AGH KRAKÓW, WYDZIAŁ ENERGETYKI I PALIW.

Zgazowanie węgla- szansa na czyste jutro.

Praca konkursowa z tematyki aspektów technologicznych uwarunkowań bezpieczeństwa energetycznego.

Michał Kumor

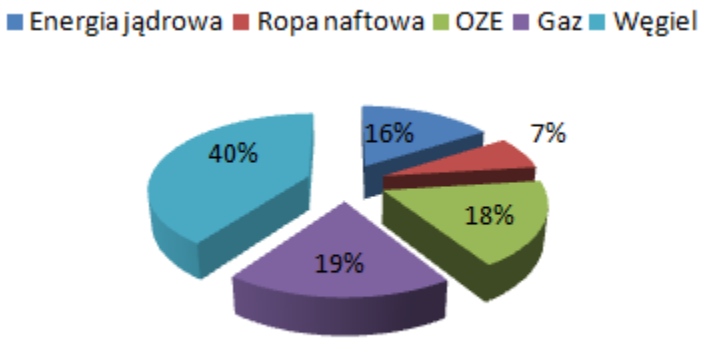
Zawartość

WSTĘP 3
BEZPIECZEŃSTWO ENERGETYCZNE 4
KRAJOWE ZASBY WĘGLA KAMIENNEGO 5
GENEZA ZŁÓŻ 5
WYDOBYCIE WĘGLA KAMIENNEGO W POLSCE 6
ZGAZOWANIE WĘGLA: 7
HISTORIA: 7
METODY ZGAZOWANIA: 8
ZALETY PROCESÓW ZGAZOWANIA: 9
ZINTEGROWANE UKŁADY GAZOWO- PAROWE 10
PORÓWNANIE TECHNOLOGII ZGAZOWANIA: 11
PODZIEMNE ZGAZOWANIE WĘGLA 12
HISTORIA: 13
METODY ZGAZOWANIA: 13
TECHNOLOGIE ZGAZOWANIA: 14
ANALIZA POTENCJAŁU KRAJOWEGO I PERSPEKTYWY ROZWOJU: 14
PZW, ZAGROŻENIA ŚRODOWISKA, SEKWESTRACJA CO_2 15
EKONOMIA PROCESU PZW 15
ASPEKTY EKONOMICZNE 16
EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA UKŁADÓW ZAZOWANIA W CELU PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ. 16
PODSUMOWANIE 18
BIBLIOGRAFIA: 19

WSTĘP

Szacuje się że już w drugiej połowie XXI wieku nastąpi zasadnicza zmiana w strukturze zużycia paliw pierwotnych. Dostęp do gazu ziemnego jak i ropy naftowej może być znacznie ograniczony. Wyczerpywanie się złóż paliw węglowodorowych może zostać przyspieszone przez intensywny rozwój takich państw jak Indie i Chiny. Nieunikniony wydaje się być powrót do najbardziej zasobnego i najszerzej rozpowszechnionego paliwa na świecie którym jest węgiel. Przy aktualnym zapotrzebowaniu na surowce energetyczne wielkość zasobów ocenia się na około 250-290 lat. Pojawia się zatem konieczność opracowania metod racjonalniejszego i wysokosprawnego wykorzystania energii chemicznej uwięzionej w węglu. Aktualnie głośno mówi się o zanieczyszczeniach i oddziaływaniu na środowisko naturalne podczas konwencjonalnych metod produkcji ciepła i energii elektrycznej. Opracowano wiele metod usuwania tlenków siarki i tlenków azotu oraz pyłów, jednakże wciąż naciska się na redukcję emisji, teraz skierowano uwagę również na zanieczyszczenia takie jak metale ciężkie, rtęć i dioksyny.

Coraz realniejsza staje się sytuacja gdzie surowcem mającym zapewnić bezpieczeństwo energetyczne Unii Europejskiej będzie węgiel. Tak! Ten węgiel, który według wielu „specjalistów" skutkuje tylko zanieczyszczeniami i efektem cieplarnianym. Mimo wszystko opinie takie są jak najbardziej pozytywne gdyż nakłaniają do opracowywania, nowych czystych technologii węglowych. Rozwój technologii karbo-energetycznych i karbo- chemicznych, a przede wszystkim wysokosprawnych i niskoemisyjnych, nastawionych na maksymalne wykorzystanie surowca wymaga wielu lat oraz integracji przemysłu energetycznego, górniczego i chemicznego. Liczby nie kłamią aktualnie węgiel stanowi z węgla produkuje się 40% energii elektrycznej na świecie.



