania,
- wrażliwość na drgania wibracyjne instalacji,
- spadek dokładności przy niższych gęstościach (praktycznie bez znaczenia przy transporcie CO_2).

Przy wyborze rodzaju przepływomierza należy także brać pod uwagę cel i lokalizację układu pomiarowego w łańcuchu transportu CO_2. Wiąże się to całkowicie z rodzajem fazy w jakiej może wystąpić dwutlenek węgla.

5. Korelacja gęstości strumienia dwutlenku węgla do zawartości zanieczyszczeń.

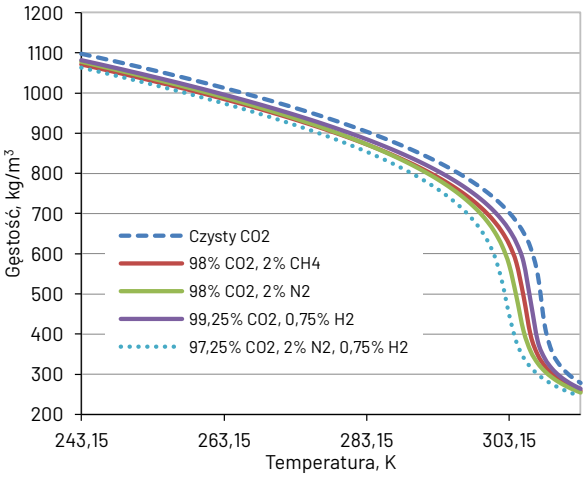
Zagadnienie transportu dwutlenku węgla jako etap łańcucha technologii wychwytywania i składowania węgla (CCS) wiąże się z koniecznością precyzyjnego określania parametrów fizykochemicznych przesyłanego CO_2. W założeniu transportowany CO_2 powinien być maksymalnie czysty, jednak w praktyce przemysłowej strumień ten zawsze zawiera domieszki innych gazów, będące pozostałościami po procesach technologicznych wychwytu. Istotnym jest, by miał on specyfikację zgodną z krajowymi i międzynarodowymi standardami. Obecność tych zanieczyszczeń w znaczący sposób modyfikuje właściwości termodynamiczne dwutlenku węgla, co rodzi szereg wyzwań technicznych i rozliczeniowych.

Kluczowym elementem tej zmienności jest bezpośrednia korelacja między czystością CO_2 a jego gęstością. W optymalnych warunkach operacyjnych dwutlenek węgla transportuje się w fazie gęstej – najczęściej jako ciecz w warunkach powyżej ciśnienia krytycznego lub rzadziej w stanie nadkrytycznym (gęstej fazie gazowej), kiedy to przy stosunkowo niskiej lepkości charakteryzuje się on dużą gęstością zbliżoną do gęstości wody. Wprowadzenie do strumienia zanieczyszczeń takich jak azot, tlen, argon, metan czy wodór znacząco zmienia wartości parametrów ciśnienia i temperatury wrzenia, otwierając zakres warunków ciśnienia i temperatury dla powstania układu dwufazowego.

Konsekwencje tych zmian mają istotny wpływ na hydraulikę przepływu, objawiając się poprzez modyfikację lepkości oraz generowanie zwiększonych spadków ciśnień w funkcji długości rurociągu. Choć obecność lekkich gazów może nieznacznie obniżać samą lepkość mieszaniny, to kluczowym czynnikiem decydującym o warunkach przepływu staje się wspomniany spadek gęstości. Aby przetransportować zakładany wolumen dwutlenku węgla w jednostce czasu przy obniżonej gęstości, medium musi poruszać się w rurociągu ze znacznie większą prędkością. Z praw mechaniki płynów wynika, że jednostkowe straty ciśnienia wywołane tarciem są wprost proporcjonalne do kwadratu prędkości przepływu i odwrotnie proporcjonalne do gęstości. W efekcie, spadek gęstości połączony ze wzrostem prędkości generuje wzrost oporów przepływu. Ciśnienie w rurociągu spada znacznie szybciej, przez co warunki w rurociągu zbliżają się do punktu pęcherzyków. To zjawisko bezpośrednio ogranicza maksymalny zasięg rurociągowego transportu, wymuszając albo przewymiarowanie średnicy rurociągów, albo rozmieszczanie stacji tłoczni i pomp pośrednich, które muszą podnosić ciśnienie strumienia CO_2 na trasie rurociągu.

