

RADOSŁAW TARKOWSKI*, BARBARA ULIASZ-MISIAK**

Przemysłowe źródła emisji CO₂ na świecie w aspekcie podziemnego składowania

Słowa kluczowe

Emisja CO₂, źródła emisji, podziemne magazynowanie, gazy spalinowe, gazy przemysłowe

Streszczenie

W artykule scharakteryzowano główne sektory przemysłowe, które są źródłem emisji dużych ilości CO₂ na świecie. Przedstawiono informacje o głównych działach przemysłu, emitujących największe ilości CO₂, o rozmieszczeniu stacjonarnych źródeł emisji, udziale sektorów przemysłowych w emisji CO₂, a także dane o koncentracji CO₂ w strumieniu gazów spalinowych z różnych typów elektrowni oraz przemysłu. Na przykładzie Holandii omówiono możliwości i dokonano oceny kosztów zmniejszenia emisji CO₂ z procesów przemysłowych.

Autorzy zaproponowali, aby rozpatrywać podziemne składowanie CO₂ dla dwóch przypadków: dla odseparowanego CO₂ oraz strumienia czystego gazu. Pierwszy przypadek dotyczy emisji CO₂ z energetyki i części procesów przemysłowych, drugi natomiast obejmuje emisje z niektórych procesów przemysłowych. Możliwe, że w pierwszej kolejności instalacje podziemnego składowania dwutlenku węgla, w szczególności pilotażowe, powstaną w pobliżu źródeł emisji czystego strumienia tego gazu.

Wprowadzenie

W Pracowni Geotechnologii Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN realizowany jest temat dotyczący podziemnego składowania dwutlenku węgla. Niniejsza publikacja stanowi kontynuację wcześniejszych prac autorów, wykonanych w ramach

* Doc. dr hab. inż., ** Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; tarkowski@min-pan.krakow.pl; umb@min-pan.krakow.pl

tematu: *Emisja dwutlenku węgla w Polsce w aspekcie podziemnego magazynowania*, w którym opisano: emisję gazów cieplarnianych w Polsce, uzgodnienia międzynarodowe dotyczące emisji gazów, emisję dwutlenku węgla na świecie oraz w Polsce (źródła informacji, prognozy emisji, analizę emisji według klasyfikacji CORINAIR i PKD) oraz przedstawiono emisję CO₂ w poszczególnych województwach (Tarkowski, Uliasz-Misiak 2003a).

Celem prezentowanego artykułu jest charakterystyka głównych sektorów przemysłowych, które na świecie są źródłem emisji dużych ilości CO₂. Tematykę tę podjęto ze względu na jej istotne znaczenie dla zagadnienia podziemnego składowania CO₂ oraz niewielką liczbę opublikowanych w Polsce prac w tym zakresie. Podstawę stanowiła analiza danych z publikacji, opracowań zagranicznych oraz baz danych organizacji takich jak International Energy Agency GHG i Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).

1. Emisja CO₂ w aspekcie podziemnego składowania

Większość naukowców uważa, że wzrost emisji dwutlenku węgla do atmosfery w ciągu ostatnich 150 lat, czyli od początku ery przemysłowej, jest jedną z głównych przyczyn ocieplenia klimatu na kuli ziemskiej. Dlatego też rozważa się różne sposoby zmniejszenia emisji tego gazu. Obecnie rozpatrywane są dwie możliwości składowania/magazynowania dwutlenku węgla: w oceanie lub w głębokich strukturach geologicznych. Ze względu na znaczne wątpliwości jakie budzi składowanie tego gazu w oceanie oraz wysokie koszty, wydaje się ono mniej prawdopodobne w zastosowaniu. Podziemne składowanie CO₂ na skalę przemysłową jest natomiast brane pod uwagę jako opcja możliwa do zastosowania w niedalekiej przyszłości. Może to w sposób znaczący wpłynąć na ograniczenie efektu cieplarnianego (Holloway 2002; Holloway, Van der Straaten 1995; Herzog i in. 2000).

Koncepcja podziemnego składowania dwutlenku węgla zakłada wykorzystanie wyeksploatowanych złóż węglowodorów, głębokich poziomów wodonośnych, nieeksploatowanych pokładów węgla kamiennego oraz wysadów solnych. Złoża ropy naftowej i gazu ziemnego, po ich szczypaniu stają się dogodnymi miejscami do podziemnego składowania tego gazu (Holt i in. 1995; Hendriks, Blok 1995). Zbiorniki te są bezpieczne — ich szczelność została sprawdzona w okresie milionów lat. Również ze względu na duży potencjał magazynowania dwutlenku węgla, interesujące są głębokie poziomy wodonośne oraz komory w wysadach solnych. Nieeksploatowane ze względów ekonomicznych pokłady węgla kamiennego, w przypadku jego dużej porowatości, rozważane są również jako miejsca składowania dwutlenku węgla.

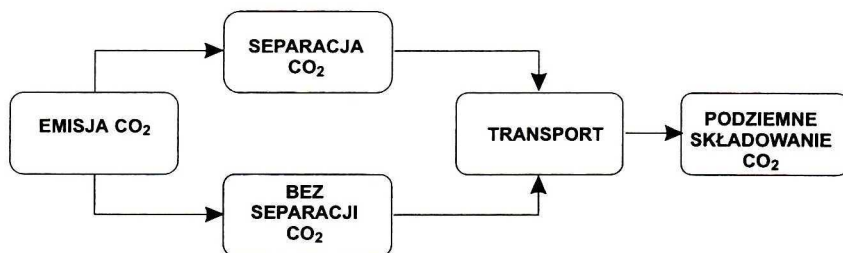
Na świecie są już przemysłowe instalacje podziemnego zatłaczania CO₂. Zatłaczanie dwutlenku węgla w celu intensyfikacji wydobywania węglowodorów (EOR) jest dzisiaj technologią sprawdzoną i stosowaną na kilkudziesięciu złożach ropy naftowej w Ameryce Północnej. Magazynowanie dwutlenku węgla odbywa się na złożu gazu ziemnego Sleipner na Morzu Północnym. W przygotowaniu są podobne instalacje: Projekt Snohvit (Morze Barentsa), Projekt Natuna (Morze Chińskie) (por. Tarkowski 2003).