Udział źródeł w produkcji energii elektrycznej

Podstawowym kierunkiem czystych technologii węglowych jest zgazowanie węgla, stosowane już dość powszechnie w chemii, w energetyce raczkuje. Rozwój tej gałęzi przemysłu jest konieczny, gdyż zwykłe spalanie węgla już nie wystarczy, ponieważ wokół sektora wytwarzania energii elektrycznej z gazu ziemnego określono standardy ekologiczne, do których pozostałe technologie powinny nawiązywać. Chodzi w szczególności o energetykę opartą na węglu. W przypadku emisji SO_2 bardzo ciężko jest dorównać do poziomu z gazu ziemnego, gdyż jest ona nieznaczna. Instalacje zintegrowanego zgazowania z blokami gazowo- parowymi będą musiały być nastawione na niską emisję zarówno SO_2 jak i NO_X. Instalacje z systemem selektywnej redukcji katalitycznej dały już zadowalające wyniki, a przewiduje się że układy pracujące w skojarzeniu ze zgazowaniem dadzą jeszcze lepsze rezultaty.

Udział węgla w całkowitej przemysłowej emisji CO_2 szacowany jest na około 38%, a planuje się jego obniżenie o ponad 75%. Przy obecnym stanie techniki jest to możliwe już teraz, lecz będzie skutkować znacznym wzrostem cen energii. Światowym celem technologicznym jest zatem osiągnięcie minimalnego poziomu emisji CO_2 przy niezmienionych kosztach energii. Światowe trendy rozwoju czystych technologii kierują się na dwa tory:

1) Zaawansowane spalanie w energetyce zawodowej w kotłach fluidalnych i pyłowych. Jest to kierunek typowo energetyczny.

2) Zintegrowane układy parowo- gazowe, w szczególności zgazowanie- jest to kierunek integrujący energetykę i chemię. To właśnie ta opcja wydaje się być najbardziej przyszłościową.

Należy spodziewać się rozwoju układów hybrydowych, które dają możliwość łagodzenia wpływu na środowisko z jednoczesnym znacznym zwiększeniem sprawności wytwórczej. Ocena technologii zero emisyjnych powinna opierać się na aktualnym technologicznym poziomie spalania węgla w kotłach na parametry nadkrytyczne. Integracja zgazowania z wytwarzaniem energii elektrycznej pozwoli nie tylko zwiększyć wydajność ale i usunąć wszystkie niebezpieczne składniki już podczas procesu produkcji, a nie po jego zakończeniu jak to ma miejsce obecnie.

Aktualnie obserwuje się wzrost zainteresowania technologiami zgazowania i coraz chętniejsze jej wdrażanie. W chwili obecnej działa 128 zakładów zgazowania wykorzystujących 366 gazogeneratorów różnej konstrukcji.

Praca ta ma na celu pokazać, że energia pozyskiwana z rodzimego węgla wcale nie musi być czarna i obarczona sankcjami ekologicznymi. Chcę pokazać, że zgazowanie to kierunek w którym powinniśmy iść by zapewnić sobie i kolejnym pokoleniom jutro bezpieczne ekologicznie i energetycznie.

BEZPIECZEŃSTWO ENERGETYCZNE

Termin „bezpieczeństwo" należy do tych, które używane są coraz częściej w stosunku do sfer związanych z działalnością człowieka. Jest to słowo definiujące stan pewności i gwarancji jego zachowania. Zapewnienie bezpieczeństwa to kluczowe zadanie państwa, jeden z jego podstawowych celów egzystencjalnych i rozwojowych. Wśród typologii bezpieczeństwa, bezpieczeństwo energetyczne stanowi pewien składnik przedmiotowy ogólnie pojmowanego bezpieczeństwa określanego dodatkowo w wymiarze przestrzennym, czasowym oraz sposobu organizowania.

W wymiarze narodowym bezpieczeństwo energetyczne nie zależy jedynie od państwa, ale od całego łańcucha dostaw. Łańcuch ten jest uzależniony od czynników występujących po za granicami państwa i wpływ na czynniki te jest znikomy- właściwie żaden. Szereg zagrożeń czyhających na łańcuch dostaw również utrudnia zapewnienie odpowiedniego stanu pewności i braku zagrożenia.

Szczególną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego stanowią surowce energetyczne. Żyjemy w czasach energochłonnych i jesteśmy uzależnieni od każdego rodzaju energii. Rozwój technologiczny i cywilizacyjny powoduje wzrost zapotrzebowania na surowce- surowce nieodnawialne, których złoża znajdują się w rejonach nie zawsze stabilnych politycznie. Pojawia się kwestia dostępności i pewności dostaw. Surowce energetyczne należy traktować jako towar strategiczny w wymiarze politycznym i gospodarczym.

Przez bezpieczeństwo energetyczne państwa w Polsce, w myśl art. 3 pkt 16 ustawy Prawo energetyczne z 10 kwietnia 1997 r. (Dz.U. z 2003r. nr 153, poz. 1504) rozumie się: *„stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy zachowaniu wymagań ochrony środowiska"*. Przekładając to na język potoczny jest to stan braku zagrożenia przerwania dostaw paliw i energii.

