

Antoni Tajduś\*, Józef Dubiński\*\*, Jan Rogut\*\*

## GÓRNICCTWO WĘGLOWE JAKO SIŁA NAPĘDOWA ROZWOJU ZAAWANSOWANYCH TECHNOLOGII XXI WIEKU

---

### 1. Wprowadzenie

Górnictwo węglowe w związku z rysującymi się ograniczeniami w dostępie do ropy i gazu uzyskuje, szczególnie wyraźną w ostatnich latach, szansę wystąpienia w roli podstawowego dostawcy surowców energetycznych i globalnego gwaranta bezpieczeństwa energetycznego. Należy jednak zauważyć, że w Europie cel ten realizowany będzie przy coraz trudniejszych warunkach prowadzenia eksploatacji, szczególnie w podziemnych kopalniach węgla kamiennego, wynikających z konieczności sięgania do rozproszonych i ulokowanych coraz głębiej pokładów węglowych. Stąd naturalną tendencją rozwoju górnictwa, zarówno węgla kamiennego, jak i brunatnego, będzie przenoszenie coraz większej części procesu górniczego bezpośrednio pod ziemię (*in situ*). Na pilną potrzebę utrzymania, a nawet zwiększenia wydobycia węgla w wielu krajach na świecie, także w Polsce, nakładają się coraz ostrzejsze wymagania środowiskowe i technologiczne wynikające z konieczności przeciwdziałania efektowi cieplarnianemu.

Aby współczesne górnictwo węglowe spełniało swoje zadania, musi stawać się integralną częścią kompleksu energetyczno-chemicznego [1]. Wydaje się, że zeroemisyjna produkcja energii elektrycznej z paliwa węglowego, obejmująca w końcowej fazie technologie podziemnego składowania dwutlenku węgla (tzw. sekwestracji CO<sub>2</sub>) ze względu na skalę problemu i bezpośredni ich związek z geologią, hydrogeologią i technikami wiertniczymi, powinna stać się nową i istotną specjalnością nauk górniczych.

Celem niniejszego referatu jest pokazanie znaczenia roli współczesnego i przyszłego górnictwa węglowego jako siły napędowej rozwoju zaawansowanych technologii. Teza ta jest ilustrowana wybranymi przykładami nowych koncepcji technologii górniczo-energetycznych, o potencjalnie istotnym znaczeniu dla gospodarki Polski i Europy.

---

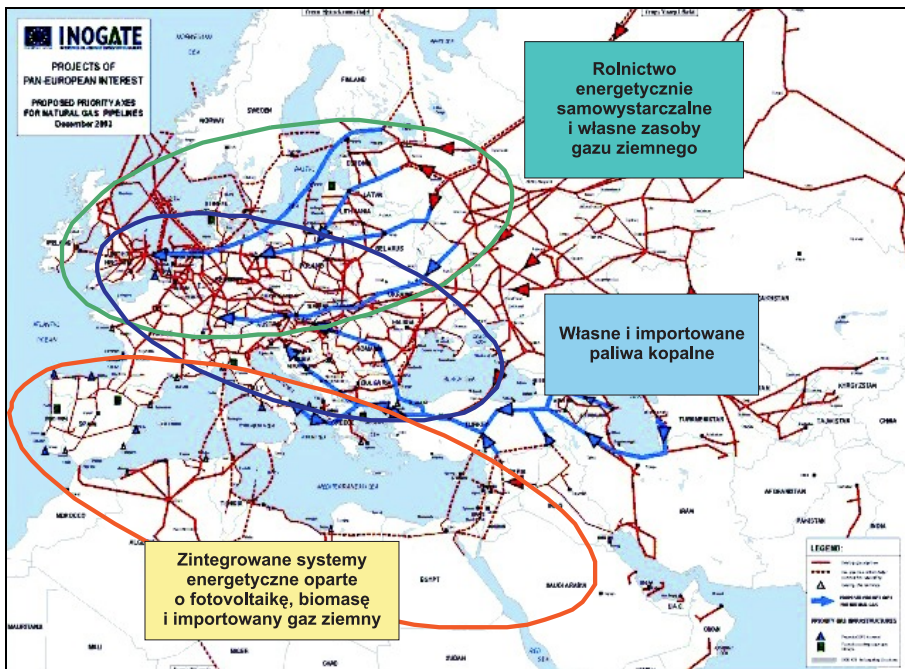
\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Główny Instytut Górnictwa, Katowice

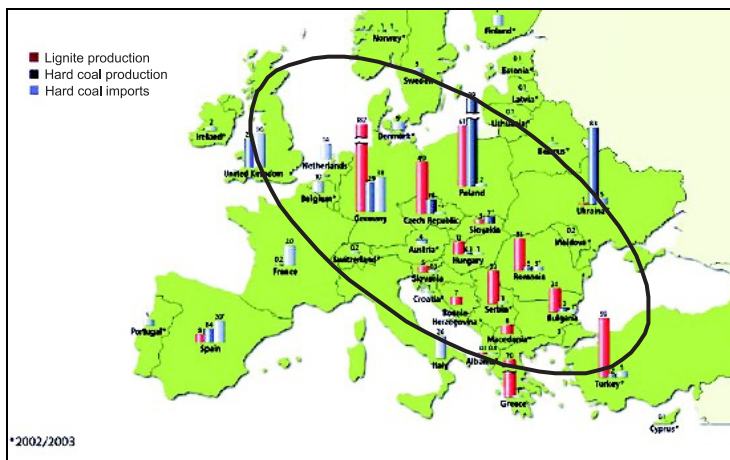
## 2. Specyfika regionów energetycznych Europy

Ocenia się, że w połowie XXI wieku w całkowitym bilansie energetycznym Europy 20% energii pochodzić będzie ze źródeł odnawialnych, 45% z gazu ziemnego i ropy naftowej, natomiast 35% będzie produkowane nadal z węgla brunatnego i kamiennego. Przy poziomie cen ropy przekraczającym 40 dol. za baryłkę (w cenach stałych) wiele z koncepcji czystych technologii węglowych rozwijanych zwłaszcza w pierwszej połowie zeszłego stulecia może ulec odrodzeniu. Oceniając potencjał bazy zasobowej węgla kamiennego i brunatnego w Europie, należy podkreślić, że duża jej część znajduje się na obszarze Polski [3]. Dlatego, potraktowanie polskiego węgla jako bazy surowcowej do produkcji czystej energii, wodoru, substytutu gazu ziemnego i syntetycznych paliw ciekłych oznacza wzmocnienie bezpieczeństwa energetycznego nie tylko naszego kraju, ale również Europy [4].