Ostatnim, lecz równie skomplikowanym wyzwaniem są zmiany objętości strumienia CO_2, które bezpośrednio przekładają się na trudności w precyzyjnym rozliczaniu przepływu przy zmiennym składzie chemicznym. Ponieważ systemy handlu emisjami bazują na dokładnej masie zdeponowanego dwutlenku węgla, aparatura pomiarowa musi działać precyzyjnie. Tymczasem większość zaawansowanych przepływomierzy, takich jak przepływomierze ultradźwiękowe, projektuje się i kalibruje pod ściśle określone parametry fizyczne. Wahania stężeń domieszek zmieniają profil prędkości fal dźwiękowych w medium oraz jego podatność na siły bezwładności, co może wpływać na większe błędy pomiarowe. Dodatkowo z punktu widzenia automatyki procesowej, niestabilny skład chemiczny determinuje systemy sterowania do ciągłej adaptacji charakterystyki pracy pomp lub sprężarek w celu uniknięcia kawitacji, co czyni kontrolę nad procesem transportu wymagającym aspektem technologii CCS.

DOI: 10.65545/GWITS.2026.11.02

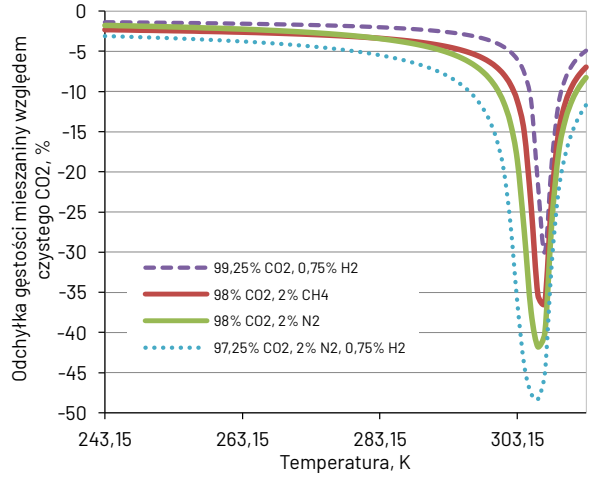


Rys. 2. Przebieg zmian gęstości dla różnych składów strumienia CO_2 w zależności od temperatury dla stałego ciśnienia 8 MPa wg modelu GERG-2008 (opracowanie własne)

Fig. 2. Density variations for different CO_2 stream compositions as a function of temperature at a constant pressure of 8 MPa, based on the GERG-2008 model (own work)

Wykres przedstawiony na rys. 2 ilustruje zależność gęstości strumienia CO_2 od temperatury dla czystego dwutlenku węgla oraz jego czterech mieszanin zawierających zanieczyszczenia technologiczne, przy zachowaniu stałego ciśnienia 8 MPa. Analiza przebiegu zmian gęstości w zakresie niskich temperatur, obejmującym przedział od 243,15 K do około 283,15 K, spadek gęstości dla wszystkich badanych składów ma charakter zbliżony do liniowego, co wynika z faktu, że medium znajduje się wówczas w fazie ciekłej (gęstości 900-1100 kg/m^3). Sytuacja ulega zmianie powyżej temperatury 293,15 K, a w szczególności w wąskim przedziale między 300 K a 308 K, gdzie widoczny jest spadek gęstości z poziomu około 700–800 kg/m^3 do wartości poniżej 300 kg/m^3 (przejście w stan nadkrytyczny - gęsta faza gazowa). Równocześnie wspomniany wykres w sposób jednoznaczny potwierdza negatywny wpływ domieszek gazów charakteryzujących się znacznie niższymi parametrami krytycznymi, takich jak metan (CH_4), azot (N_2) oraz wodór (H_2), na gęstość przesyłanego strumienia. W całym analizowanym zakresie temperatur najwyższą gęstość wykazuje czysty dwutlenek węgla, natomiast wprowadzenie jakiegokolwiek zanieczyszczenia skutkuje obniżeniem profilu gęstości, przy czym najbardziej widoczny spadek generuje mieszanina wieloskładnikowa o składzie 97,25% CO_2+2% N_2+0,75% H_2. Obecność tych domieszek modyfikuje również równowagę fazową układu, co objawia się przesunięciem strefy przejściowej spadku gęstości pomiędzy stanem ciekłym a nadkrytycznym w stronę niższych temperatur; o ile dla czystego dwutlenku węgla najbardziej istotny spadek gęstości przypada na temperaturę około 306–307 K, o tyle dla strumienia zanieczyszczonego azotem i wodorem proces ten inicjowany jest już w okolicy 301–302 K.