Koncepcja podziemnego składowania/magazynowania dwutlenku węgla (Holloway 2002; Holloway, Van der Straaten 1995; Herzog i in. 2000; Tarkowski, Uliasz-Misiak 2003) zakłada wykorzystanie gazu pochodzącego z dużych przemysłowych źródeł emisji. W chwili obecnej, przyczyną dla której podziemne składowanie CO₂ nie jest powszechnie stosowane, są uwarunkowania ekonomiczne. Pomijając koszty wychwycenia CO₂ z gazów spaliny- wych/przemysłowych, transportu i podziemnego zatłaczania oraz opłaty koncesyjne, opła- calność podziemnego składowania CO₂ jest uwarunkowana ilością zatłaczanego dwutlenku węgla oraz jego procentową zawartością w gazach spalinowych/przemysłowych.

Aby inwestycja podziemnego składowania CO₂ była ekonomicznie uzasadniona, musi opierać się na dużym punktowym źródle emisji. Jedynie wybrane sektory przemysłu, emi- tujące duże ilości CO₂ lub skoncentrowany strumień tego gazu, rozważane są do ewentual- nego podziemnego składowania. Źródła emisji tego typu istnieją w sektorach gospodarki spalających paliwa kopalne i sektorach przemysłowych bazujących na tych paliwach. Duże punktowe źródła emisji są miejscami, w pobliżu których należy szukać lokalizacji do podziemnego składowania dwutlenku węgla. Dlatego też analiza danych o emisji dwutlenku węgla z różnych sektorów przemysłu, uzupełniona informacjami o zawartości CO₂ w stru- mieniu gazów spalinowych/przemysłowych, jest jednym z istotnych zagadnień.

Antropogeniczny dwutlenek węgla do podziemnego składowania może być pozyskiwany na skalę przemysłową z dwóch źródeł: z gazów spalinowych emitowanych do atmosfery przez elektrownie, elektrociepłownie i zakłady przemysłowe oraz z gazów powstających w procesach przemysłowych (kategorie: Energia i Procesy przemysłowe w metodologii IPCC). W dalszej części artykułu oba wymienione źródła są rozważane jako przemysłowe źródła emisji. W przyszłości kolejnym źródłem tego gazu będzie produkcja paliw wo- dorowych.

Największe ilości dwutlenku węgla emituje sektor energetyczny. W przypadku pod- ziemnego składowania CO₂ pochodzącego z tego sektora, ze względu na olbrzymie ilości emitowanych gazów spalinowych (kilka Mg/rok w przypadku średniej wielkości elektrowni) przy jego niewielkiej zawartości w strumieniu tych gazów (kilka — kilkanaście procent), należałoby go wcześniej odseparować. W chwili obecnej separacja dwutlenku węgla na skalę przemysłową, chociaż technicznie możliwa, jest prowadzona rzadko ze względu na jej wysokie koszty przy niskich opłatach za emisję dwutlenku węgla (Uliasz-Misiak 2003).



Rys. 1. Etapy podziemnego składowania CO₂ dla dużych punktowych źródeł emisji

Fig. 1. Stages in underground storage of CO₂ for major point sources of emission.

Zawartość CO₂ w gazach z procesów przemysłowych jest zróżnicowana i zależy od procesu, w wyniku którego powstaje. Niekiedy jest bardzo duża i wynosi powyżej 90% objętości w emitowanym strumieniu gazów. Taki strumień gazu, w celu jego zatłoczenia do podziemnego magazynu/składowiska, wymagałby jedynie sprężenia. Autorzy proponują rozpatrywać podziemne składowanie CO₂ dla dwóch przypadków: odseparowany CO₂ oraz czysty strumień tego gazu (rys. 1). Pierwszy przypadek dotyczy większości emisji CO₂ z energetyki i części procesów przemysłowych, drugi natomiast obejmuje emisje z niektórych procesów przemysłowych i chociaż ilościowo ma mniejsze znaczenie, może być bardziej interesujący. Jest prawdopodobne, że w pierwszej kolejności zakłady podziemnego unieszkodliwiania dwutlenku węgla, a w szczególności instalacje pilotażowe, powstaną przy centrach emisji czystego strumienia tego gazu.