Przy przewidywaniu przyszłości energetycznej Europy konieczne jest zauważenie, że kontynent ten charakteryzuje się istotnym zróżnicowaniem regionalnym (rys. 1) — zarówno w zakresie dostępności zasobów określonych surowców energetycznych, jak i rozkładem potrzeb energetycznych w czasie. Z kolei obszar zaznaczony na rysunku 2, pokazujący rozkład produkcji węgla w Europie, to rejon, gdzie możemy mówić o dominującej roli węgla zarówno w bezpośrednim wykorzystaniu w energetyce, jak i jako surowca do chemicznego przetwarzania na drodze zgazowania i upłynniania.



Rys. 1. Specyfika europejskich regionów energetycznych



Rys. 2. Produkcja węgla kamiennego i brunatnego oraz importu w Europie

Obecnie Unia Europejska jest w stanie pokryć jedynie połowę swych obecnych potrzeb energetycznych z zasobów własnych, a w przyszłości będzie coraz bardziej uzależniona od importu nośników energii, w tym z regionów o niskiej stabilności politycznej. Należy zatem w sposób obiektywny rozważyć zagadnienie, w jakich warunkach i przy rozwoju jakich technologii, wykorzystujących europejskie zasoby węgla, bezpieczeństwo energetyczne Europy może być mniej zależne od źródeł zewnętrznych. Analizy te w naturalny sposób kierują uwagę na rozwój czystych technologii węglowych oraz ponowne rozważenie rozwoju energetyki jądrowej. W obu wymienionych kierunkach rozwoju czynnikiem integrującym i elementem synergii może być rozwój technologii i gospodarki wodorowej, rozumianej nie tylko jako przemysł wytwarzania wodoru z węgla dla potrzeb transportu, ale także jako pośredniego nośnika i akumulatora energii podnoszącego sprawność systemów energetycznych, w tym istotnych dla realizacji koncepcji zeroemisyjnych elektrowni węglowych.

Polskie górnictwo węglowe ma zatem szansę pełnienia roli nie tylko gwaranta bezpieczeństwa energetycznego naszego kraju i Europy jako producenta węgla, ale także jako współtwórca zaawansowanych, sprawnych i czystych technologii energetycznych [9].

Wyzwanie to wymaga jasnego określenia priorytetów polskiego sektora paliwowo-energetycznego na tle planów rozwojowych energetyki unijnej, w tym szczególnie na obszarze obejmującym rejony Dolnego i Górnego Śląska, Małopolski i środkowej Polski oraz południowo-wschodnie Niemcy, Czechy i Słowację.

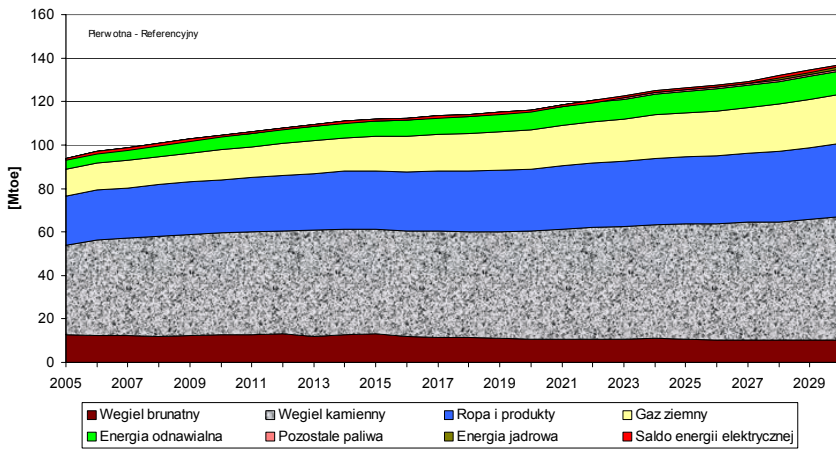
### 3. Prognoza zapotrzebowania na paliwo węglowe w Polsce

Istnieje szereg różnych prognoz zapotrzebowania na paliwo węglowe (węgiel kamienny i brunatny), które są zależne od prognozowanej struktury zużycia energii pierwotnej oraz od warunków rozwoju technologii wytwórczych, zwłaszcza energii elektrycznej. Należy

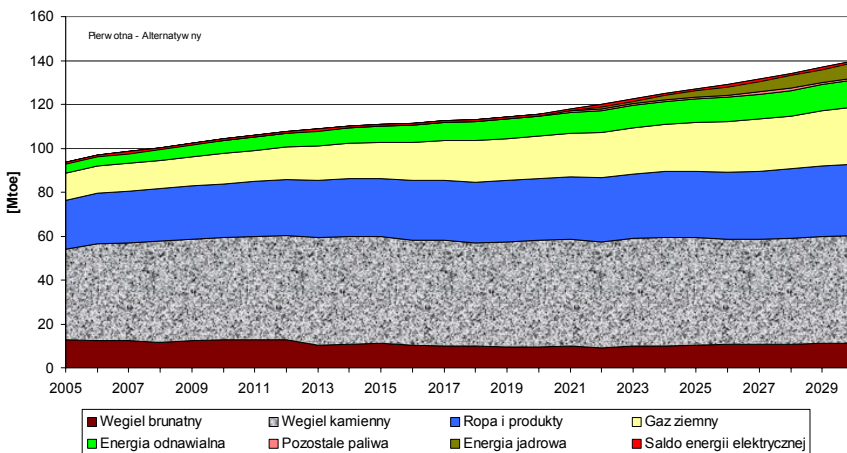
mieć także na względzie fakt, że przyszła struktura energii pierwotnej będzie w coraz większym stopniu zależeć od wymogów ekologicznych, zwłaszcza od poziomu opłat za emisję CO<sub>2</sub>.

