

Stanisław F. ŚCIESZKA  
Andrzej S. ŚLĄCZKA  
Politechnika Śląska, Gliwice

## SZANSA DLA WĘGLA

**Streszczenie.** Węgiel jest zdecydowanie najbardziej obficie występującym paliwem kopalnym, a przez to ważnym źródłem energii. Podczas gdy zasoby gazu ziemnego i ropy naftowej szacuje się na około 50 lat, zakładając optymistycznie ich zużycie na obecnym poziomie, to zasoby węgla ocenia się na co najmniej 300 lat. Węgiel ma szansę stać się ponownie atrakcyjnym paliwem już za około 20 lat, jednakże pod jednym warunkiem, że będzie oczyszczony i spalony ze znacznie większą sprawnością energetyczną. Doskonale czyste systemy spalania węgla i generowanie energii elektrycznej są jeszcze dość odległe, ale podstawy teoretyczne i koncepcje technologiczne, które można by obecnie wdrażać na szerszą skalę, już istnieją. Artykuł prezentuje główne i najnowsze trendy w energetyce węglowej i innych formach zastosowania węgla.

## THE CHANCE FOR COAL

**Summary.** Coal is the world's most abundant fossil fuel by far. While accessible stocks for gas and oil will last 50 years or so at the rates we now exploit them, there is enough coal available for three centuries at least. Coal could be the world's most attractive fuel in about 20 years' time – clean and efficient to use, and in plentiful supply. The perfectly clean coal – fired generator may lie far in the future, but technologies that would be excellent stopgaps already exist.

## 1. Wprowadzenie

Węgiel jest jednym z najważniejszych źródeł energii na naszej planecie. Głównie wykorzystywany jest w procesach spalania, gazyfikacji, niskotemperaturowej karbonizacji, kokosowania, łagodnego utleniania i uwodornienia. Jest on niewygodnym na wszystkich etapach jego pozyskiwania, spalania i przerobu oraz uciążliwym dla środowiska naturalnego nośnikiem energii. Wydobywanie węgla metodami odkrywkowymi oznacza długotrwałe zakłócenia krajobrazowe i ekologiczne, natomiast technologie podziemnej eksploatacji charakteryzuje między innymi wysoka energochłonność i względnie niska niezawodność bezpieczeństwa. Należy więc dążyć do ograniczenia jego wydobycia (co aktualnie ma miejsce), a polepszyć sprawność jego spalania i przerobu. Tradycyjny, pochodzący jeszcze z XIX wieku, sposób uzyskiwania energii z węgla polega na jego spalaniu. W rezultacie tego procesu, którego sprawność w elektrowniach wynosi około 30%, tworzone są, a następnie emitowane do atmosfery takie produkty reakcji spalania, jak: dwutlenek siarki, tlenki azotu, tlenek węgla, aromatyczne węglowodory aromatyczne oraz główny winowajca efektu cieplarnianego dwutlenek węgla.

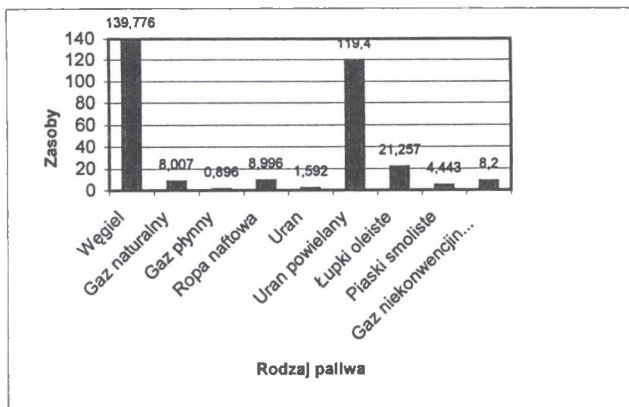
Konsekwencje tych faktów są niezwykle istotne i wymagają podjęcia wielokierunkowych badań w celu stworzenia krótszej, bardziej sprawnej energetycznie i czystszej dla otoczenia drogi od wydobywanego węgla surowego do indywidualnego lub przemysłowego odbiorcy energii elektrycznej. Ale dlaczego przypisuje się temu problemowi takie znaczenie? Przecież można przestawić energetykę na inne nośniki energii, jak ropa naftowa lub gaz. Tak, ale jak wykazują badania geologiczne, za około 30 do 50 lat tylko węgiel pozostanie (w skali Globu) w ilości wystarczającej na następne około 300 lat. Problem ten dostrzeżono już w przemyśle motoryzacyjnym kierując znaczne środki na badania np. ogni wodorowych, napędu elektrycznego oraz w przemyśle lotniczym prowadząc doświadczenia np. z odrzutowymi i raketowymi paliwami syntetycznymi.

Należy mieć także na uwadze, że wzrasta populacja na Ziemi i że rozwój ekonomiczny wzmaga apetyty narodów na konsumpcję energii. Pomimo że przewidywania wielkości populacji w przyszłości nie są zbyt pewne, badania przeprowadzone przez ONZ i inne organizacje przewidują podwojenie populacji na Ziemi do 2060 roku i to, że około 90 procent wzrostu światowej populacji przypadnie na kraje słabo rozwinięte.

Równoległe z przewidywanym wzrostem populacji będzie zwiększone zapotrzebowanie na energię albowiem kraje słabo rozwinięte będą dążyć do poprawy swoich warunków życia.

Elektryfikacja jest nieodzowna do wzrostu prosperity i przyczynia się do rozwoju przemysłowego. Przewiduje się, że światowe zapotrzebowanie na energię elektryczną do 2060 roku wzrośnie pomiędzy dwa a siedem razy tej ilości, jaka była w 1986 roku, w zależności od tego czy zapotrzebowanie na energię w przeliczeniu na głowę utrzyma się na obecnym poziomie, czy będzie wzrastało do roku 2060 z szybkością taką jak obecnie.

W światowych zasobach surowców energetycznych zasoby węgla wielokrotnie przewyższają zasoby pozostałych paliw, co widać z danych przedstawionych na rysunku 1.



Rys.1. Światowe zasoby nieodnawialnych surowców energetycznych [37]

Fig.1. The world fossil fuels resources [37]

Stanowi on około 90% wszystkich konwencjonalnych rezerw paliwowych. Jest on także dominujący w zasobach USA, Chin i Rosji. Przewidywania Światowej Komisji Energii dotyczące światowego rozwoju zużycia energii wskazują co następuje:

- ❖ szczytowe zużycie ropy osiągnie się w 2000 roku, a następnie będzie ono trwale malało,
- ❖ trwały wzrost energetyki atomowej do 2000 roku, po czym będzie regularnie maleć,
- ❖ stały wzrost zużycia gazu ziemnego, który zacznie się wyrównywać w połowie stulecia,
- ❖ gwałtowny wzrost zużycia węgla, które w 2060 roku będzie trzykrotnie większe niż obecnie i jego konsumpcja do 2060 roku przewyższy zużycie gazu dwukrotnie, a ropy naftowej trzykrotnie.