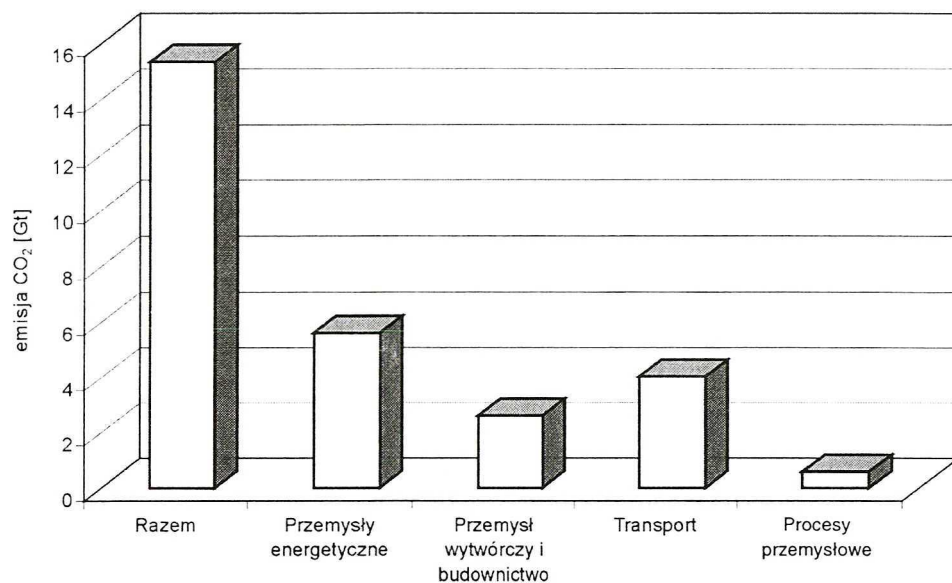
2. Przemysłowe źródła emisji CO₂

W rozdziale tym przedstawiono wybrane informacje o emisji CO₂ na świecie uzyskane z baz danych i literatury o przemysłowych źródłach emisji tego gazu, głównych działach przemysłu emitujących największe ilości CO₂, rozmieszczeniu stacjonarnych źródeł emisji, udziału poszczególnych sektorów przemysłowych w emisji CO₂. Uzupełniono je danymi o koncentracji CO₂ w strumieniu gazów spalinowych z różnych typów elektrowni oraz przemysłu. Na przykładzie Holandii przedstawiono ekonomiczną ocenę możliwości uniknięcia emisji CO₂ z procesów przemysłowych.

Dane o emisji dwutlenku węgla zawarte są w opracowaniach i raportach instytucji rządowych i pozarządowych, mniej liczne natomiast są publikacje naukowe na ten temat. Interesujący jest raport IEA Greenhouse Gas R&D Program (IEA GHG) zawierający bazę danych o emisji CO₂ (Gale 2002). W oparciu o analizę stacjonarnych źródeł emisji utworzono światową bazę danych o emisji CO₂. Obejmuje ona 14 641 zakładów i zawiera dane o emisji z: elektrowni, rafinerii, zakładów przetwarzających gaz ziemny, produkujących amoniak, cement, wodór i etylen oraz żelazo i stal. W bazie IEA GHG ujęto również niektóre zakłady z terenu Polski. Tego typu pełne zestawienie, uwzględniające wszystkie duże zakłady emitujące dwutlenek węgla, należałoby przygotować dla obszaru Polski.

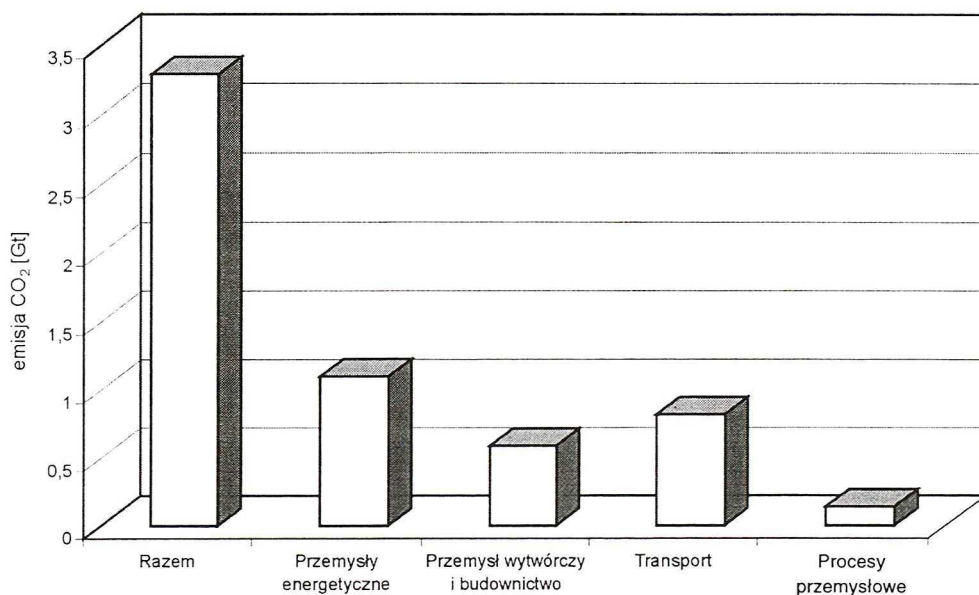
Skumulowana światowa emisja CO₂ z 14 641 zakładów umieszczonych w bazie wynosiła w 1997 roku 13,44 Gt/rok. Globalna emisja CO₂ w 1997 roku, ze wszystkich antropogenicznych źródeł, podana w Outlook Energy World, wynosiła 22,6 Gt/rok, w tym: z elektrowni — 9,8 Gt/rok i źródeł przemysłowych — 4,3 Gt/rok (63% całkowitej emisji CO₂), transportu (źródła rozproszone) — 4,8 Gt/rok (21% emisji); na pozostałe sektory przypada 3,7 Gt/rok (rys. 2) (Gale 2002). Dla porównania, zestawiono strukturę emisji CO₂ w krajach UE (rys. 3).