Dla zilustrowania przyszłej roli paliwa węglowego przedstawiono na rysunkach 3 i 4 prognozy zużycia poszczególnych nośników energii pierwotnej (w jednostkach ekwiwalentnych ton ropy naftowej — Mtoe) dla dwóch wariantów [10]:

- 1) referencyjnego, który zakłada, że wymagania ekologiczne będą na poziomie obecnie obowiązującym w Unii Europejskiej;
- 2) alternatywnego, który zakłada wyższe wymagania ekologiczne odnoszące się do emisji CO<sub>2</sub>.



Rys. 3. Prognoza zapotrzebowania na energię pierwotną w podziale na nośniki — wariant referencyjny



Rys. 4. Prognoza zapotrzebowania na energię pierwotną w podziale na nośniki — wariant alternatywny

Powyższe prognozy, bez względu na przyjęty wariant, jednoznacznie pokazują istotną i stabilną pozycję paliwa węglowego w horyzoncie czasowym do 2030 roku, zarówno węgla kamiennego, jak i brunatnego. Wydaje się w tym miejscu zasadne pytanie czy polskie kopalnie wydobywające te surowce energetyczne będą w stanie dostarczyć wymagane ich ilości, czy też nasz kraj będzie zmuszony do ich importu? Rodzi się tutaj strategiczny problem polskiej gospodarki paliwowo-energetycznej wymagający prognozy, które kopalnie, w jakiej ilości i po jakich kosztach będą w stanie zaspokoić zapotrzebowanie na węgiel kamienny i brunatny do 2030 roku i w dalszej perspektywie czasowej. Obserwuje się bowiem systematyczne obniżanie potencjału produkcyjnego polskich kopalń, a mając na uwadze fakt, że proces inwestycyjny budowy nowej kopalni to okres co najmniej 10 lat, problem krajowego zabezpieczenia surowcowego w paliwa kopalne staje się problemem kluczowym w kategoriach bezpieczeństwa energetycznego Polski.

#### 4. Potrzeba nowych technologii górniczych i energetycznych

Dotychczasowe, wysoko wydajne technologie górnicze, zarówno odkrywkowe, jak i podziemne, osiągnęły swój stan zbliżony do dojrzałego i nie pozostawiają zbyt wielkiego marginesu niezbędnego dla podniesienia ich sprawności i wydajności. Szczególnie w górnictwie węgla kamiennego zwiększenie skali wydobycia przy malejącej dostępności płytko położonych i grubych pokładów, niezbędnych dla wykorzystania efektów skali rozpowszechnionych technologii ścianowych, staje się coraz bardziej ograniczone. Konieczne staje się opracowanie i wdrożenie nowych i niekonwencjonalnych w swym charakterze technologii górniczych oraz podejmowanie prób integracji klasycznych procesów wydobycia z energetycznym lub chemicznym wykorzystaniem węgla. Można to opisać hasłem „kopalnia węgla XXI w. — zeroemisyjnym producentem energii, paliw i surowców chemicznych” [2].

W tym nurcie jednym z pilnych i przyszłościowych rozwiązań staje się energetyczne lub chemiczne przetwórstwo węgla bezpośrednio w złożu. Technologie górnicze *in situ* nie muszą oznaczać bezpośredniego powrotu do rozwiązań rozwijanych ponad pół wieku temu w ramach procesów zgazowania węgla pod ziemią. Naszym zdaniem rewolucja informatyczna, osiągnięcia inżynierii materiałowej, nowe koncepcje przemian chemicznych węgla oraz sprzężenia górnictwa węglowego z energetyką jądrową i rozwojem gospodarki wodowej otwierają konieczne ku temu możliwości.

Dla pokazania szans rozwojowych górnictwa węglowego wybrano kilka mniej znanych, nowatorskich koncepcji technologicznych wykorzystania węgla, które mogą być siłą napędową rozwoju zaawansowanych technologii, nie tylko górniczych, XXI w.

Są one przedmiotem już prowadzonych prac badawczych lub prac proponowanych do realizacji w ramach krajowych lub międzynarodowych projektów badawczych. Należą do nich między innymi:

- wspomagane adsorpcją beztlenowe zgazowanie węgla do wodoru lub do substytutu gazu ziemnego SNG (projektu ISCC i C2H);

- ukierunkowane na wytwarzanie wodoru z gazowaniem węgla pod ziemią (projekt HUGE);
- recykling dwutlenku węgla w zintegrowanych procesach energetyki węglowej i jądrowej (HTR *coal nuclear synergy*);
- techniki górnicze w technologiach podziemnego składowania dwutlenku węgla.

## 5. Górnictwo jako integrator nauki i technologii

W wybranych przykładach rozwoju górnictwa węglowego mamy do czynienia z koniecznością integracji wielu różnych dziedzin wiedzy i technologii. Kopalnia XXI wieku to przemysłowe, złożone kombinaty surowcowo-chemiczno-energetyczne (Energyplex — kompleksy energochemiczne), a nie tylko zakłady wydobywcze. Kompleksy takie w zależności od warunków geologicznych złóż mogą być zlokalizowane na powierzchni (kopalnie odkrywkowe) lub przeniesione w większości pod ziemię (kopalnie głębinowe). Ich część wydobywcza wykorzystywać będzie zautomatyzowane urządzenia do urabiania i wydobycia węgla sterowane przy wykorzystaniu najnowszych rozwiązań z obszaru technologii informatycznych (naziemne i podziemne systemy wykorzystujące sztuczną inteligencję w kierowaniu postępem frontu wydobywczego). Produkcja stosowanych w procesie wydobywczym narzędzi będzie korzystać z osiągnięć inżynierii materiałowej (materiały specjalne do pracy w wysokich temperaturach i pod wysokimi ciśnieniami) i nanotechnologii (metody do regulacji przenikalności i własności mechanicznych górotworu). Natomiast w przypadku konwersji węgla *in situ* niezbędne jest zaadaptowanie do warunków górniczych narzędzi i technik inżynierii chemicznej i procesowej w ramach rozwoju koncepcji tzw. georeaktorów.