Końcowe wnioski, jakie wynikają z przewidywań wzrostu ludności na Ziemi odnośnie do dostępności źródeł energii oraz potrzeby rozwoju ekonomicznego i społecznego poprzez wzrost elektryfikacji, są następujące:

1. Świat powinien być przygotowany na przynajmniej podwojenie, a nawet potrojenie konsumpcji węgla do połowy XXI wieku.
2. Globalne zapotrzebowanie na energię elektryczną może przewyższyć do 2060 roku dwu- do siedmiokrotnie obecny poziom zużycia.
3. Problemy ochrony środowiska są nierozdzielnie związane z rozwojem ekonomicznym i energetycznym.

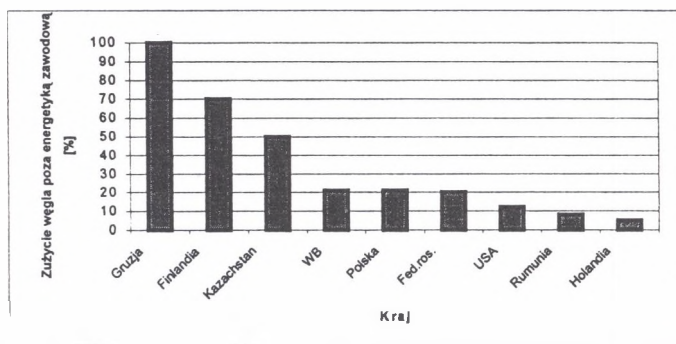
Wyzwanie wynikające z przedstawionej wizji przyszłości polega na określeniu stymulacji zużycia węgla dla produkcji taniej energii przy równoczesnej ochronie środowiska naturalnego. Wymagania te mogą być w prosty sposób przełożone na potrzebę maksymalizacji sprawności termodynamicznej i ekonomicznej w światowym wykorzystaniu węgla.

Uważa się także, że węgiel jest jedynym paliwem, które jest w stanie zapewnić wystarczającą ilość energii elektrycznej dla szybko rozwijających się gospodarek regionu Pacyfiku, jak np. Chin i Korei. Chyba że podejmą one ryzyko i wysiłek rozwoju nowoczesnej energetyki jądrowej.

Węgiel będzie zatem w przyszłości głównym źródłem energii w skali globu. Zasoby energii nuklearnej są także wysokie, ale ze względu na kłopoty związane z deponowaniem odpadów i potencjalne zagrożenie, obecnie odstępuje się od budowania nowych siłowni nuklearnych.

Poza energetyką zawodową, która zużywa największą ilość węgla, używany on jest również w innych gałęziach gospodarki i przemysłu, a mianowicie: w transporcie, do opalania pieców przemysłowych, pieców cementowych, wytwarzania ciepła technologicznego, produkcji koksu, ogrzewania budynków miejskich i osiedlowych, ogrzewania szklarni i mieszkań indywidualnych.

Na rysunku 2 przedstawiono procentowy udział konsumpcji węgla nie związanej z energetyką zawodową.



Rys.2. Zużycie węgla dla celów nie związanych z energetyką zawodową [37]

Fig.2. Coal consumption outside power industry [37]

## 2. Wyższa sprawność energetyczna i ochrona środowiska

Jak widać, w krajach wysoko rozwiniętych węgiel używany jest głównie przez energetykę zawodową do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystywanej następnie jako energia "czysta". Produkcja prądu przez wielkie elektrownie posiada znacznie większą sprawność aniżeli produkcja energii w innych gałęziach gospodarki. Podwyższenie sprawności wykorzystania energii zawartej w paliwie jest podstawowym celem i koniecznością współczesnej wielkiej energetyki. Prowadzone są bardzo intensywnie badania związane z opracowaniem nowych technologii spalania węgla oraz konstrukcji nowych palenisk i kotłów.

"Czyste albo zamknięte" - jest to hasło obowiązujące dla elektrowni opalanych węglem na terenie większości państw Unii Europejskiej. Czyste technologie spalania węgla umożliwiły drastyczne ograniczenie emisji dwutlenku siarki oraz  $\text{NO}_x$ . Do najważniejszych elementów tych technologii należą: spalanie fluidyzacyjne oraz zintegrowana gazyfikacja w łączonych cyklach (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC). Technologia IGCC została opracowana i zastosowana między innymi przez Texaco (rys.3). Składa się ona z systemu zgazowania węgla i odsiarczania uzyskanego gazu oraz połączonych cykli spalania w turbinach gazowych, rekuperacji ciepła oraz wytwornicy pary sprężonych z turbinami parowymi.

Pośród technologii spalania węgla i związanych z nimi konstrukcji kotłów można wymienić [1-20, 37-42] obecnie najpopularniejsze posiadające sprawność energetyczną około 36%:

PCF – Pulverized Coal Firing

USC – Ultra Super Critical

oraz wprowadzane i przyszłościowe o znacznie wyższej sprawności:

FBC – Fluidized Bed Combustion - sprawność około 36%

CFBC – Circulating FBC

BFBC – Bubbling FBC

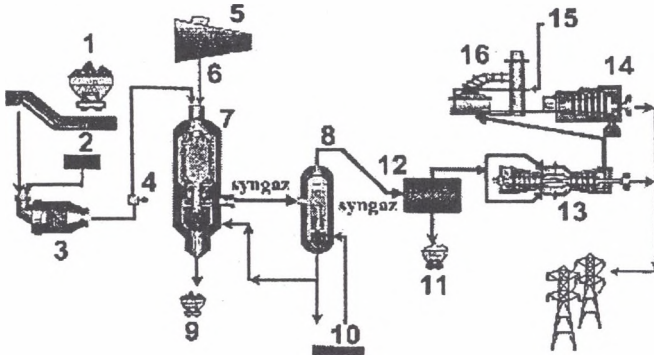
IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle - sprawność około 43%

ATFT-IGCC –Advanced Fuel Technology IGCC

IDGCC – Integrated Druing Gasification Combined Cycle

APFBC – Advanced Pressurized Fluidized Bed Combustion + synteza związków chemicznych poza szczytem - sprawność około 50%

i najbardziej przyszłościowa technologia generatorów magnetohydrodynamicznych (MHD) posiadających sprawność około 60%.