W tabeli 1 przedstawiono emisję CO₂ w działach przemysłu emitujących największe ilości tego gazu na świecie. Zostały one zestawione na podstawie analizy danych źródłowych IEA GHG za lata 1994—1996 (Thambimuthu i in. 2002). W analizowanym okresie



Rys. 2. Struktura źródeł emisji CO₂ na świecie w 2000 roku
(na podstawie danych: Greenhouse gas inventory database — GHG)

Fig. 2. Structure of sources of CO₂ emissions in the world in the year 2000
(on the basis of data after Greenhouse gas inventory database — GHG)



Rys. 3. Struktura źródeł emisji CO₂ w krajach UE w 2000 roku (na podstawie danych: EEA Data Service)

Fig. 3. Structure of sources of CO₂ emissions in UE countries in the year 2000
(on the basis of data after EEA Data Service)

TABELA 1

Działy przemysłu na świecie emitujące największe ilości CO₂ (za: Thambimuthu i in. 2002)

TABLE 1

Industrial sectors emitting the largest quantities of CO₂ in the world (after Thambimuthu and others 2002)

Dział przemysłu	Emisja CO ₂ [Mt/rok]
Produkcja prądu	7 660
Hutnictwo żelaza i stali	1 440
Przemysł cementowy	1 130
Przemysł rafineryjny	690
Petrochemia	520

całkowita emisja dwutlenku węgla z głównych przemysłowych źródeł emisji wynosiła 11,44 Gt. Największy udział miała produkcja prądu (67%), hutnictwo żelaza i stali (12,6%), przemysł cementowy (9,9%), przemysł rafineryjny (4,5%). Nowe dane wskazują na dalszy wzrost emisji CO₂ z produkcji prądu elektrycznego (8,9 Gt w 2000 r.). Potwierdza to, że zakłady energetyczne są i pozostaną w przyszłości największym źródłem emisji dwutlenku węgla.

2.1. Rozmieszczenie źródeł emisji CO₂

Przewidywania World Energy Council wskazują, że emisja CO₂ ze wszystkich źródeł w porównaniu do poziomu z 2000 roku (13,44 Gt) może wzrosnąć w roku 2010 o około 36% (18,24 Gt/rok) i o 76% (23,31 Gt/rok) w 2020 roku. Rozmieszczenie stacjonarnych antropogenicznych centrów emisji CO₂ na kuli ziemskiej zilustrowano na rysunku 4. Obszarem o największej liczbie stacjonarnych źródeł emisji CO₂ jest Ameryka Północna (37%), kraje OECD (14%) i Chiny (10%). Wyróżniają się trzy duże skupiska stacjonarnych źródeł emisji CO₂: w środkowej i wschodniej części USA, w Europie centralnej (Wielka Brytania, Holandia, Niemcy, Austria, Węgry i Czechy) i Azji południowo-wschodniej (wschodnie Chiny i Japonia). Udział emisji CO₂ w poszczególnych regionach świata (rys. 5) pokazuje, że obszarami z największą liczbą stacjonarnych emiterów CO₂ są: Chiny 25% (3,4 Gt/rok), Ameryka Północna 20% (2,69 Gt/rok) i kraje OECD 13% (1,75 Gt/rok). Każdy z pozostałych regionów emitował w badanym okresie mniej niż 10% całkowitej światowej emisji CO₂ (Gale 2002).

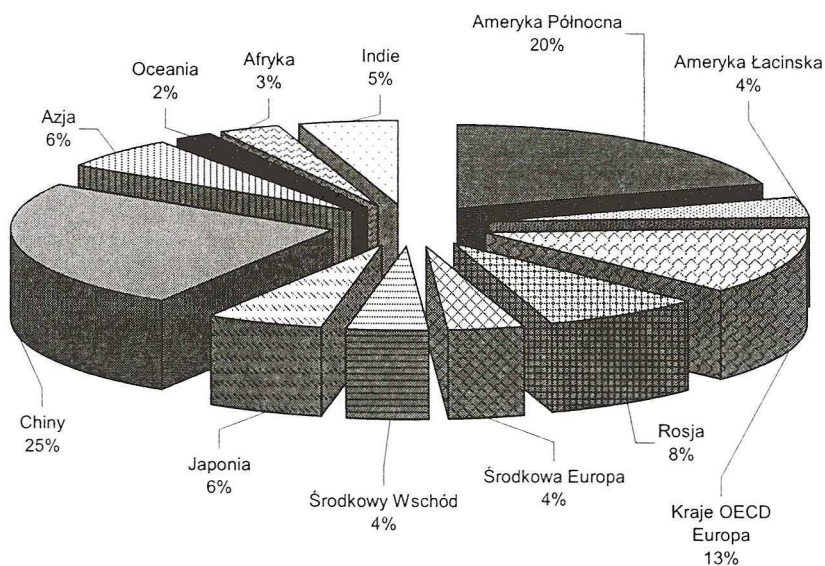
2.2. Główne sektory przemysłowe emitujące CO₂

Poniżej przedstawiono sektory przemysłowe emitujące największe ilości dwutlenku węgla (rys. 6). Dominującym sektorem jest energetyka (około 54% ze stacjonarnych źródeł