Ważnym kontekstem jest w tym przypadku odchylenie gęstości strumienia zawierającego zanieczyszczenia względem czystego CO_2. Wykres przedstawiony na rys. 3 ilustruje tę zależność dla poszczególnych mieszanin założonych w analizie w tym artykule w stosunku do gęstości czystego dwutlenku węgla (wyrażoną w procentach) w funkcji temperatury, przy stałym ciśnieniu operacyjnym 8 MPa. W zakresie niskich temperatur, obejmującym przedział od 243,15 K do około 283,15 K, odchyłka gęstości dla wszystkich badanych układów wieloskładnikowych utrzymuje się na relatywnie niskim, stabilnym poziomie, nie przekraczając wartości od −1% do −4%. Świadczy to o tym, że w fazie ciekłej obecność domieszek takich jak metan (CH_4), azot (N_2) czy wodór (H_2) w analizowanych stężeniach wywołuje jedynie umiarkowane obniżenie gęstości strumienia CO_2. Zasadnicza zmiana charakteru opisywanych zależności następuje po przekroczeniu temperatury 293,15 K, gdzie krzywe odchylenia znacząco się zwiększają, osiągając maksymalną ujemną odchyłkę w wąskim przedziale temperaturowym między 305 K a 307 K. W tym obszarze, który bezpośrednio odpowiada wartościom zbliżonym do punktu krytycznego czystego CO_2 (Tc = 304,2 K), odchyłka gęstości dla mieszaniny dwuskładnikowej z wodorem (99,25% CO_2 + 0,75% H_2) spada do poziomu około −30%, dla mieszaniny z metanem do około −36%, dla mieszaniny z azotem do −42%, a dla trójskładnikowego układu zanieczyszczonego zarówno azotem, jak i wodorem (97,25% CO_2 + 2% N_2 + 0,75% H_2) osiąga wartość zbliżoną do aż −48%. Wartości odchyleń dla ciśnienia 8 MPa jednoznacznie dowodzą, że w pobliżu parametrów krytycznych obecność gazów nieskraplających powoduje znaczące zmiany gęstości mogące mieć duży wpływ na warunki i dokładności pomiaru przepływu. Po przejściu w stan nadkrytyczny w miarę dalszego ogrzewania, wartości odchyłek zaczynają zmniejszać się, dążąc do poziomu od −5% do −12% w temperaturze 313,15 K, co wynika z faktu, że w wyższych temperaturach zarówno czysty CO_2, jak i zawierający zanieczyszczenia ostatecznie przyjmują już zbliżoną, niską gęstość charakterystyczną dla fazy gazowej.