Rys.3. Układ generowania energii elektrycznej typu IGCC, gdzie [41]:

1-węgiel, 2-woda, 3-młyn węglowy, 4-pompa szlamowa, 5-separator powietrza, 6-tlen, 7-gazyfikator, 8-płuczka wieżowa, 9-żużel, 10-zbiornik wodny, 11-siarka, 12-oddzielenie siarki, 13-turbina gazowa, 14-turbina parowa, 15-woda zasilająca kocioł, 16-rekuperacja ciepła i wytwornica pary

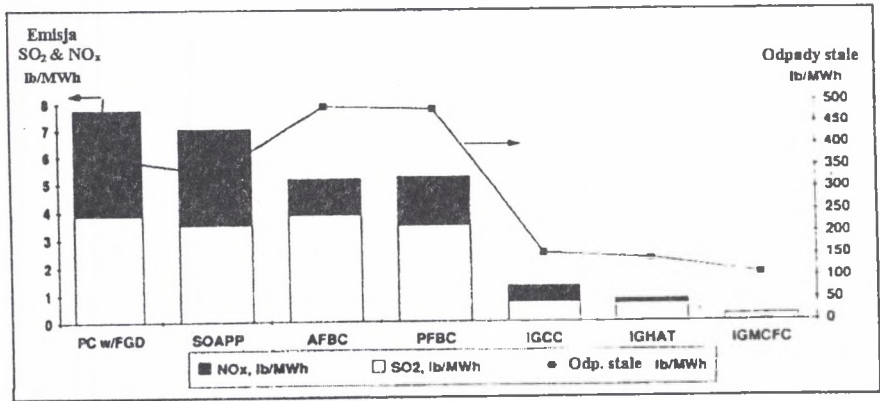
Fig.3. Integrated gasification combined cycle (IGCC) system, where [41]:

1-coal, 2-water, 3-grinding, 4-slurr pump, 5-air separation, 6-oxygen, 7-gasifier, 8-rubber, 9-slag, 10-water handling, 11-sulphur, 12-sulphur removal, 13-gas turbine, 14-steam turbine, 15-boiler feed water, 16-heat recovery steam generator

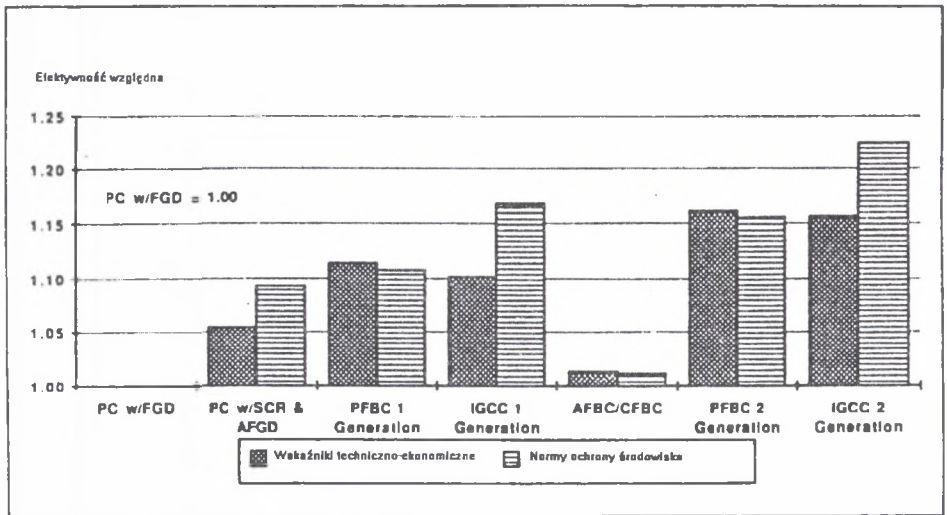
Nowoczesne technologie spalania węgla stosowane w energetyce oprócz wyższej sprawności energetycznej znacznie zmniejszają emisję szkodliwych gazów do atmosfery, jak również ilość odpadów stałych. Związane jest to między innymi z optymalnymi warunkami spalania, jak i ze stopniem oczyszczenia węgla wymaganym przez te technologie. Rysunek 4 przedstawia ilość emitowanych gazów i ilość odpadów stałych powstających w elektrowniach stosujących różne technologie spalania węgla.

Ostatnie badania amerykańskie wykonane przez American Electric Power [2] dostarczyły ciekawej metody oceny efektywności technologii opartych na węglu. Ocena zawiera udział technicznych parametrów, takich jak sprawność, dostępność oraz współczynniki emisji i ekonomii. Rys. 5 przedstawia względną efektywność każdej z badanych technologii wyliczonej w oparciu o te parametry.





Rys.4. Emisja gazów i ilość odpadów stałych powstających w różnych instalacjach spalania węgla [37]  
 Fig.4. Gas emission and amount of slag for different power system [37]



Rys.5. Względna efektywność technologii spalania węgla [37]  
 Fig.5. Relative efficiency of different power systems [37]

Najnowsze trendy wskazują, że w XXI wieku nastąpi powrót do węgla jako ważnego, a z biegiem czasu (w połowie XXI wieku) podstawowego źródła energii. Przewiduje się jednak równocześnie rewolucyjne zmiany w systemach generowania energii elektrycznej z tego pa-

liwa. Przetworzony węgiel będzie w elektrowniach XXI wieku spalany w postaci tzw. syngazu w turbinach gazowych (rys. 3), a w następnej generacji elektrowni gorące zjonizowane gazy będą bezpośrednio produkować elektryczność przepływając przez silne pola magnetyczne generowane przez nadprzewodnikowe magnesy (technologia MHD). Wspomniane technologie charakteryzuje wyższa sprawność energetyczna oraz niższa emisja zanieczyszczeń [39-42]. Choć zostały one opracowane teoretycznie wiele lat temu nie doczekały się do tej pory zastosowań wielkoprzemysłowych, ponieważ taniej jest wybudować elektrownię na gaz wykorzystując jego aktualnie dużą podaż.

Spodziewa się, że generatory magnetohydrodynamiczne (MHD) w połączeniu z cyklem turbiny gazowej oraz cyklem pary wodnej osiągają sprawność rzędu 60%. System MHD usuwa także jeden z głównych składników wywołujących zanieczyszczenie środowiska, jakim jest siarka pochodząca z węgla. Mianowicie, do jonizacji gazów spalinowych stosuje się węglan potasu, który reaguje z siarką pochodzącą z węgla i tworzy siarczan potasu, który z kolei jest łatwy do wyodrębnienia i recyklingu. Generatory MHD są jednakże źródłem zwiększonej ilości  $\text{NO}_x$ .