Technologie powyższe mogą być rozwijane jedynie przy pełnej kontroli i minimalizacji wszelkiego typu ryzyka — technicznego, ekonomicznego, ekologicznego i ludzkiego. W miarę schodzenia do coraz głębszych poziomów wydobycia konieczne staje się ograniczanie bezpośredniego udziału ludzi w operacjach wydobywczych. Wymagania te spełnia najbardziej konwersja węgla *in situ*, czyli zamiana węgla jeszcze w złożu w czyste formy nośników energii transportowane bezpośrednio na powierzchnię z pozostawieniem pod ziemią skał towarzyszących i innych nieużytecznych domieszek. Nowe wyzwania w tym zakresie postawiła w ostatnich latach konieczność ograniczania efektu cieplarnianego wymagająca wychwycenia (*capture*) i składowania (*storage*) dwutlenku węgla powstającego w procesach energetycznego wykorzystania węgla. Wymaga to opracowania technologii separacji, transportu i bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub> pod ziemią.

Taka koncepcja górnictwa węglowego XXI wieku będzie wymagać wykształcenia odpowiednich kadr, w tym podjęcia badań i edukacji w wielu obszarach nauki i techniki, nie zawsze kojarzonych bezpośrednio z górnictwem. Poniżej przedstawiono przykładowo najważniejsze z nich:

- Eksploatacja górnicza, zwłaszcza konwersja węgla *in situ* wymagać będzie coraz bardziej precyzyjnego zarządzania podziemnymi zasobami wody i jej przepływami. Z jed-

nej strony bowiem podziemne zgazowanie węgla nie będzie efektywne bez izolacji przestrzeni georeaktora, z drugiej strony produkty zgazowania stanowią istotne zagrożenie dla czystości wód podziemnych. Dla kontroli przenikalności górotworu dla wody i gazów oraz utrzymania integralności i własności mechanicznych przestrzeni podziemnej interesujące może być wykorzystanie osiągnięć nanotechnologii.

- Prowadzenie zgazowania węgla *in situ* wymagać będzie nowych materiałów przeznaczonych do pracy w drastycznych warunkach eksploatacyjnych — temperatury na poziomie 1000°C, wysokiego ciśnienia i silnie korozyjnego środowiska.
- Sztuczna inteligencja to być albo nie być przyszłego wydobywania kopalni. Prowadzenie eksploatacji górniczej, bez wprowadzania załóg górniczych pod ziemię, związane będzie z koniecznością podejmowania decyzji o optymalnych kierunkach wydobywania z poziomu automatu górniczego, a drogami komunikacji frontu wydobywczego z powierzchnią kopalni będzie albo bezprzewodowa transmisja informacji przez górotwór, albo komunikacja przewodowa przez szyby i otwory doprowadzające sprzęt lub reagenty oraz odprowadzające produkt końcowy. W warunkach powyższych wprowadzane pod ziemię narzędzia i automaty górnicze powinny posiadać niezbędną zdolność do autoregeneracji i samonaprawiania.
- Wprowadzenie pod ziemię kosztownych systemów będzie się wiązać z określonym ryzykiem finansowym. Z jednej strony rozwój technologii informatycznych (IT), spadające ceny sprzętu komputerowego i jego miniaturyzacja obniżą odpowiednie bariery inwestycyjne na tyle, że będzie możliwe powszechne wyposażenie narzędzi i urządzeń górniczych w inteligentne czujniki i systemy autokontroli. Będą jednak one musiały być przystosowane do pracy w szczególnie wymagających warunkach.
- Górnictwo węgla brunatnego ze względu na dominujący odkrywkowy charakter w naturalny sposób przystosowane jest do pełnienia wiodącej roli w rozwijaniu i wdrażaniu omawianych nowych technologii górniczych, ponieważ nie stawia na początku drogi tak drastycznych wymagań jak górnictwo podziemne.

## 6. Europejski wymiar nowych technologii górniczo-energetycznych

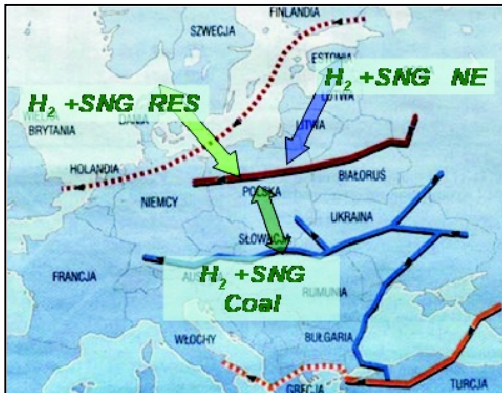
Wśród priorytetów wprowadzonych przez Parlament Europejski do 7 Programu Ramowego Badań i Rozwoju (FP7) znalazło się hasło czystych technologii węglowych, a w tym również idea „Near Zero Emission Power Generation”, czyli wytwarzania energii przy prawie zerowej emisji gazów spalinyowych do atmosfery. Dla przygotowania odpowiednich działań utworzona została pod przywództwem firmy Vattenfall i przy aktywnym udziale Komisji Europejskiej — Europejska Platforma Technologiczna Zeroemisyjnego Wytwarzania Energii z Paliw Kopalnych (ETP ZEP — *European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plant*). Celem działania tej Platformy jest identyfikacja i usunięcie prze-