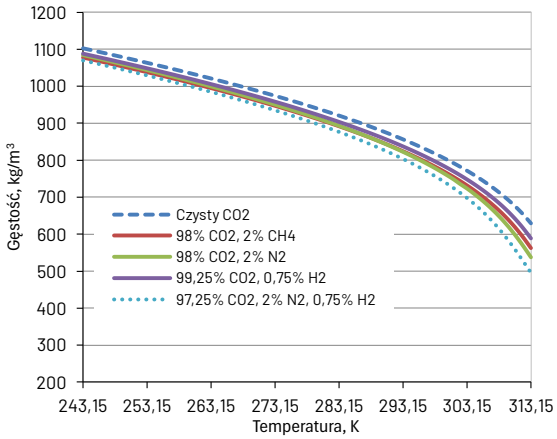
Rys. 3. Odchylenie gęstości strumienia CO_2 z zawartością zanieczyszczeń w funkcji temperatury dla ciśnienia 8 MPa (opracowanie własne)

Fig. 3. Deviation of the CO_2 stream flux density (containing impurities) as a function of temperature at a pressure of 8 MPa (own work)

Z inżynierskiego punktu widzenia transportu rurociągowego, przedstawiony wykres stanowi kluczowe wyzwanie projektowe i operacyjne dla systemów pracujących pod ciśnieniem zbliżonym do 8 MPa, w tym układów pomiarowych. Pokazuje on, że w rejonie temperatur 300–308 K (27–35°C) nawet minimalne zanieczyszczenie strumienia powoduje dużą zmianę gęstości

w tych samych warunkach, to może prowadzić powstawania istotnych błędów metrologicznych w systemach rozliczeniowych, co w praktyce przemysłowej CCUS bezwzględnie wymusza unikanie prowadzenia transportu przy dolnej granicy zakresu ciśnień roboczych (8 MPa) w tym zakresie temperatur lub konieczne będzie instalowanie systemów chłodzenia strumienia w celu utrzymania go w bezpiecznej, niskotemperaturowej fazie ciekłej.

Wykres przedstawiony na rys. 4, przedstawia zmiany gęstości strumienia CO_2 dla stałego ciśnienia operacyjnego 10 MPa, w tym przypadku w obszarze niskich temperatur, obejmującym zakres od 243,15 K do około 283,15 K, ogólny profil zmian gęstości wykazuje analogicznie zbliżony, quassi-liniowy charakter, co jest cechą typową dla stabilnej fazy ciekłej o niskiej ściśliwości. Należy zauważyć, że wraz ze wzrostem ciśnienia faza ciekła nie wykazuje istotnego wzrostu gęstości. Różnice ujawniają się jednak po przekroczeniu temperatury 293,15 K (20°C), a w szczególności w przedziale temperaturowym od 300 K do 313,15 K. Na wykresie dla 10 MPa krzywe spadku gęstości ulegają wyraźnemu wypłaszczeniu – przejście z fazy ciekłej do stanu nadkrytycznego przy wyższym ciśnieniu jest "bardziej płynne", wartości gęstości w punkcie końcowym (313,15 K) utrzymują się na wyraźnie wyższym poziomie, oscylując w granicach od około 500 kg/m^3 dla strumienia CO_2 z jednoczesnym udziałem azotu i wodoru do ponad 630 kg/m^3 dla czystego CO_2. Zjawisko to wynika bezpośrednio z oddalania się od punktu krytycznego. Istotną zmianą, jaką wprowadza podwyższenie ciśnienia do 10 MPa, jest częściowe zniwelowanie negatywnego wpływu zanieczyszczeń na przesunięcie temperaturowe strefy przemiany fazowej. Choć obecność azotu i wodoru nadal przyspiesza spadek gęstości i przesuwa krzywe w stronę niższych temperatur, to przy wyższym ciśnieniu różnice w gęstości między poszczególnymi mieszaninami w rejonie nadkrytycznym (powyżej 304,15 K) są znacznie mniejsze niż przy ciśnieniu 8 MPa.