MHD jest bardzo atrakcyjną teoretycznie ideą, która sprawdza się także w małych instalacjach pilotujących (np. 1,5 MW generator MHD w Butte, Montana, USA). Zbudowanie wielkiej elektrowni w oparciu o tę technologię wymaga jednak ogromnych nakładów i pokonania szeregu problemów technicznych. Jednymi z nich są problemy towarzyszące przepływowi z prędkością naddźwiękową gazów spalinowych (ogrzanych do temperatury  $2700^\circ\text{C}$  i charakteryzujących się wysoką erozyjnością i korozyjnością) wzdłuż kanałów usytuowanych kilka centymetrów od nadprzewodnikowych magnesów pracujących w temperaturze kilku stopni Kelvina. Do tej pory nie rozwiązano także w sposób zadowalający metody usuwania z węgla składników tworzących popiół lotny, który jest głównym winowajcą intensywnego zużycia elementów turbin gazowych.

Istnieje także odmienna technologia konwersji energii zawartej w węglu na elektryczność bez stosowania skomplikowanych układów mechanicznych (np. generatorów MHD). Jest to technika oparta na koncepcji ogniwa paliwowego. Ogniwo paliwowe zużywa wodór jako paliwo i poprzez proces utleniania wywołuje kierunkowy ruch elektronów między elektrodami, generuje ciepło oraz wydziela wodę i dwutlenek węgla. Nowsze generacje ogniwa paliwowych z elektrodami z tlenku cyrkonowego i tlenku itrowego mają temperaturę pracy ponad  $1000^\circ\text{C}$  i mogą być napędzane produktami zgazowania węgla. Gorące produkty spalania z takiego ogniwa, głównie dwutlenek węgla i para wodna, mogą napędzać turbiny produkując dodatko-



wo w drugim obiegu elektryczność podnosząc ogólną sprawność energetyczną takich układów do ponad 60%.

Komercyjny sukces ogniw paliwowych np. w transporcie niekoniecznie oznaczać będzie natychmiastowy wzrost zapotrzebowania na węgiel. Większość doskonalonych obecnie konstrukcji ogniw jest zasilana gazem ziemnym, a nie gazem pochodzącym z węgla.

Jednakże wraz z wyczerpywaniem się zasobów gazu ziemnego w pierwszej połowie XXI wieku oraz wraz ze wzrostem ceny na to paliwo następować będzie stopniowe zwiększanie zapotrzebowania na gaz otrzymywany z węgla. Zasilanie ogniw paliwowych gazem węglowym oznacza nie tylko bardziej sprawne energetycznie użytkowanie węgla, ale także redukcję dużej części emisji dwutlenku węgla i tlenku azotu, szczególnie w porównaniu do spalania węgla w konwencjonalnych elektrowniach węglowych.

### 3. Energia elektryczna plus chemikalia

W przyszłości przechodzić się będzie na gazyfikację węgla w celu produkcji energii elektrycznej, co będzie dużym krokiem w kierunku zwiększenia efektywności i czystości procesu. Jest to jednakże dopiero pierwszy krok na drodze w kierunku bardziej efektywnej przeróbki węgla.

Należy zaznaczyć, że gazyfikacja różni się od wszystkich innych technologii zamiany węgla na energię elektryczną. Wszystkie inne technologie produkcji energii elektrycznej oparte na węglu polegają na bezpośrednim jego spalaniu i zamianie węgla na energię cieplną. Gazyfikacja przy użyciu tlenu natomiast zamienia węgiel na pośredni produkt gazowy zwany syngazem (mieszanina CO i H<sub>2</sub>), który może być albo zamieniony na energię cieplną przez spalanie albo wykorzystany do syntezy chemicznej w celu otrzymania niezwykle cennych substancji organicznych lub paliw według opracowanych pilotowych technologii. Wielokierunkowość możliwości w przypadku gazyfikacji węgla daje właścicielom "zgazowni" unikalne możliwości rozwoju ich działalności.

Produkcja chemikaliów z węgla posiada bogatą historię. W czasie drugiej wojny światowej węgiel był zgazyfikowany, a syngas przerabiany na paliwo lotnicze metodą Fischera-Tropscha. Zdolności produkcyjne niemieckich fabryk osiągnęły poziom ok. 675 tys. ton rocznie w 1944 roku. Następne znaczące zastosowanie syngazu z węgla do produkcji chemi-

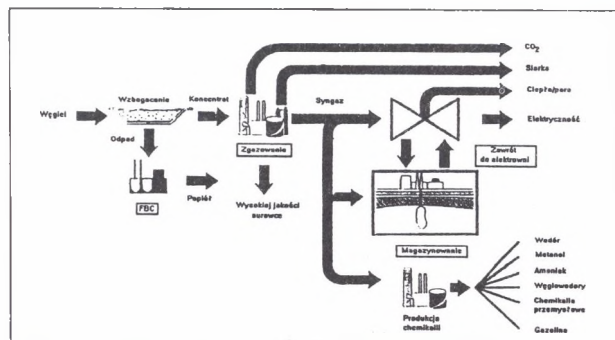
kaliów było w latach 50. i wczesnych 80, gdy zbudowano w Południowej Afryce trzy instalacje SASOL. Kompleks SASOL II i III gazyfikował rocznie około 20 mln ton węgla produkując mnóstwo ciekłych produktów od benzyny premium, paliw do silników odrzutowych poprzez olej dieslowy i olej opałowy, fenole, amoniak, etylen i mnóstwo chemikaliów dla przemysłu.

Dlaczego przemysł produkcji elektryczności rozważa produkcję chemikaliów w elektrowni? Oto dwa najważniejsze powody:

- \* Elektryczność jest produktem, który wytwarzany jest w zależności od zapotrzebowania i obecnie nie ma sposobu na jego magazynowanie w dużych ilościach w sposób ekonomicznie opłacalny. Z tego powodu duże siłownie poza okresami szczytowymi muszą ograniczać produkcję, a nawet zaprzestać jej w okresach małego zużycia energii. Stąd nawet nominalnie obciążone siłownie pracują ze średnim rocznym obciążeniem około 60 do 70%. W przypadku drogiego systemu IGCC współczynnik efektywności mógłby być znacznie podwyższony, albowiem produkowany syngas może być wykorzystany do produkcji cennych chemikaliów w czasie, gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną spada.
- \* Produkcja elektryczności i chemikaliów łączy dwa główne przemysły i stwarza możliwości współpracy.