szkód w budowie wysokosprawnych elektrowni zasilanych paliwami kopalnymi, w tym w szczególności gazem ziemnym, węglem brunatnym i węglem kamiennym. Jako warunek powrotu do węgla, jako istotnego surowca energetycznego i chemicznego, stawiany jest jednak wymóg powiązania technologii wykorzystujących węgiel z radykalnym zmniejszeniem emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Jest prawdopodobne, że w przyszłości wielkość emisji gazów cieplarnianych wyznaczana będzie w odniesieniu do jednostki energii użytecznej (sumy energii elektrycznej i cieplnej) wytwarzanej w układzie. Technologie zeroemisyjne zakładają opracowanie nowoczesnych systemów wydzielania z gazów spalinowych i składowania w głębokich formacjach geologicznych (solanki, skały osadowe i nie nadające się do bezpośredniej eksploatacji głębokie pokłady węgla) dwutlenku węgla. Bardzo trudnym elementem opracowywanych programów jest założenie, że niska emisja gazów powinna być osiągnięta przy jednoczesnym radykalnym podniesieniu wydajności i sprawności wytwarzania energii oraz obniżeniu sumarycznych kosztów jej wytwarzania. Platformę tworzą głównie wielcy europejscy producenci energii i systemów, tacy jak: Vattenfall, Shell, BP, EON, ENEL, Gas de France, RWE, Alstom i Foster-Wheeler. W składzie Komitetu Doradczego (Advisory Council) tej platformy jest także Główny Instytut Górnictwa. Platforma jest formalnie organem otwartym, ale z bezpośrednich obserwacji jej działania wynika, że przekształcana jest powoli w forum do forsowania rozwiązań sprzyjających najsilniejszym państwom i energetycznym grupom przemysłowym Europy.

Ze względu na silną pozycję przemysłu niemieckiego tematyka węglowa w programach działania Platformy koncentruje się na sprawach energetycznego wykorzystania węgla brunatnego. Podstawą do wzmocnienia polskiego udziału w rozwoju europejskiej energetyki i przemysłowej chemii węglowej musi być konkretna oferta własnych — polskich — rozwiązań z obszaru czystych technologii węglowych, energetycznych i chemicznych, w obszarze zainteresowań najsilniejszych grup przemysłowych Europy. Konieczne jest jednak uzupełnienie tych działań o poważne propozycje rozwiązań ukierunkowanych na wykorzystanie węgla kamiennego i brunatnego.

W sytuacji przyjęcia przez Europę scenariusza rozwoju czystych technologii węglowych warto byłoby w Polsce skoncentrować się przede wszystkim na zagadnieniach podziemnego zgazowania węgla do wodoru i substytutu gazu ziemnego (*Synthetic Natural Gas* — SNG), zarówno ze względów ekonomicznych, jak i środowiskowych. Zgłaszane przez duże kompanie paliwowe patenty (Shell, Texaco) i rozwiązania proponowane w europejskich projektach badawczych (HUGE) rozważają stworzenie podziemnych reaktorów zgazowania węgla, w których można byłoby otrzymywać, z pewnością z góry założoną zamiennością wodór, gaz syntezowy i syntetyczny gaz ziemny, które następnie byłyby transportowane na powierzchnię jako jedyne i podstawowe produkty procesu górnictwa. W najbardziej zaawansowanych koncepcjach pod ziemią pozostawiana byłaby większość powstającego w procesie zgazowania dwutlenku węgla. Powiązanie produkcji wodoru i substytutu gazu ziemnego pod ziemią wraz z istniejącą infrastrukturą rurociągów gazowych mogłoby stać się jedną z alternatyw rozwoju europejskiej energetyki. Jej idee przedstawia rysunek 5.





SNG i wodór produkowane poprzez zgazowanie węgla europejskich mogą spowodować zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych oraz stanowić alternatywne źródło metanu. Produkcja ich wzmocni bezpieczeństwo energetyczne Europy

Europejska istniejąca sieć gazociągów mogłaby służyć w przyszłości do transportu wodoru, syntetycznego gazu ziemnego oraz dwutlenku węgla z procesów sekwestracji

**Syntetyczny Gaz Ziemny produkowany ze zgazowania paliw kopalnych szansą na zapewnienie bezpieczeństwa Europejskiemu Systemowi Energetycznemu**

Rys. 5. Synergia pomiędzy energetyką węglową i systemem gazowym Europy

## 7. Wybrane przykłady rozwiązań technologicznych

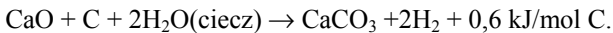
### 7.1. Wspomagane adsorpcją, beztlenowe zgazowanie węgla do wodoru lub do substytutu gazu ziemnego SNG (projekty ISCC i C2H)

Wiele oczekiwań na istotne podniesienie sprawności procesów energetycznego i chemicznego wykorzystania węgla wiązanych jest z procesami jego wstępnego zgazowania do wodoru, gazu syntezowego lub gazów energetycznych (proces IGCC) [5]. W technologiach tego rodzaju surowce zawierające węgiel poddaje się procesowi kontrolowanego utleniania powietrzem lub tlenem w obecności pary wodnej, tak aby uzyskać produkty gazowe bogate w wodór i tlenek węgla. Pośrednie zgazowanie stwarza możliwości usunięcia z produktów zgazowania zawartego w nich dwutlenku węgla. Istnieje szeroki program implementacji technologii IGCC w ramach rozwoju zeroemisyjnych elektrowni węglowych. Ograniczeniem technologii są wysokie koszty procesów wydzielania dwutlenku węgla z produktów zgazowania w przypadku prowadzenia procesu w strumieniu powietrza. W alternatywnych rozwiązaniach, wykorzystujących do zgazowania paliw węglowych czysty tlen i w procesach noszących nazwę oxy-fuels, problemy separacji dwutlenku węgla nie występują, bowiem produktem końcowym procesu jest strumień czystego dwutlenku węgla. Pozostaje jednak problem sprężania tego gazu i przesyłania do miejsca składowania. Ważnym elementem ograniczającym sprawność energetyczną i atrakcyjność ekonomiczną tlenowych procesów IGCC jest konieczność dostarczenia do procesu czystego tlenu.