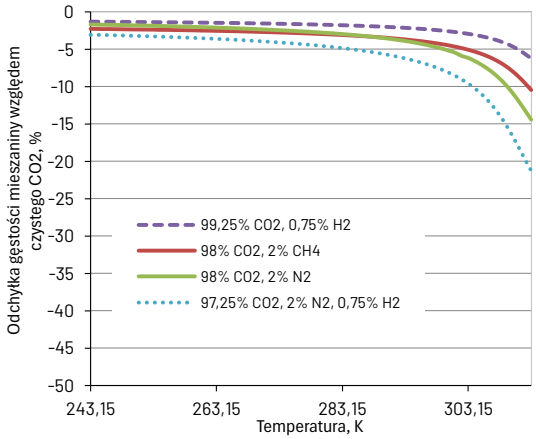


Rys. 4. Przebieg zmian gęstości dla różnych składów strumienia CO_2 w zależności od temperatury dla stałego ciśnienia 10 MPa wg modelu GERG-2008 (opracowanie własne)

Fig. 4. Density variations for different CO_2 stream compositions as a function of temperature at a constant pressure of 10 MPa, based on the GERG-2008 model (own work)

Odzwierciedleniem przebiegu zmian gęstości dla ciśnienia 10 MPa są wartości odchylenia gęstości strumienia CO_2 zawierającego zanieczyszczenia w odniesieniu do gęstości czystego dwutlenku węgla. Wykres przedstawiony na rys. 5, przedstawia odchylenie gęstości strumieni CO_2 o różnym składzie w odniesieniu do gęstości czystego dwutlenku węgla. Korelacja tego profilu z uprzednio analizowanymi odchyleniami dla 8 MPa ukazuje znaczące odzwierciedlające wpływ wyższego ciśnienia na parametry przesyłanego płynu. W podzakresie temperatur niskich i umiarkowanych, obejmującym przedział od 243,15 K do około 293,15 K, odchylenia gęstości utrzymują się na stałym, niskim poziomie w granicach od −1% do maksymalnie −5%. Kluczowa rozbieżność pojawia się po przekroczeniu temperatury 293,15 K, a w szczególności w rejonie przejścia z fazy ciekłej do nadkrytycznej (300–308 K). O ile przy ciśnieniu 8 MPa obecność domieszek gazów nieskraplających się wywoływała bardzo duże zmiany gęstości, objawiające się odchyleniami dochodzącymi do −48%, o tyle podwyższenie ciśnienia roboczego do 10 MPa niemal całkowicie eliminuje to zjawisko. Przebieg zmian odchylenia gęstości na analizowanym wykresie staje się znacznie bardziej płaski i monotoniczny, Maksymalna odchyłka rejestrowana w punkcie końcowym analizowanego zakresu temperaturowego (313,15 K) wynosi niewiele ponad −6% dla mieszaniny z wodorem, około -10,5% dla mieszaniny z metanem, −14,5% dla mieszaniny z azotem oraz niespełna −21% dla najbardziej zanieczyszczonego strumienia trójskładnikowego (97,25% CO_2 + 2% N_2 + 0,75% H_2). Spłaszczenie profilu odchyleń gęstości wynika bezpośrednio z faktu, że ciśnienie 10 MPa oddala układ od punktu krytycznego. Z punktu widzenia projektowania systemów przesyłowych do transportu CO_2, przedstawiona korelacja dostarcza bezpośrednich wniosków na to, że eksploatacja rurociągu pod ciśnieniem 10 MPa gwarantuje wysoką stabilność operacyjną strumienia CO_2 w szerokim zakresie temperatur. Eliminacja skokowych zmian gęstości zabezpiecza instalację przed powstawaniem lokalnych uderzeń hydraulicznych, eliminuje ryzyko znacznych fluktuacji ciśnienia i redukuje do minimum błędy wskazań aparatury pomiarowej. Należy zauważyć, że dalsze zwiększenie ciśnienia, np. do 12–14 MPa spowoduje dalsze zmniejszanie odchyleń zmian gęstości względem strumieni CO_2 o różnych składach, w tym względem czystego CO_2, co praktycznie wyeliminuje negatywny wpływ zanieczyszczeń na dokładność ilościowego pomiaru przepływu. Z punktu widzenia technologii rurociągowego przesyłu CO_2, zwiększenie ciśnienia operacyjnego z 8 MPa do 10 MPa stanowi efektywną metodę stabilizacji termodynamicznej strumienia CO_2, ponieważ eliminuje ryzyko wystąpienia gwałtownych, zmian gęstości. Z technicznego punktu widzenia, wielkoskalowy przesył CO_2 przy ciśnieniu 10 MPa minimalizuje podatność układu na anomalie związane z obecnością zanieczyszczeń, co z kolei przekłada się na przewidywalną i stabilną pracę armatury, w tym pomiarowej, ułatwia procedury bilansowania masowego za pomocą przepływomierzy Coriolisa.