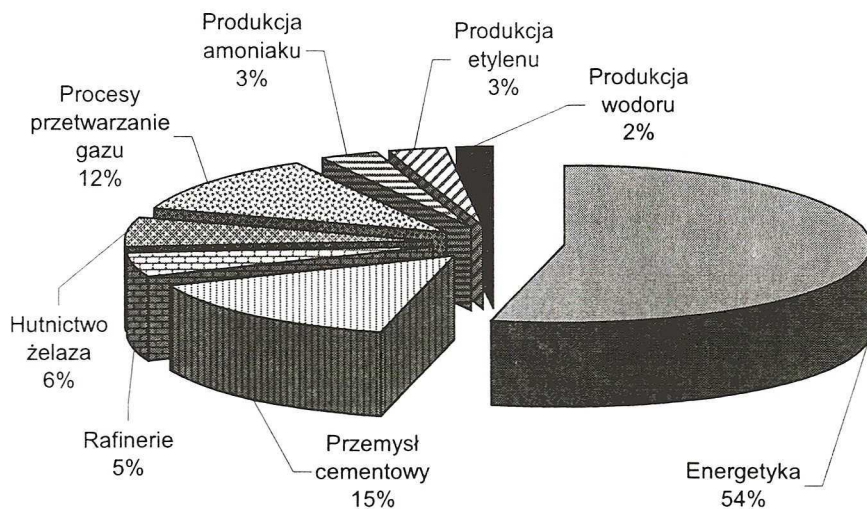
Rys. 4. Główne centra emisji CO₂ na świecie (na podstawie: Gale 2002)

Fig. 4. Major centers of CO₂ emissions in the world (on the basis of data after Gale 2002)



Rys. 5. Udział emisji CO₂ w poszczególnych regionach świata (na podstawie danych: Gale 2002)

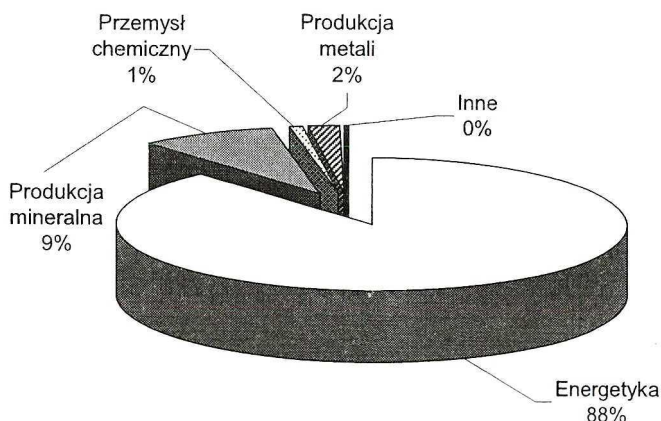
Fig. 5. Shares of CO₂ emissions from individual regions of the world (on the basis of data after Gale 2002)



Rys. 6. Emisja CO₂ na świecie w poszczególnych sektorach (na podstawie danych: Gale 2002)

Fig. 6. CO₂ emissions from individual sectors of the industry in the world (on the basis of data after Gale 2002)

emisji CO₂), wysoki udział wykazuje przemysł cementowy (15%) oraz sektor przetwarzania gazu (12%). Mniejsze znaczenie (poniżej 10% udziału) mają: hutnictwo żelaza i stali, rafinerie, produkcja amoniaku, etyliny, wodoru. Dla porównania na rysunku 7 przedstawiono rozkład źródeł emisji CO₂ w krajach UE.



Rys. 7. Emisja CO₂ w krajach UE w poszczególnych sektorach w 2000 rok
(na podstawie danych: EEA Data Service)

Fig. 7. CO₂ emissions for individual sectors of the industry in UE countries in the year 2000
(on the basis of data after EEA Data Service)

W sektorze energetycznym, ze względu na ogromne ilości emitowanego dwutlenku węgla, upatruje się największe możliwości redukcji emisji tego gazu. Aby było to ekonomicznie uzasadnione, konieczne jest opracowanie tanich metod separacji CO₂ z gazów spalinowych lub nowych technologii spalania, np. dekarbonizacja paliwa na wejściu do instalacji, spalanie tlenowe i inne (Jean-Baptiste, Ducroux 2003).

Poza energetyką, znaczące ilości dwutlenku węgla mogłyby być również wychwytywane w zakładach przemysłowych. Analiza możliwości pozyskania CO₂ z produkcji żelaza i stali, cementu, rafinacji oleju, produkcji wodoru i amoniaku oraz oczyszczania gazu ziemnego została omówiona przez Thambimuthu i in. (2002).

Emisja z hut odpowiada za 80% emisji CO₂ powstającego przy produkcji stali. Około 70% węgla (pierwiastkowego) wprowadzane jest w stalowniach w gazie wielkopieczowym, używanym jako paliwo. Typowy gaz wielkopieczowy zawiera 20% objętości CO₂. Dwutlenek węgla mógłby zostać wychwycony przed albo po spalaniu tego gazu, przy koncentracji CO₂ w gazach spalinowych wynoszącej około 27% objętości.

Dwutlenek węgla w procesach produkcji cementu emitowany jest z dwóch podstawowych źródeł bezpośrednich: procesu dekarbonizacji CaCO₃ i spalania paliw oraz dwóch źródeł pośrednich: produkcji energii elektrycznej wykorzystywanej w cementowni i transporcie. Gaz ten pochodzący z procesów technologicznych stanowi więcej niż połowę cał-

kowej emisji CO₂ w tych zakładach. Gaz odlotowy powstający w trakcie suszenia cementu, w zależności od procesu produkcyjnego i typu produkowanego cementu, zawiera od 14 do 33% objętości CO₂.

Należy zaznaczyć, że w przemyśle cementowym emisja gazów cieplarnianych z procesów wytwarzania cementu wynosi ponad 47% całkowitej emisji, około 40% ze spalania pierwotnych nośników energii i po 5% z transportu oraz produkcji energii elektrycznej niezbędnej do produkcji cementu (Uliasz-Bocheńczyk, Mokrzycki 2003).