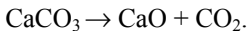
Zasadniczą część przedstawionych ograniczeń można ominąć lub zminimalizować w procesach wykorzystujących cykliczne procesy kalcynacji — karbonizacji (zgazowanie węgla wspomaganie przez adsorpcję) lub cykle chemiczne redox (*chemical looping*). Główny Instytut Górnictwa, Politechnika Wroclawska, KWB i Elektrownia Turów uczestniczyły w realizacji

projektu ISCC (*In Situ Carbon Capture*), koordynowanego przez Uniwersytet w Stuttgarcie. W beztlenowym procesie hydro-zgazowania ISCC wykorzystuje się cykliczną reakcję dwutlenku węgla z tlenkiem wapnia w celu uzyskania wodoru z wody i węgla. Reakcja CO<sub>2</sub> z tlenkiem wapnia usuwa CO<sub>2</sub> z produktów reakcji, przesuując równowagę procesu zgazowania w kierunku otrzymywania czystego wodoru, i dostarcza jednocześnie energii niezbędnej do zbilansowania kosztów energetycznych produkcji wodoru bez spalania węgla.

Cykliczny proces ISCC polega na sprzężeniu ze sobą endotermicznego, wysokotemperaturowego procesu zgazowania węgla do wodoru w reakcji z parą wodną z egzotermicznym procesem karbonizacji tlenku węglowego dwutlenkiem węgla uwalnianym w procesie. Opisuje to reakcja sumaryczna:

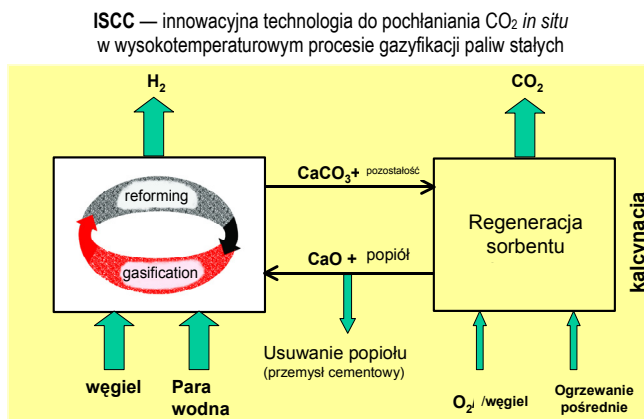


Dla zamknięcia cyklu, konieczna jest regeneracja zużywanego w procesie tlenku wapniowego w endotermicznym procesie kalcynacji (rozkładzie termicznym) wytworzonego na etapie zgazowania węglanu wapniowego:



W procesie ISCC surowcami wprowadzanymi do układu są węgiel i woda (para wodna) oraz tlen zużywany w procesie regeneracji tlenku wapnia krążącego w układzie jako wysokotemperaturowy sorbent dwutlenku węgla, a produktami — wodór i strumień gotowego do sekwestracji dwutlenku węgla. Jako źródło energii dla procesu kalcynacji można wykorzystać ciepło spalania koksiku, pozostającego w powstałym węglanie wapnia na skutek niepełnego przebiegu procesu zgazowania. Proces taki wymaga stosowania czystego tlenu w procesie kalcynacji. Jest to jednak niewielka część tej ilości tlenu, jaka zużywana jest w tlenowych procesach IGCC.

Podstawowy schemat ideowy wspomaganego przez adsorpcję procesu zgazowania węgla do wodoru w wersji ISCC przedstawiono na rysunku 6.



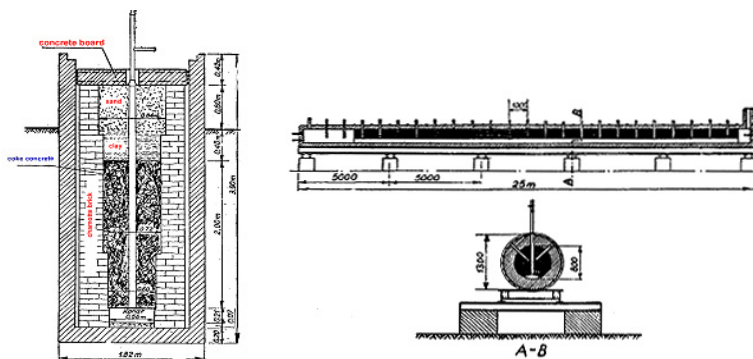
**Rys. 6.** Schemat technologii ISCC wspomaganego przez adopcję procesu zgazowania węgla do wodoru

Przeprowadzone w ramach projektu ISCC eksperymenty pokazały, że obie części cyklu mogą być realizowane w podwójnym układzie wysokotemperaturowego złoża fluidalnego z wewnętrzną cyrkulacją sorbentu między gazyfikatorem a kalcynatorem.

Wykonane dotychczas prace wykazały, że zamknięcie bilansu cieplnego w układzie cyklicznym jest technicznie realne, istnieją natomiast pewne problemy z zachowaniem wysokiej reaktywności CaO w odniesieniu do dwutlenku węgla w kolejnych cyklach zgazowania. Aktualnie prowadzone są prace nad nadaniem sorbentom wapniowym struktury wewnętrznej zapewniającej ich stabilną pracę w cyklach procesowych oraz poszukiwania procedur procesowych, w których zużywany w procesie sorbent podlegałby autoregeneracji, na przykład na drodze pośredniej hydratacji CaO do Ca(OH)<sub>2</sub>.