## Zintegrowane fabryki energii

Logicznym rozszerzeniem koncepcji koprodukcji elektryczności i chemikaliów jest rozwój zintegrowanych siłowni. Taka fabryka byłaby zdolna do przemiany węgla w mnóstwo nośników energii jak elektryczność, chemikalia, paliwa dla transportu i ciepło (para lub gorąca woda). Schemat ideowy takiej zintegrowanej elektrowni z fabryką chemiczną przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Schemat ideowy zintegrowanej siłowni z fabryką chemikaliów [37]

Fig.6. Schematic diagram of power plant and chemicals manufacturer [37]

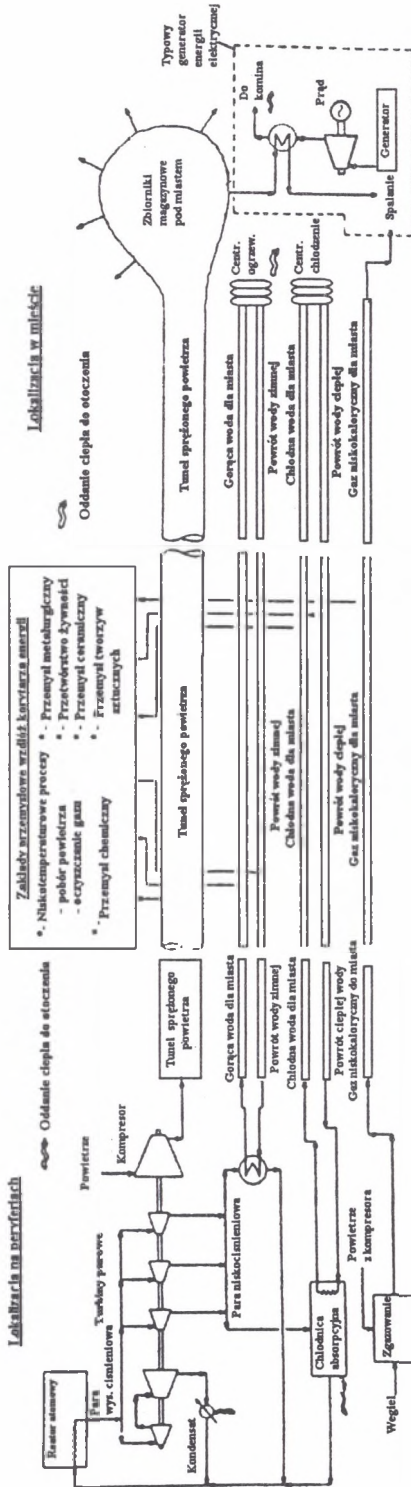
Głównymi korzyściami wynikającymi ze zintegrowania fabryk energii i chemikaliów są:

- Zwiększenie efektywności konwersji węgla na produkty użyteczne z obecnego poziomu ok. 34% do ok. 90%.
- Możliwość wyzwolenia narodów z niezdrowej i kosztownej zależności od importu ropy.
- Znaczne zmniejszenie skażenia środowiska poprzez:
  - a) zastosowanie czystej technologii węgla, jaką jest zgazowanie,
  - b) scentralizowanie siłowni i ciepłowni,
  - c) niezwykle wysokiej sprawności zamiany węgla na energię.

### Korytarz energii [38]

Ostatecznie, w połowie XXI stulecia światowe zapasy ciekłych i gazowych paliw zaczną maleć, węgiel i uran będą głównymi surowcami energetycznymi dla wzrastającej liczby ludności. Zintegrowane systemy energetyczne będą zawierały nie tylko te składniki, jakie pokazane są na rys.7, lecz będą prawdopodobnie zawierały także duże siłownie jądrowe. Rys.7 przedstawia koncepcję połączonego zintegrowanego systemu węglowo-nuklearnego łącznie z oryginalnym sposobem magazynowania energii i przesyłania jej do wielkich miast bez potrzeby dodatkowych linii przesyłowych.

Ta koncepcja "korytarza energii" była po raz pierwszy opisana przez Gluckmani Squires w 1975 roku w czasopiśmie Applied Energy. Zintegrowany węglowo-nuklearny kompleks energetyczny byłby zlokalizowany w pewnej odległości od obszaru miejskiego. Chemikalia, paliwa i energia elektryczna byłyby produkowane w jednym miejscu. Nowym produktem wytwarzanym w odległym miejscu byłoby sprężone powietrze przesyłane poprzez podziemny tunel pod ciśnieniem około 5 MPa do miasta. Tunel działałby jako ogromny system magazynowy. Sprężone powietrze byłoby produkowane w sposób ciągły w odległym miejscu. Powietrze byłoby pobierane z tunelu do zamiany na energię elektryczną w wielu małych siłowniach z turbinami rozprężnymi zlokalizowanymi w zatłoczonym centrum. Elliott wykazał, że przy pewnej skali byłoby tańsze przesyłanie energii w formie sprężonego powietrza aniżeli za pomocą przewodów elektrycznych. W czasie zimy ciepło odpadowe ze zintegrowanego systemu energetycznego byłoby zużyte w sieci ciepłowniczej do ogrzewania miasta. W czasie lata natomiast ciepło to można wykorzystać do chłodzenia w systemach klimatyzacyjnych.



Rys. 7. Schemat idei korytarza energii  
Fig. 7. Schematic diagram of power corridor

Dodatkowym atrybutem korytarza energii byłoby to, że przyciągałby on jak magnes przedsiębiorstwa zużywające energię i lokował je wzdłuż siebie. Takie przemysły, jak oczyszczanie gazu, produkcja chemiczna, metalurgia, przemysł spożywczy ceramiczny itp. usytuowane w pobliżu "korytarza energii", miałyby niskie koszty inwestycyjne oraz niskie koszty energii.

#### 4. Czysty węgiel

Oczyszczanie węgla staje się koniecznością nie tylko z uwagi na ochronę środowiska, ale także z uwagi na to, że nowoczesne i przyszłościowe technologie spalania, takie jak IGCC, APFBC, a zwłaszcza MHD, wymagają małej zawartości siarki i popiołu w węglu, ponieważ cząstki mineralne pozostałe po spaleniu działają bardzo erozyjnie i korozyjnie na łopatki turbin gazowych.

Niektóre z nowych tak zwanych niekonwencjonalnych zastosowań węgla także wymagają usunięcia z niego popiołu i siarki. Można tu zaliczyć opisane niżej technologie.

##### 4.1. Zawiesinowe paliwa wodno-węglowe (cwsf)

Zastosowanie węgla jako paliwa stałego zmniejsza się. Jest on zastępowany przez oleje opałowe i gaz. Łatwość transportu i manipulowania paliwami płynnymi i gazowymi równoważy, a nawet przeważa na korzyść tych ostatnich różnicę cen pomiędzy paliwami gazowymi i ciekłymi a węglem.

W ciągu ostatnich kilku lat obserwuje się rozwój badań nad alternatywnymi paliwami dla małego przemysłu i kotłowni. Zastosowanie niskopopiołowych i niskosiarkowych węgla do produkcji zawiesinowych paliw węglowo-wodnych jest jedną z możliwych dróg do zmniejszenia kosztów paliwa.

Zawiesinowe paliwa wodno-węglowe są przedmiotem intensywnych badań z uwagi na możliwość zastosowania ich w kotłowniach opalanych dotychczas olejami opałowymi.