DOI: 10.65545/GWITS.2026.11.02



Rys. 5. Odchylenie gęstości strumienia CO_2 z zawartością różnych zanieczyszczeń w funkcji temperatury dla ciśnienia 10 MPa (opracowanie własne)

Fig. 5. Deviation of CO_2 stream density containing various impurities as a function of temperature at a pressure of 10 MPa (own work)

6. Zalecenia fazowe i dobór przepływomierzy pomiarowych

Dwutlenek węgla przy niewielkich zmianach wartości parametrów fizykochemicznych może bardzo łatwo zmienić właściwości fazowe. Z perspektywy stabilności algorytmów przeliczania masy oraz minimalizacji niepewności pomiarowej (wymóg EU ETS na poziomie 1,5% dla najwyższego poziomu monitorowania, dla głównych strumieni w dużych instalacjach), kluczowe jest kategoryczne unikanie obszarów dwufazowych (ciecz-gaz) oraz strefy bezpośrednio otaczającej punkt krytyczny.

Dla fazy gazowej lokalne przewężenia wewnątrz aparatury pomiarowej generują spadki ciśnienia, które poprzez wysoki i dodatni współczynnik Joule'a-Thomsona dla CO_2 wywołują gwałtowne schłodzenie strugi, grożąc przejściem strumienia w stan niestabilny lub resublimację do fazy stałej.

W magistralach dalekosiężnych optymalne okno operacyjne wymusza utrzymywanie bezpiecznego nadciśnienia na poziomie 9–15 MPa. Gęstość płynu zbliża się wówczas do gęstości cieczy (700–900 kg/m^3), przy zachowaniu niskiej lepkości dynamicznej charakterystycznej dla gazu. Rekomendowane są w takim przypadku przepływomierze Coriolisa lub wielościeżkowe przepływomierze ultradźwiękowe. Przy dużych średnicach rurociągów (powyżej DN250) technologia ultradźwiękowa zapewnia minimalny spadek ciśnienia, co eliminuje ryzyko kawitacji i destabilizacji termodynamicznej. Konieczna jest jednak implementacja w komputerze przepływu równania stanu GERG-2008, pozwalającego na kompensację wpływu zanieczyszczeń.

Przy transporcie morskim i w morskich terminalach załadunkowych CO_2 utrzymywany jest w stanie głębokiego przechłodzenia (temperatury od –50 do –20°C), przy ciśnieniach od 1,5 do 5,0 MPa, czyli występuje w postaci cieczy. Rekomendacją technologiczną są wówczas przepływomierze masowe Coriolisa, które w tych warunkach uwypuklają wszystkie swoje zalety omówione w poprzednim rozdziale niniejszej prezentacji.

Dla lokalnego transportu dystrybucyjnego, czyli na instalacjach wychwytu CO_2 lub przed wprowadzeniem danej partii gazu do rurociągów magistralnych, panują łagodna warunki fizyczne, p < 3 MPa i t < 30°C, w których płyn zachowuje się jak typowy gaz o przewidywalnej ściśliwości. W takich warunkach możliwe jest zastosowanie każdego rodzaju przepływomierza z zastrzeżeniem konieczności implementacji równań stanu (tabela 1).

Istnieją jednak obszary bardzo trudne z punktu widzenia pomiaru strumienia CO_2, wręcz niezalecane, których w rurociągach należałoby unikać. Przede wszystkim takim obszarem jest otoczenie punktu krytycznego, czyli temperatury od 30 do 35°C i ciśnienia od 7,2 do 8,0 MPa. Pomiary w tym otoczeniu powinny być zakazane, głównie z powodu:

- możliwych bardzo dużych zmian gęstości, nawet o kilkaset procent przy bardzo niewielkich zmianach temperatury sięgających choćby tylko ułamek stopnia Celsjusza,
- każda zmiana ciśnienia, wywołana np. jakimkolwiek przewężeniem, od razu burzy jednorodność płynu wywołując intensywną mieszaninę pęcherzy gazu i kropel cieczy,
- wystąpienia rozproszenia i/lub zaniku sygnału dla USGM,
- wystąpienia asymetrycznego rezonansu dla Coriolisów z powodu tzw. błędu uderzeniowego płynu – np. pulsacja hydrauliczna – i generowania bardzo wysokich błędów losowych.