## 7.2. Ukierunkowane na wytwarzanie wodoru bezpośrednie zgazowanie węgla pod ziemią (projekt HUGE)

W klasycznej wersji procesy podziemnego zgazowania węgla polegają na chemicznej konwersji węgla bezpośrednio w złożu do palnych mieszanin gazowych. Najczęściej prowadzone są one przez wprowadzenie do złoża węglowego mieszaniny powietrza i pary wodnej lub czystego tlenu i pary wodnej. Podziemna gazyfikacja rozpoczyna się silnie egzotermicznym procesem spalania węgla. Reakcja gorącego węgla z dwutlenkiem węgla i parą wodną prowadzi do wytworzenia mieszaniny wodoru, tlenku węgla, dwutlenku węgla i metanu. Produkty zgazowania odprowadzane są na powierzchnię oddzielnym otworem produkcyjnym. Po oczyszczeniu i ewentualnym rozdzieleniu gazy te wykorzystuje się jako surowiec energetyczny lub chemiczny. Podziemne zgazowanie węgla było przedmiotem intensywnych prac badawczych prowadzonych przez Główny Instytut Górnictwa w latach 50. ubiegłego wieku [5]. Układ podziemnego zgazowania węgla testowany przez GIG w tym czasie przedstawiono na rysunku 7. Prace te zatrzymano, gdy na rynku polskim i europejskim pojawił się importowany rosyjski gaz ziemny po konkurencyjnych cenach. Podziemne zgazowanie węgla kontynuowane było jednak na terenie Federacji Rosyjskiej, Ukrainy, w Chinach, Australii i USA.



Rys. 7. Eksperymentalny układ podziemnego zgazowania węgla testowany w GIG w skali laboratoryjnej w latach 1956–1960

Nowa sytuacja na rynku gazu ziemnego i zaostrzające się kwestie bezpieczeństwa energetycznego Europy spowodowały renesans zainteresowania technologiami podziemnego zgazowania pokładów węgla. Skutkiem nowej sytuacji jest zatwierdzenie do realizacji, w ramach Funduszu Badawczego Węgla i Stali, zaproponowanego przez GIG projektu HUGE (*Hydrogen Generation by Direct Underground Coal Gasification*) — wytwarzanie wodoru przez bezpośrednie podziemne zgazowanie węgla). Projekt ma na celu określenie możliwości takiego prowadzenia procesu podziemnego zgazowania węgla, aby głównym produktem przemiany był gaz bogaty w wodór. W projekcie ocenione zostaną możliwości kontroli procesu podziemnego zgazowania przez poprowadzenie go w warunkach dynamicznych, to znaczy zmieniając w czasie w świadomy sposób ciśnienie całkowite gazów i/lub skład reagentów wprowadzanych do złoża. Taki sposób prowadzenia procesu sprowadza się w istocie do prowadzenia pod ziemią, czyli w wypełnionej węglem zamkniętej przestrzeni georeaktora zmienna-temperaturowego i zmienna-ciśnieniowego procesu chemicznego. W badaniach przeanalizowane zostaną ponadto możliwości powiązania procesu zgazowania z wysokotemperaturową adsorpcją chemiczną. Taki proces zmierzałby do przesunięcia równowagi procesu hydrogazyfikacji w kierunku otrzymywania czystego wodoru, zgodnie z zasadami omawianego wcześniej procesu ISCC. Dla praktyki istotna będzie również ocena możliwości powiązania procesu podziemnego zgazowania z procesem składowania CO<sub>2</sub> w otaczających i nie podlegających zgazowaniu pokładach węglowych. W tym przypadku wykorzystane będą doświadczenia uzyskane przy realizacji projektu RECOPOOL.

Wyznaczenie parametrów kinetycznych oraz szybkości transportu ciepła i masy w procesie zgazowania pod ziemią jest trudnym zadaniem, bowiem z oczywistych powodów może to być prowadzone w sposób pośredni, czyli w oparciu o szereg założeń modelowych przyjmowanych *apriori*, definiowanych przy wykorzystaniu wyników eksperymentów prowadzonych poza złożem.

### **7.3. Recykling dwutlenku węgla w zintegrowanych procesach energetyki węglowej i jądrowej (HTR Coal Nuclear Synergy) [6]**

Wysokotemperaturowe reaktory jądrowe (HTR — *High Temperature Reactors*) produkują ciepło w postaci gorącego helu o temperaturze około 900°C. W związku z tym, w odróżnieniu od reaktorów klasycznych produkujących parę wodną o temperaturze 330°C, pozwalają na inne niż tylko produkcja elektryczności wykorzystanie wytwarzanej energii. Rozwój bezpiecznych i wydajnych reaktorów HTR, ukierunkowanych na produkcję energii elektrycznej, jest ograniczony przez konieczność opracowania specjalistycznych turbin pracujących na gorącym helu. Rynek produkcji takich turbin jest ograniczony. Przełomowym zastosowaniem wysoko potencjalnego ciepła wytwarzanego w reaktorach HTR może okazać się jego wykorzystanie do produkcji wodoru i tlenu w wysokotemperaturowym procesie elektrolizy lub termolizy wody. Wytworzony wodór może być wykorzystany w syntezach chemicznych lub transporcie, natomiast tlen w energetyce węglowej, zgodnie z koncepcjami zeroemisyjnej energetyki węglowej. Bardzo interesującą i przyszłościową koncepcję integracji energetyki jądrowej opartej o HTR z rozwojem gospodarki wodorowej z jedno-

czesną produkcją paliw płynnych i/lub substytutu gazu ziemnego przedstawili Pieńkowski i Cetnar [7] jako cel strategiczny Małopolskiego Klastra Czystych Technologii Energetycznych. Koncepcja ta zakłada budowę instalacji przemysłowych, w których większość ciepła siłowni jądrowej wykorzystywana będzie do produkcji wodoru i tlenu, podstawowych surowców niezbędnych do przekształcenia węgla w syntetyczne paliwa ciekłe lub gazowe. Do produkcji paliw wykorzystywany byłby albo bezpośrednio węgiel (zgazowywany tlenem pochodzącym z procesu HTR i parą wodną do gazu syntezowego) albo dwutlenek węgla pochodzący z gazów odlotowych elektrowni węglowej. W obu wariantach technologii mamy do czynienia z istotnym obniżeniem emisji dwutlenku węgla na jednostkę wytwarzanej energii użytecznej (gromadzenie energii cieplnej z procesu jądrowego w formie potencjału chemicznego wytworzonych paliw syntetycznych), w których jednocześnie można tworzyć nową i innowacyjną ścieżkę sekwestracyjną dla CO<sub>2</sub>.