Typowe paliwa wodno-węglowe zawierają od 60 do 70% węgla, 25 do 40% wody i około 1% dodatków chemicznych. Drobnouziarnione wodno-węglowe paliwa zawiesinowe o mniejszym zagęszczeniu (50-55% węgla) stosowane są do napędu turbin gazowych. Paliwa



tego typu posiadają konsystencję mieszczącą się w zakresie od wysoko płynnych cieczy o lepkościach zbliżonych do lepkości oleju opałowego do mieszanin tiksotropowych, które w stanie spoczynku występują w formie żeli, a stają się płynne w momencie zadziałania na nie sił ścinających [21, 22, 23, 24, 25]. Właściwości fizyczne oraz palne tego rodzaju paliw zależą od następujących czynników:

- typu węgla użytego do przygotowania paliwa;
- kształtu ziarn węglowych;
- składu ziarnowego zawiesiny;
- zawartości popiołu w węglu;
- zagęszczenia zawiesiny wodno-węglowej;
- rodzaju dodatków chemicznych.

Czynniki te wpływają na łatwość transportu paliwa, jego magazynowanie, płynność, zdolność do rozpylania w palniku i charakterystykę płomienia, wartość opałową oraz emisję substancji szkodliwych w trakcie ich spalania. Czynniki te należy brać pod uwagę podczas badań nad zawiesinowymi paliwami wodno-węglowymi.

Jest kilka korzyści ze stosowania tego rodzaju paliw w porównaniu z paliwami stałymi stosowanymi do opalania kotłów, a mianowicie: łatwość transportu - mogą być transportowane przy użyciu rurociągów, łatwość magazynowania w zbiornikach, jak również mogą być wprowadzane do paleniska przez wtrysk, podobnie jak paliwa płynne. Paliwa stałe wymagają specjalnych urządzeń do ich transportu, przygotowania do spalania, jak i specjalnych urządzeń do zasilania palenisk. Poza tym operowanie pyłem węglowym stwarza niebezpieczeństwo wybuchu.

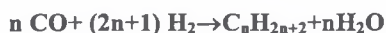
Wytwarzanie zawiesinowych paliw węglowo-wodnych może być połączone z procesem wzbogacania węgla, na przykład z flotacją. W tym przypadku możliwe jest zmielenie węgla przed flotacją w celu uwolnienia ziarn węglowych od skały płonnej bez ryzyka związanego z trudnościami odwadniania koncentratu. W tym przypadku bowiem odwadnianie nie jest konieczne. Oszczędza się też dużo energii eliminując proces suszenia koncentratu węglowego. Zastosowanie zawiesinowych paliw węglowo-wodnych obniża temperaturę płomienia w palenisku, co powoduje zmniejszenie zawartości  $\text{NO}_x$  w spalinach.

## 4.2. Węgiel jako paliwo do silników diesla

Największym wyzwaniem w rozwoju badań nad paliwami jest skonstruowanie mogącej znaleźć powszechne zastosowanie lokomotywy z silnikiem diesla zasilanym węglem. Jednostka taka składa się z następujących zespołów: wielocylindrowego silnika dieslowego zasilanego paliwem węglowym, urządzeń sterujących, systemu zasilania zawieszoną wodno-węglową. Zawieszoną węglową do napędu takiego silnika sporządzono z odpopielonego węgla z Kentucky Blue Gem o składzie 49% wag. węgla o zawartości popiołu poniżej 1% i średnim rozmiarze ziarn poniżej 5 mikrometrów [26, 27, 28].

## 4.3. Uwodornienie

Dla tych samych powodów, dla których spodziewany jest wzrost zainteresowania węglem jako paliwem, będzie wzrastało także zainteresowanie węglem jako surowcem dla przemysłu chemicznego. Węgiel będzie głównym źródłem węglowodorów niezbędnych do produkcji tworzyw sztucznych, nawozów oraz rozpuszczalników. Przepuszczalnie w połowie XXI wieku powtórzy się sytuacja, jaką przeżywały Niemcy w okresie II wojny światowej. W tym właśnie czasie zastosowano po raz pierwszy na dużą skalę opracowany w 1920 roku przez Fischera i Tropscha proces syntezy wodoru ( $H_2$ ) oraz tlenku węgla (CO) w obecności katalizatora do postaci węglowodorów. Reakcja ogólna tego procesu to:



gdzie: jeżeli  $n = 1$ , to produktem reakcji jest metan  $CH_4$ , itd.

Oba składniki gazu syntezowego ( $H_2$ , CO) otrzymuje się z węgla w wyniku jego zgazowania. Proces ten na dużą skalę (ale z pewnymi modyfikacjami) jest stosowany aktualnie przez SASOL (South Africa Synthetic Oil).

Również technologie bezpośredniego uwodornienia wysoko oczyszczonego węgla (metoda Bergiusa) doczekały się w USA realizacji przemysłowej, lecz ze względu na stosunkowo niskie obecnie ceny ropy naftowej nie są wdrażane. Badania w tej dziedzinie są jednak prowadzone bardzo intensywnie i należy się spodziewać, że w przyszłości duża część paliw płynnych otrzymywana będzie z węgla.

#### 4.4. Węgiel jako reduktor w procesie wielkopiecowym

Jednym z głównych konsumentów węgla jest przemysł metalurgiczny używający węgla w procesie wielkopiecowym. W 1987 roku wyprodukowano około 320 mln ton koksu metalurgicznego [29]. Proces koksowniczy jest procesem bardzo drogim z punktu widzenia ogólnych kosztów budowy i kosztów ruchu, jak również z powodu niskiej wydajności procesu koksovania. Z tego powodu odżywiają pomysły zastosowania do redukcji rudy żelaza węgla bezpośrednio wtryskiwanego do wielkiego pieca.

Zastosowanie węgla w procesie wielkopiecowym polepsza otrzymywanie gorącego metalu nie tylko z powodu zmniejszenia kosztów procesu, lecz również z punktu widzenia ochrony środowiska.

Konwencjonalny sposób produkcji żeliwa w wielkim piecu wymaga przygotowania wsadu, co obejmuje produkcję koksu i spiekanie rudy z koksem. Oba te procesy powodują bardzo duże skażenie środowiska naturalnego. Zastosowanie wtrysku pyłu węglowego do wielkiego pieca pociąga za sobą zmniejszenie ilości potrzebnego koksu, a więc ograniczenie jego produkcji [30].