Obszarem równie trudnym jest otoczenie każdego obszaru dwufazowego gaz-ciecz. Transport rurociągowy takiej mieszaniny dwufazowej powoduje uderzenia hydrauliczne, kawitację oraz gwałtowne zmiany ciśnienia. W takich warunkach jest praktyczny brak możliwości rzetelnego pomiaru strumienia masy tradycyjnymi metodami jednofazowymi. Żadne standardowe równanie stanu nie wyznaczy poprawnie wartości gęstości kompozytu gaz-ciecz w warunkach dynamicznych. W takich przypadkach możliwe są do zastosowania jedynie przepływomierze Coriolisa. Sytuacjami awaryjnymi są także sytuacje w obszarze punktu potrójnego, ok. 56,6°C i 0,52 MPa. Zbliżenie się do tych warunków grozi natychmiastowym ryzykiem pojawienia się fazy stałej, która blokuje lub niszczy każdy z możliwych przepływomierzy. W tabeli 3 poniżej zamieszczono ogólne rekomendacje dotyczące możliwych zastosowań różnych przepływomierzy w odpowiednich warunkach procesowych.

Tabela 3. Rekomendacje ogólne dla praktycznych zastosowań przepływomierzy w pomiarach strumieni CO2 (opracowanie własne)

Table 3. General recommendations for practical applications of flowmeters in CO_2 stream measurements (own work)

Warunek procesowy	Zalecany stan fazowy	Wymaganie procesowe	Zalecany przepływomierz
transport daleki rurociągowy	faza nadkrytyczna/ciekła	ciśnienie powyżej punktu krytycznego	Coriolis, USGM + GERG-2008 lub S-W
transport morski	faza ciekła	ciśnienie powyżej linii nasycenia	Coriolis
wychwyt CO_2	faza gazowa	temperatura powyżej punktu rosy (CO_2 i H_2O)	USGM, turbina/ rotor, kryza, (coriolis?)

7. Podsumowanie i wnioski

Transport rurociągowy dwutlenku węgla w systemach CCS wymaga ścisłej kontroli parametrów fizykochemicznych medium oraz zastosowania zaawansowanych metod pomiarowych, które zapewniają wysoką dokładność bilansowania masowego sieci przesyłowej CO_2 i bezpieczeństwo eksploatacji. Przedstawione w artykule analizy jednoznacznie wskazują, że nawet niewielkie ilości zanieczyszczeń – szczególnie gazów nieskraplających się, takich jak N_2, H_2 czy CH_4 – mogą znacząco obniżać gęstość CO_2 i przesuwać warunki przejścia fazowego, co prowadzi do wzrostu spadków ciśnienia, ryzyka powstawania przepływu dwufazowego w rurociągu oraz zwiększenia błędów pomiarowych. Zjawiska te są szczególnie intensywne w pobliżu punktu krytycznego, co potwierdzają wyniki modelowania gęstości dla ciśnień 8 i 10 MPa. Podwyższenie ciśnienia roboczego do poziomu około 10 MPa znacząco stabilizuje właściwości termodynamiczne CO_2, redukując odchylenia gęstości i minimalizując wpływ zanieczyszczeń na pracę aparatury pomiarowej.