#### **7.4. Techniki górnicze w technologiach podziemnego składowania dwutlenku węgla (projekt RECOPOL) [7]**

Podziemne składowanie dwutlenku węgla kojarzone jest obecnie przede wszystkim z działalnością innowacyjną największych koncernów naftowych. Nawiązuje się w niej do technik prowadzenia głębokich (w tym kierunkowych) wierceń powiązanych z procesami wykorzystania dwutlenku węgla jako czynnika podnoszącego efektywność stopnia ekstrakcji ropy ze złóż (*enhanced oil recovery*). Techniki te rozszerzane są obecnie na otwory przeznaczone do składowania CO<sub>2</sub> w głębokich, solankowych warstwach wodonośnych. Techniki wydobywania ropy i gazu mogą być tutaj rozszerzone o doświadczenia z wybranych dziedzin górnictwa węglowego. Przykładem takiego podejścia mogą być wyniki projektu RECOPOL, w ramach którego prowadzone były eksperymenty nad składowaniem CO<sub>2</sub> w nasyconych metanem, nieekonomicznych dla klasycznej eksploatacji górniczej głębokich pokładach węglowych [8]. W tej powiązanej bezpośrednio z górnictwem węglowym technice dwutlenek węgla wprowadzany jest pod ciśnieniem do pokładu węglowego i jest wiązany według mechanizmu sorpcji fizycznej przez powierzchnię węgla z którą się kontaktuje. Ze względu na większe, w porównaniu z metanem, powinowactwo sorpcji CO<sub>2</sub> do powierzchni węgla, następuje wypieranie przez CO<sub>2</sub> zawartego w złożu węglowym metanu. Gaz ten może być odbierany i wykorzystywany gospodarczo. Koncepcja technologiczna RECOPOL po jej dopracowaniu może zatem nie tylko pokazać nową ścieżkę dla składowania dwutlenku węgla w pokładach węglowych, ale także powiązać tą technikę z odzyskiem i utylizacją metanu ze złóż węglowych (*coal bed methane recovery*).

## **8. Podsumowanie i wnioski**

Przedstawione kierunki prac rozwojowych i technologicznych pozwalają na przedstawienie przykładowej listy prac badawczych istotnych dla rozwoju górnictwa węglowego w XXI wieku.

Należą do nich:

- Opracowanie i eksperymentalna weryfikacja koncepcji naziemnych i podziemnych georeaktorów, czyli izolowanych przestrzeni w których prowadzona byłaby konwersja węgla do czystych surowców energetycznych i chemicznych.
- Opracowanie programów i technik górniczych do bezpośredniego zastosowania w technologiach wychwytywania i składowania dwutlenku węgla pochodzącego z energetycznego i chemicznego wykorzystania węgla.
- Pogłębienie wiedzy i opracowanie nowych narzędzi do modelowania i kontroli zjawisk transportu energii i masy w górotworze z wykorzystaniem rozwiązań pochodzących z inżynierii chemicznej i procesowej, inżynierii materiałowej i nanotechnologii.
- Przygotowanie bazy programowej i sprzętowej do realizacji górnictwa rozproszonego wykorzystującego osiągnięcia rewolucji informatycznej, pozwalającego na eksploatację zasobów nie nadających się do wydobycia obecnymi metodami górnictwymi.
- Wykorzystanie istniejących i rozwój nowych kierunków rozwojowych nauki i praktyki górniczej jako elementów składowych rozwoju zeroemisyjnych elektrowni węglowych.
- Określenie roli i możliwości rozwoju górnictwa przez wykorzystanie synergii z energią jądrową i postępowaniem gospodarki wodorowej.

#### LITERATURA

- [1] *Dubiński J., Tajduś A.*: Nowe spojrzenie na węgiel. Część I. Energetyka Ciepła i Zawodowa, nr 3, 2006, 25–29. Część II. Energetyka Ciepła i Zawodowa nr 4, 2006, 17–20
- [2] *Dubiński J., Rogut J., Czaplicka K., Tokarz A.*: Coal Mine of 21<sup>st</sup> Century: In-situ producer of energy, fuels and chemicals. International Mining Forum “New Technological Solutions in Underground Mining. Ed. Taylor & Francis Group. London, 1–13
- [3] *Dubiński J., Tajduś A.*: Rola paliwa węglowego jako źródła energii pierwotnej. Przegląd Górniczy, nr 2. Katowice 2007, 9–16
- [4] *Dubiński J., Czaplicka K., Stańczyk K., Świądrowski J.*: Production of liquid and gaseous fuels from coal — chance and perspectives. International Mining Forum “Technical, Technological and Economic Aspects of Thin-Seams Coal Mining”. ed. Taylor & Francis Group. London, 2007, 155–162
- [5] Informacja o technologii ZECA „Beztlenowe zgazowanie węgla do wodoru wspomaganie adsorpcją”. ([http://www.inmat.pw.edu.pl/zaklady/zim/Technologia\\_ZECA](http://www.inmat.pw.edu.pl/zaklady/zim/Technologia_ZECA))
- [6] Informacja o projekcie RECOPOL (<http://recopol.nitg.tno.nl>)
- [7] Informacja o założeniach projektu Wysokotemperaturowy Reaktor Jądrowy w Polsce (<http://slcj.uw.edu.pl/http>)
- [8] *Krzystolik P., Skiba J., Jura B.*: Monitoring of the parameters during sequestration of CO<sub>2</sub> to the coal seams in the RECOPOL project (Upper Silesian Coal Basin, Poland)”. Proc. of the 21<sup>st</sup> World Mining Congress (ICAMC session). Teheran 2005, 955–962
- [9] *Ściążko M., Pawłaszek G.*: Koncepcja produkcji paliw płynnych na bazie węgla Kompanii Węglowej SA. Szkoła Eksploatacji Podziemnej. Sympozja i Konferencje, nr 69, Kraków 2007, 9–20
- [10] Scenariusze Rozwoju Sektora Energetycznego. Opracowanie Agencji Rynku Energii SA. Warszawa, luty 2007