Włoska firma badawcza "Centro Sviluppo Material" (CMS) zaprojektowała proces oparty na wtrysku pyłu węglowego bezpośrednio do wielkiego pieca [31]. Celem tego procesu było ograniczenie zużycia koksu i ograniczenie jego produkcji związanej z zagrożeniami skażenia środowiska. Zaprojektowany proces umożliwia wtrysnięcie bezpośrednio do wielkiego pieca do 200 kg węgla na tonę gorącego metalu. Zastępuje to około 40% koksu normalnie używanego do tego celu. Podobny zakład był zaprojektowany przez Nippon Steel Corporation w Japonii [32]. Zwiększająca się liczba wielkich pieców pracujących według tej technologii potwierdza korzyści ekonomiczne z jej zastosowania. Proces ten jest stale ulepszany, a w badaniach kładzie się nacisk na szybkość wtrysku, sprawność procesu spalania węgla, wilgotność węgla i zapotrzebowanie tlenu. Zostały opracowane modele matematyczne do symulacji tego procesu [33, 34]. W Szwecji opracowano proces zwany Balanced Oxygen Blast Furnace, w którym wtrysk dużej ilości sproszkowanego węgla zastępuje użycie drogiego koksu [35]. Głównymi korzyściami ze stosowania tego procesu są: niskie koszty energii, wysoka wydajność, uproszczenie wyposażenia, łatwość prowadzenia procesu oraz możliwość zaadaptowania go w istniejących konwencjonalnych wielkich piecach o dużej mocy przerobowej.

Technologia ta jest rozwijana, o czym świadczą wiele prac prowadzonych w tej dziedzinie.

## 5. Podsumowanie

- \* Analiza aktualnego stanu zastosowań znanych albo aktualnie opracowywanych technologii utylizacji węgla wykazuje, że era "czystego" węgla jeszcze nie w pełni nadeszła, ale wiadomo, że jest nieuniknionym przeznaczeniem tak w konsekwencji struktury przyszłego rynku paliw, jak również spodziewanych zmian w zapisach legislacyjnych dotyczących ochrony środowiska w skali globalnej.
- \* Świat powinien być przygotowany przynajmniej na podwojenie, a może i potrojenie zużycia węgla do połowy XXI wieku.
- \* Światowe zapotrzebowanie na energię elektryczną wzrośnie do 2060 roku od 2- do 7- krotnie.
- \* Wymagania ze strony ochrony środowiska zmuszają do maksymalizacji efektywności termodynamicznej i ekonomicznej wykorzystania węgla.
- \* Z powodu czystości i elastyczności technologii zgazowanie węgla będzie głównym procesem opartym na węglu w XXI wieku.
- \* Zintegrowane systemy produkcji energii i nowe koncepcje, takie jak np. korytarz energii będą z uwagi na ekonomikę i ochronę środowiska rozwijane, co spowoduje też uniezależnienie się od importowanej ropy naftowej.

Jest niezmiernie istotne, że w perspektywie dwudziestu i więcej lat tylko te kraje będą korzystać z faktu posiadania złóż węgla łącznie z technologiami nowoczesnego (znaczy czystego) przetwarzania węgla na energię, które zainwestują w rozwój tych właśnie technologii. Przymuszczalnie kraje posiadające węgiel i rozwinięte wyżej wymienione technologie osiągną pozycję globalnych monopolistów za około pięćdziesiąt lat. Nasuwa się pytanie, czy planiści i dysponenci polskiej gospodarki są tego świadomi?

## LITERATURA

1. Lockhard N.C.: Prospects of innovative coal preparation technologies. Proc. World Coal Institute Conference and Exhibition; London, 1991, p.335.
2. Koizumi S., Hagino T., Yamamoto Y., Mizoguchi C., Sunaga K.: Coal/biomass composite solid fuel (bio-coal). 2nd Conference of Coal Utilization Technology (Japan) Sep. 1992 p.180-188.

3. Saranchuk V.I., Pashchenko L.V., Khazipov V.A., Galushko L.Ya., Semenchenko M.V.: Briquetting of mixtures of brown coal with hydrolysed lignin. *Ugol Ukrainy*; (6); p.53-56 (June 1992).
4. Baulin A.V., Karakuts V.N., Telyashev Eh.G.: Effect of composite two-component additive on the quality of brown coal briquetting layers. *Ugol*; (2); p.51-52 (1992).
5. Petrov V.M., Nazarov P.G.: New technical designs used in planning coal briquetting plants at the Giproskhakht institute. *Ugol*; (6); p.40-43 (1992).
6. Pavlyuk N.P., Poletaev A.A., Kryazhev A.N.: Concept of automatic for the Kumertau briquetting plant. *Ugol*; (7); p.26-29 (1992).
7. Keane G.: Environmentally friendly coalbriquettes from Rockhampton. *Australian Mining*; **84** (9); p.37 (1992).
8. Rehn F.: State of raw coal processing and dried coal processing at the briquette factories of the Lusatian Brown coal Corporation. *Braunkohle*; **44** (8); p.11-15 (1992).
9. Gleisberg R., Mrosk H.P.: The processing plants at the ESPAG briquette factories. *Braunkohle*; **44** (8); p.15-19 (1992).
10. Knauth F.: Brown coal briquetting in Germany and the former state-trading countries of East Europe. *Braunkohle*; **44** (11); p.16-20 (1992).
11. Young B.C.: Coal briquetting. *Proc. Energy and environment: Transitions in Eastern Europe*; Prague; 20-23 Apr. 1992.
12. Ministry of Mines and Energy (Indonesia): Planning and development of coal briquetting industries in Indonesia: *Coal in Asia-Pacific*; **4** (4); p.18-28 (1993) [Coal Abstracts 93:05016].
13. Choma J., Gwizdalski M.: Application of the method and adsorption equation of Dubinin-Radushevich in characterizing adsorption properties of microporous activated carbon: *Karbo: Energochemia, Ekologia*; **37** (11); p.263-268 (1992).
14. Ruiz B., Parra J.B., Alvarez T., Fuertes A.B., Pajares J.A. Pis J.J.: Active carbons from semianthracites: *Applied Catalysis*; **98** (2); p.115-123 (1993).
15. Lopez-Ramon M.V., Moreno-Castilla C., Rivera-Ytrilla J., Hidalgo-Alvarez R.: Activated carbons from a subbituminous coal: pore texture and electrokinetic properties: *Carbon*; **31** (5); p.815-819 (1993).
16. Kovacik G.J., Bushe W.K., Wong B.Y.: Simultaneous production of energy and specially products from low reactivity coal: Final report Alberta Research Council (Canada); [Coal Abstracts 93:01697].