W kontekście metrologii przepływu CO_2 kluczowe znaczenie mają przepływomierze masowe Coriolisa, które dzięki bezpośredniemu pomiarowi masy i odporności na zmiany fazy stanowić będą technologię referencyjną dla rozliczeń ilości wychwyconego i przetransportowanego dwutlenku węgla. W instalacjach o dużych średnicach rurociągów istotną rolę pełnić mogą również przepływomierze ultradźwiękowe, pod warunkiem zastosowania odpowiednich równań stanu (GERG2008 lub SpanWagner) kompensujących wpływ zmian składu mieszaniny. Jednocześnie analiza wykazała, że warunki ciśnienia i temperatury bliskie punktowi krytycznemu oraz obszar dwufazowy powinny być bezwzględnie wykluczane z lokalizacji układów pomiarowych ze względu na niestabilność sygnału i wysokie ryzyko błędów.

Całość przeprowadzonych rozważań potwierdza, że skuteczny i bezpieczny rurociągowy transport CO_2 wymaga jednoczesnego spełnienia wytycznych i norm jakościowych, właściwego doboru technologii pomiarowych oraz utrzymywania stabilnych warunków termodynamicznych w rurociągu. Wnioski te stanowić mogą istotny wkład w rozwój krajowych i europejskich standardów projektowania infrastruktury CCS oraz podkreślić mogą kluczową rolę precyzyjnej metrologii w procesie dekarbonizacji przemysłu.

8. Literatura

[1] Izba Gospodarcza Gazownictwa. (2025). *Zalecenia dotyczące projektowania i eksploatacji rurociągów do transportu dwutlenku węgla* (WT-IGG-4601:2025)

[2] International Organization for Standardization. (2024). *Carbon dioxide capture, transportation and geological storage—Pipeline transportation systems* (ISO 27913:2024).

[3] DNV. (2021). *Design and operation of carbon dioxide pipelines* (DNV-RP-F104)

[4] Vitali, M., Corvaro, F., Marchetti, B., & Terenzi, A. (2022). Thermodynamic challenges for CO_2 pipelines design: A critical review on the effects of impurities, water content, and low temperature. International Journal of Greenhouse Gas Control, 114, 103605. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103605

[5] Włodek, T. (2012). Wybrane aspekty techniczne rurociągowego transportu dwutlenku węgla. *AGH Drilling, Oil, Gas,* 29(1), 323-335.

[6] Lu, H., Ma, X., Huang, K., Fu, L., & Azimi, M. (2020). Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121994. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121994

[7] Nagy, S., & Włodek, T. (2024). Zagadnienia transportu CO_2 w kontekście realizacji projektów CCS w Polsce. *Przegląd Gazowniczy*, 6/2024

[8] Vandeginste, V., & Piessens, K. (2008). Pipeline design for a least-cost router application for CO_2 transport in the CO_2 sequestration cycle. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(4), 571–581. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.02.001

[9] International Organization for Standardization. (2020). *Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage—Cross cutting issues—CO_2 stream composition* (ISO/TR 27921:2020)

[10] Izba Gospodarcza Gazownictwa. (w przygotowaniu). WT-IGG-4602 [Projekt wytycznych technicznych]

[11] International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme. (2025). *CO_2 flow metering technologies* (Technical Report 2025-07). https://doi.org/10.62849/2025-07

[12] Włodek, T., & Rosłonek, G. (2024). Metody pomiaru strumienia dwutlenku węgla w transporcie rurociągowym. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 98(10), 2–7. https://doi.org/10.15199/17.2024.10.1

[13] Wang, L., Yan, Y., Wang, X., Wang, T., Duan, Q., & Zhang, W. (2017). Mass flow measurement of gas-liquid two-phase CO_2 in CCS transportation pipelines using Coriolis flowmeters. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, 269–275. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.11.021

[14] Green, T., Reese, M., & Henry, M. (2008). Two-Phase CO_2 measurement and control in the Yates oil field. *Measurement and Control*, 41(7), 205–207. https://doi.org/10.1177/002029400804100702

[15] Kunz, O., & Wagner, W. (2012). The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An expansion of GERG-2004. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 57(11), 3032–3091. https://doi.org/10.1021/je300655b

[16] Span, R., & Wagner, W. (1996). A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data,* 25(6), 1509–1596. https://doi.org/10.1063/1.555991

DOI: 10.65545/GWITS.2026.11.02