Okolo 65% emisji CO₂ z rafinerii pochodzi z pieców i kotłów. Skład gazów odlotowych z tych urządzeń jest zbliżony do gazów spalinowych z elektrowni. Podobna sytuacja występuje w przemyśle petrochemicznym przy produkcji etyliny.

Przy przetwarzaniu gazu ziemnego, głównie przy produkcji nawozów azotowych powstaje dwutlenek węgla który jest emitowany do atmosfery. Mógłby on zostać sprężony w celu podziemnego magazynowania. Dzięki temu, przy stosunkowo niskich kosztach możliwe byłoby uniknięcie emisji CO₂ do atmosfery. Tego typu zakłady byłyby również dobrym miejscem do demonstracji technik transportu i składowania CO₂.

Nadmiar dwutlenku węgla (powyżej 2,5% objętości gazu) w eksploatowanym gazie ziemnym musi być odseparowany. Wychwycony CO₂ zwykle jest wypuszczany do atmosfery, chociaż mógłby zostać zgromadzony w podziemnych zbiornikach. Pierwszy przykład na skalę przemysłową to instalacja do separacji i magazynowania dwutlenku węgla na złożu gazu ziemnego Sleipner Vest w norweskim sektorze Morza Północnego (Herzog i in. 2000; Torp, Gale 2002).

2.3. Dane o koncentracji CO₂ w strumieniu gazów spalinowych/przemysłowych

Emisja dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych jest zróżnicowana, zależy od rodzaju paliwa i zawartości w nim węgla pierwiastkowego. Koks i węgiel zawierają najwięcej węgla na jednostkę użytecznej energii, podczas gdy ropa naftowa zawiera 75% tego co węgiel, a gaz ok. 55%. Zawartość dwutlenku węgla w gazach z procesów technologicznych jest zróżnicowana i uzależniona od procesu, w jakim gaz ten powstaje. W procesach wytwarzania amoniaku w zakładach azotowych, w procesach wytwarzania etyliny w przemyśle petrochemicznym oraz w niektórych procesach hutniczych powstaje strumień CO₂ o wysokiej koncentracji (powyżej 90% zawartości CO₂).

Typowe koncentracje dwutlenku węgla w gazach spalinowych, w wybranych sektorach przemysłu, zostały przedstawione w pracy Thambimuthu i in. (2002). Wynika z nich (tab. 2), że średnia zawartość CO₂ w gazach spalinowych z tradycyjnych elektrowni wynosi 14%. Przy wykorzystaniu turbin gazowych jest o co najmniej połowę niższa niż w opalanych węglem. Strumień gazów o wysokiej koncentracji dwutlenku węgla, większej niż w przypadku spalania paliw kopalnych w celach energetycznych, powstaje przy gazyfikacji węgla (40%), w gazach odlotowych z pieców hutniczych, przy wypalaniu cementu i w innych.

TABELA 2

Koncentracja CO₂ w gazach spalinowych z elektrowni oraz procesów przemysłowych
(za: Thambimuthu i in. 2002)

TABLE 2

Concentration of CO₂ in combustion gases emitted by individual types of power plants and in the course of various industrial processes (after Thambimuthu and others 2002)

Wyszczególnienie	Koncentracja CO ₂ [% objętości]
Gazy spalinowe z elektrowni:	
— kotły węglowe	14
— kotły gazowe	8
— gaz ziemny w cyklu kombinowanym	4
— spalanie węglowo-tlenowe	>80
Elektrownie z wychwytywaniem CO ₂ przed spalaniem:	
— zgazowanie węgla	40
— częściowe utlenianie gazów odlotowych (gaz ziemny)	24
Gazy z pieców hutniczych:	
— przed spalaniem	20
— po spalaniu	27
Gazy z wypalenia cementu	14—33
Petrochemia i rafinerie	8

Mimura i in. (2002), na przykładzie pierwszego komercyjnego zakładu odzysku CO₂ w Malezji, opisali możliwości wykorzystania strumienia gazów spalinowych do odzyskiwania dwutlenku węgla. Zakład ten pracuje od 1999 roku i wykorzystuje metodę absorpcji przy użyciu amin do separacji CO₂ z produkcji mocznika. Gaz z którego odzyskuje się CO₂ jest mieszaniną następujących składników: 67,7% obj. — azot, 8,08% obj. — CO₂, 0,85% obj. — tlen, 1,00% obj. — argon, 22,28% obj. — woda oraz 2,44 ppm — SO_x i 200 ppm — NO_x. W wyniku separacji otrzymuje się gaz zawierający 99,9% obj. dwutlenku węgla.

W procesie produkcji żelaza i stali największe ilości dwutlenku węgla emitują piece hutnicze w gazie wielkopieczowym, który składa się z mieszaniny tlenku węgla, dwutlenku węgla, azotu. Koncentracja dwutlenku węgla wynosi około 20%, tlenku węgla — 21%, pozostała część to głównie azot. Piec hutniczy produkujący 3 Mt stali emituje około 4 Mt CO₂ rocznie (Gielen 2003).

2.4. Ocena możliwości ograniczenia emisji CO₂ z procesów przemysłowych

Farla i in. (1995) przedstawili ocenę możliwości ograniczenia emisji CO₂ z produkcji nawozów azotowych, żelaza i stali oraz przemysłu petrochemicznego.