17. Tomashevskaya A.N., Tarkovskaya I.A., Baidebko V.I.: Sorption of ammonia, sulphur and nitrogen dioxides from gas and air mixtures by carbon materials. *Ukrainskii Khimicheskii Zhurnal*; **58** (2); p.155-160 (1992).
18. Botha F.D.: Characterization of the structure and adsorption capacity of activated carbon produced from South African coals. Ph.D. Thesis (University of Bath, Bath (UK). [Coal Abstract 93:03563].
19. Utrilla J.: Activated carbons as adsorbents of SO<sub>2</sub> in flowing air - effect of their pore texture and surface basicity. *Langmuir*; **9** (5) p.1378-1383 (1993).
20. Jagtoyen M., Groppo J., Derbyshire F.: Activated carbons from bituminous coals by reaction with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>: the influence of coal cleaning: Symposium on high value materials from coal. San Francisco; 6-10 Apr. 1992.
21. Miller B.G.: Coal-water slurry fuel utilization in utility and industrial boilers. *Chemical Engineering progress*; p.29, (March 1989).
22. Williams J.A., Akoto W.O., Tagoe C.C.: Effect of selected additives on the stability and rheology of coal-water mixtures. *Proc. Seventh International Symposium on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization*; May 21-25 (1985) New Orleans Louisiana; p.155.
23. Lapasin R., Prich, S.: Continuous and oscillatory flow properties of concentrated coal/water suspensions. *Canadian J.Chem. Enging.*; **70**,(1); p.20-27 (1992).
24. Turian R.M., Fakhreddine M.K., Avramidis K.S., Sung D.J.: Yield stress of coal-water mixtures. *Fuel*; **72** (9); p. 1305-1315 (1993).
25. Leong Y.K., Boger D.V., Christie G.B., Mainwaring D.E.: Rheology of low viscosity, high concentration brown coal suspensions. *Rheologica Acta*; **32** (3); p.277-285 (1993).
26. Hsu B.D., McDowell R.E., Confer G.L., Basic S.L.: Coal-fueled diesel locomotive test. Meeting on coal-fueled heat engines, advanced PFBC and gas stream cleanup systems. Morgantown, WV (USA). 27-28 Oct. 1992. [Coal Abstracts: 93:05221].
27. Wilson R.P., Balles E.N., Benedek K.R., Benson C.E., Tao K., Schaub F., Kimberley J., Itse D.: Testing of coal-fired diesel power plant. *Ibid.* [Coal Abstracts 93:05222].
28. Badgley P.R.: Novelinjector techniques for coal-fueled diesel engines. Final report. Report no. DOE/MC/26305 - 3257, 100p. (Sep. 1992). [Coal Abstracts 93:05223].
29. Harrison J.S.: Clean use of coal in industry. *Proc. of the World Coal Institute Conference and Exhibition - Coal in the Environment* London, 3-5 April 1991 p.127.
30. Dwyer G.M., Muir D.A.: Pulverized coal injection and coal demand: a focus on Japan. *Agriculture and Resources Quarterly*; **4** (3); p.368-377 (1992).

31. Malgarini M.G.: Direct use of coal in ironmaking. Proc. World Coal Institute Conference and Exhibition Coal in the Environment. 3-5 April, London (1991); p.367-368.
32. Tateoka M.: Development of pulverized coal injection into blast furnaces in Japan. Coal in Asia-Pacific; 4 (2); p.37-47 (1992).
33. Yamaguchi K at al.: Maximum injection rate of pulverized coal into blast furnace through tuyeres with consideration of unburnt char. ISIJ International; 32 (6); p.716-724 (1992).
34. Ohno Y. at al.: Process characteristics of a commercial-scale oxygen blast furnace process with shaft gas injection. ISIJ International; 32 (7); p.838-847 (1992).
35. Jitang M., Edstroem, J.O.: The balanced oxygen blast furnace (BOBF) ironmaking process. Scandinavian Journal of Metallurgy; 21 (3); p.104-111 (1992).
36. Bilik J., Kret J.: Possibility of blast furnace coke substitution by coal dust under conditions of Czechoslovakia. Hutnik - Wiadomości Hutnicze; 59 (6); p.184-186 (1992).
37. Materiały Economic Commission for Europe; Committee on Coal – Energy/WP. 1/GE. 3/R. 5 30.01.1995.
38. Gluckman M.J.: Toward 21<sup>st</sup> Century Coal Processing – Proceeding of the World Coal Institute Conference and Exhibition “Coal in the Environment”.
39. Charles D.: In search of a better burn New Science, No 1 1993, s.21-25.
40. Greenfield P.: Clean up or shut-up for coal stations, Professional Engineering, No 6, 1997, s.16-17.
41. Mahr D.: Coal for industrial boilers, Mechanical Engineering, No 2, 1985, s.34-43.
42. Fagenbaum J.: Back to coal power, Mechanical Engineering, No 8, 1983, s.39-45, Załącznik A.

Recenzent: Dr hab. inż. Krystian Probiez

## Abstract

Coal is the world's most abundant fossil fuel by far. While accessible stocks of gas and oil will last 50 years or so at the rates we now exploit them, there is enough coal available for three centuries at least. The world has coal resources equivalent to at least 10000 billion ton-

nes of oil, the traditional unit for comparing stocks of fossil fuels. Extracting coal from the ground involves tearing up landscapes with opencast mines, or risking human health and lives in deep mines. The traditional way to unleash coal's energy is by setting fire to it, a reaction that produces sulphur dioxide, nitrogen dioxide, carbon monoxide, a brew of aromatic hydrocarbons laced with toxic metals, to say nothing of carbon dioxide, the most notorious greenhouse gas. On top of all that, conventional power stations waste about two-thirds of the coal's energy. Why bother? Because coal is the only fossil fuel available in quantities that for practical purposes are inexhaustible. It is the only fuel capable of providing the electricity needed for the economic development of the world. Coal is a very versatile fuel. It can be burned as a solid, a liquid, or a gas. The hot gases that combustion releases drive steam generators in today's power stations, and they will probably power gas turbines in the next generation of station. Further into the future, the gases may produce electricity directly when they stream through a magnetic field (MHD), while hydrogen from coal could be generating electricity in battery-like fuel cells. Many of these technologies are far less polluting and capture coal's energy more efficiently than conventional power plants. Cleaned-up coal has several attractions. Mixed with water as slurry it could substitute for heavy fuel oil. Coal-water mixtures could also fuel gas turbines in advanced power generation, run diesel engines, or provide clean carbon for aluminium and steel smelters. Commercial success for fuel cells will not necessarily help the coal industry immediately. All these fuel cell projects use natural gas, not gas from coal. But if natural gas prices rise, as seems likely when exploitable resources run short over the next few decades, fuel cells might switch over to coal gas. Running fuel cells on coal gas would mean more efficient use of coal, while eliminating most of the emissions. Although the era of truly clean coal, whether driving MHD, fuel cells or super-efficient gas turbines, is at least one generation of technology in the future, those countries developing the new technologies now will be the ones that will benefit later. Poland should be one of them.