W przemyśle nawozów azotowych, przy produkcji 1 tony amoniaku powstaje około 1,2 tony dwutlenku węgla. W Holandii rocznie produkuje się 3,65 Mt amoniaku. Powstaje przy tym 4,2 Mt CO₂, z czego około 0,6 Mt jest zużywane w syntezie mocznika, a 0,6 Mt jest wykorzystywane w przemyśle spożywczym. Pozostała część — około 3 Mt wypuszczane do atmosfery — po poniesieniu dodatkowych kosztów obejmujących: sprężenie gazu, usunięcie wody i schłodzenie, mogłoby być zatłoczone pod ziemię.

Produkcja 5,3 Mt stali surowej w Holandii (dane za 1986 r.) odpowiedzialna była za 8 Mt emisji CO₂. Gazy powstające w tym procesie (gaz koksowniczy, gaz wielkopiecowy i inne) zawierają do 85% węgla, przy zawartości dwutlenku węgla w gazie wielkopiecowym do 20%. Separacja CO₂ z gazu wielkopiecowego, przy użyciu MDEA jako absorbenta, pozwoliłaby otrzymać skoncentrowany strumień gazu możliwy do zatłaczania.

Kolejne źródło emisji CO₂ w Holandii — zakłady petrochemiczne, emitują (procesy technologiczne i spalanie paliw) rocznie 7,3 Mt tego gazu. Ocenia się, że przy wykorzystaniu chemicznej absorpcji (MEA) byłoby możliwe odzyskanie około 90% CO₂ z gazów odłotowych. Dodatkowym małym źródłem emisji CO₂ o wysokiej koncentracji w przemyśle petrochemicznym jest produkcja tlenku etylenu. W rafineriach strumień gazu z wysoką koncentracją CO₂ występuje w zakładach produkcji wodoru i w zakładach gazyfikacji.

Wyniki przeprowadzonej przez Farla i in. (1995) analizy umożliwiły oszacowanie kosztów ograniczenia emisji CO₂ w trzech wymienionych gałęziach przemysłu (tab. 3, rys. 8).

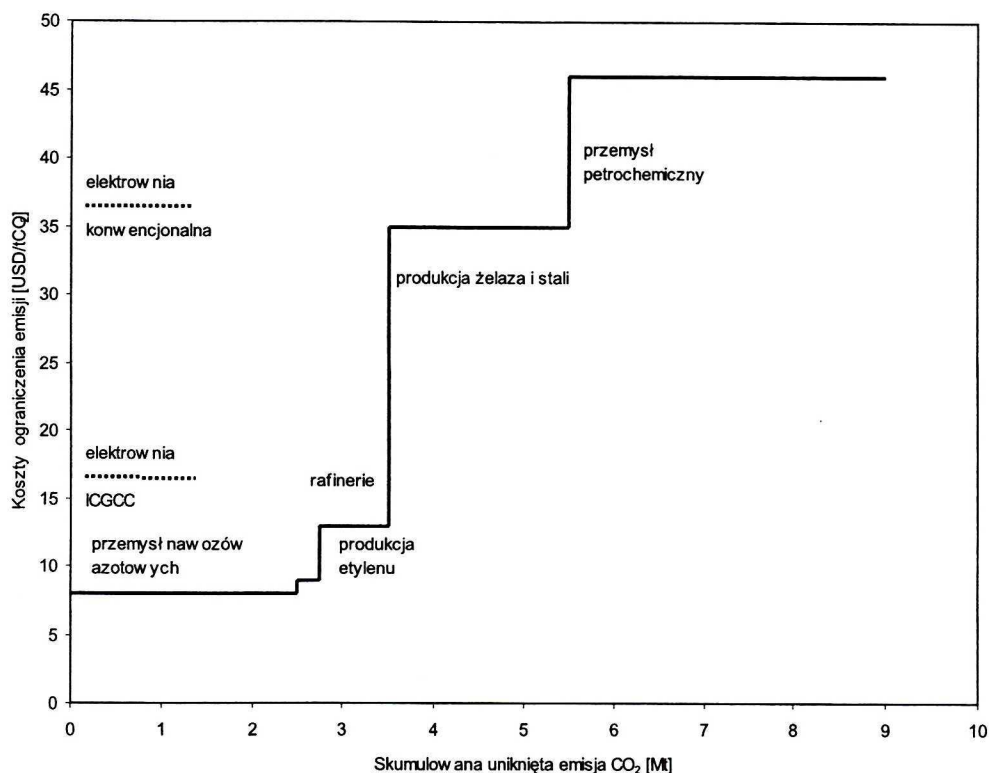
TABELA 3

Oszacowane koszty ograniczenia emisji CO₂ (za: Farla i in. 1995)

TABLE 3

Estimated costs of elimination of CO₂ emissions (after Farl and others 1995)

Wyszczególnienie	Jednostka	Przemysł nawozów azotowych	Przemysł żelaza i stali	Przemysł petrochemiczny
1. Emisja CO ₂	Mt CO ₂ /rok	0,70	2,80	1,80
2. Zużycie energii elektrycznej	GJ/t CO ₂	0,40	0,35	0,50
3. Zużycie pary wodnej	GJ/t CO ₂	0,01	3,40	4,20
4. Koszty inwestycyjne	10 ⁶ USD	10,00	375,00	250,00
5. Całkowite roczne koszty	10 ⁶ USD	5,00	70,00	55,00
6. Wielkość redukcji emisji CO ₂	Mt CO ₂ /rok	0,70	2,00	1,20
Koszty ograniczenia emisji CO₂	USD/t CO₂	8,00	35,00	46,00



Rys. 8. Koszty ograniczenia emisji CO₂ dla wybranych sektorów w przemyśle holenderskim (za: Farla i in. 1995)

Fig. 8. Costs of elimination of CO₂ emissions for selected sectors of industry in the Netherlands (after Farla and others 1995)

Z rysunku 8 wynika, że prawie 20% emisji CO₂ z produkcji przemysłowej mogłoby zostać wyeliminowane przy kosztach od 8 do 46 USD za tonę, w zależności od sektora. W przemyśle energetycznym koszty redukcji emisji CO₂ są najniższe dla elektrowni typu IGCC i wynoszą 14–17 USD za tonę nie wyemitowanego CO₂; w przypadku pozostałych elektrowni: 35–40 USD (Hendriks 1994). Te liczby są porównywalne z kosztami ograniczenia emisji CO₂ w przemyśle żelaza i stali, ale niższe niż szacowany koszt redukcji CO₂ z gazów w przemyśle petrochemicznym. Koszty redukcji emisji CO₂ dla przemysłu nawozów azotowych i produkcji tlenku etylenu są najmniejsze. Koszty oszacowane przez Farla i in. (1995) wskazują, że pozyskiwanie CO₂ z procesów przemysłowych może być konkurencyjne w stosunku do kosztów separacji tego gazu w przypadku elektrowni.

LITERATURA

- European Environment Agency — EEA Data Service — <http://dataservice.eea.eu.int>
- Farla Jacco C.M., Hendriks Ch.A., Blok K., 1995 — Carbon dioxide recovery from industrial processes. *Energy Conversion and Management* 36, s. 827—830.
- Gale J., 2002 — Overview of CO₂ emission sources, potential, transport and geographical distribution of storage possibilities. [W:] IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage..., s. 15—29.
- Gielen D., 2003 — CO₂ removal in the iron and steel industry. *Energy Conversion and Management* 44, s. 1027—1037.
- Hendriks C.H.A., Blok K., 1995 — Underground storage of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management* 36, s. 539—542.
- Hendriks C.A., 1994 — Carbon dioxide removal from coal-fired power plants. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Herzog H., Eliasson B., Kaarstad O., 2000 — Wylapywanie gazów cieplarnianych. *Świat Nauki*, maj 2000, s. 58—65.
- Holloway S., 2002 — Underground sequestration of carbon dioxide — a viable greenhouse gas migration option. [W:] Proceedings of the 5th Int. Symp. On CO₂ Fixation and the Efficient Utilization of Energy (C&E 2002). March 4—6, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, s. 373—380.
- Holloway S., Van der Straaten R., 1995 — The Joule II project the underground disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 36, s. 519—522.
- Holt J., Jensen J.T., Lindeberg E., 1995 — Underground storage of CO₂ in aquifers and oil reservoirs. *Energy Conversion and Management* 36, s. 535—538.
- International Energy Agency (IEA), 2000 — World Energy Outlook. Paryż, IEA/PRESS, s. 444.
- Jean-Baptiste P., Ducroux R., 2003 — Potentiel des méthodes de séparation et stockage du CO₂ dans la lutte contre l'effet de serre. *C.R. Géosciences* 335, s. 611—625.
- Mimura T., Matsumoto K., Iilima M., Mitsuoka S., 2001 — Development and application of fluc gas carbon dioxide recovery technology. [W:] Proceedings of the 5th Intern. Conf. On Greenhouse Control Technologies (GHGT-5) CSIRO Australia, s. 138—139.
- Tarkowski R., 2003 — Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla z energetyki w Polsce. *Polityka Energetyczna* 6, zeszyt specjalny, s. 321—331
- Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2003a — Emisja dwutlenku węgla w Polsce w aspekcie podziemnego magazynowania. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 2, s. 81—102.
- Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2003b — Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla. *Przegląd Geologiczny* 51/5, s. 402—409.
- Thambimuthu K., Davison J., Gupta M., 2002 — CO₂ capture and reuse. [W:] IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage, s. 31—52.
- Torp T.A., Gale J., 2002 — Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: the Sleipner and SACS Projects. [W:] Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Control Technologies. Kyoto International Conference Hall, Japan, October 1st (Tue) — 4th (Fri), 2002.
- Uliasz-Misiak B., 2003 — Instrumenty ekonomiczne stosowane w celu ograniczania emisji CO₂ w Europie i Polsce. *Polityka Energetyczna* 6, zeszyt specjalny, s. 367—375.
- Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., 2003 — Emisja dwutlenku węgla w przemyśle cementowym. *Polityka Energetyczna* 6, zeszyt specjalny, s. 367—375.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) — Greenhouse gas inventory database (GHG) — <http://ghg.unfccc.int/>

WORLD INDUSTRIAL SOURCES OF CO₂ EMISSIONS VERSUS SEQUESTRATION BY UNDERGROUND STORAGE**Key words**

CO₂ emissions, sources of emissions, underground storage, combustion gases, industrial gases

Abstract

The paper presents characteristics of major industrial sectors which are responsible for significant part of total CO₂ emissions in the world. Information on these sectors is given along with that concerning distribution of major stationary sources of emissions, shares of individual sectors of industry in total emission of CO₂ and data on concentration of CO₂ in streams of combustion gases from individual types of power plants and industrial gases. Results of economic evaluations of possibilities of elimination of CO₂ emissions originating in the course of industrial processes are discussed at the example of the Netherlands.

The authors propose to analyse usability of sequestration by the underground storage method for two cases, that is for CO₂ separated from emissions and for streams of pure CO₂ gas. The first case concerns CO₂ emissions from power and power and heat plants and some industrial processes, and the second — emissions from some industrial processes only. It is fairly possible that the first installations of sequestration by underground storage, especially those of the pilot type, will be localized in proximity of centers of emission of stream of pure CO₂ gas.