Stan bezpieczeństwa może zapewnić zwiększenie wydobycia surowców gazowych ze złóż krajowych oraz dywersyfikacja ich dostaw, jak również zwiększenie i zróżnicowanie wykorzystania własnych złóż węgla. Zgazowanie węgla nie tylko umożliwia produkcję czystej energii , pozwala również na produkcję paliw płynnych np. metodą Fishera- Tropscha, a także zapewnienie ciągłości dostaw do gospodarstw domowych substytutu gazu ziemnego.

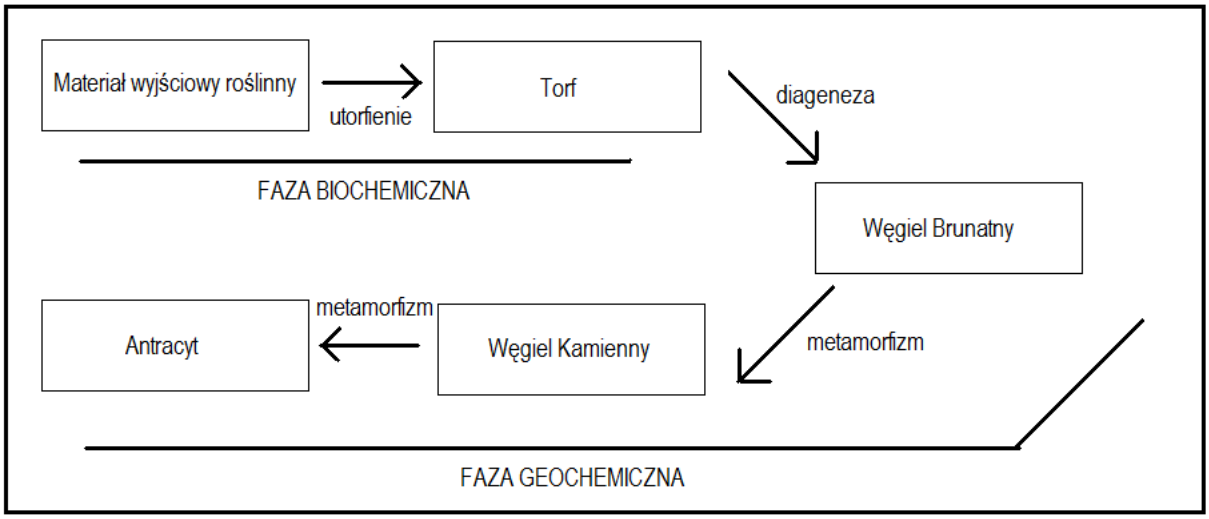
KRAJOWE ZASBY WĘGLA KAMIENNEGO

GENEZA ZŁÓŻ

Złoża węglowe powstały w dwóch głównych okresach: od dolnego karbonu do permu włącznie, gdy to powstały najważniejsze złoża węgla kamiennego, drugi okres obejmuje trzeciorzęd gdy to powstały główne zasoby węgla brunatnego. Na zróżnicowanie cech jakościowych węgli wpłynęły takie czynniki jak: rodzaj materiału wyjściowego, warunki przetwarzania i gromadzenia. Złoża węgla mają charakter autochtoniczny- powstały tam gdzie znajdował się materiał wyjściowy.

Materiałem wyjściowym były rośliny lądowo- bagienne, a węgle z nich powstałe noszą nazwę humusowych, w odróżnieniu od węgli sapropelowych powstałych z roślin i mikroorganizmów wodnych. Główne złoża węgli kamiennych humusowych powstały z roślin okresu karbońskiego. Większość roślin tego okresu miała charakter drzewiastych form paproci, skrzypów i widłaków sięgających 10m. Roślinność taka była charakterystyczna dla klimatu subtropikalnego o dużej wilgotności i małych wahaniach temperatur.

Wyjściowa substancja roślinna w miarę upływu czasu podlegała biologicznej i chemicznej degradacji. Najważniejszy był proces utorfienia, w środowisku wodnym, z obecnością bakterii, grzybów i enzymów, w atmosferze z ograniczoną ilością tlenu. Proces gnicia był podstawą powstania węgli sapropelowych. Proces utorfienia ustawał w momencie przykrycia warstwy torfu nadkładem. Tam kończyła się faza biochemiczna i rozpoczynała się faza geochemiczna, w której decydujące znaczenie miały czas, temperatura i ciśnienie.



Schemat powstawania humusowych paliw stałych

ZASOBY WĘGLA KAMIENNEGO W POLSCE

W Polsce złoża węgla kamiennego występują w trzech zagłębiach:

1) Górnośląskie Zagłębie Węglowe- występuje tutaj około 79,8% udokumentowanych bilansowych zasobów węgla kamiennego o pełnym zakresie typów technologicznych. Średnia zawartość popiołu wacha się od 11 do 17%, a siarki od 0,59 do 2,3%.
2) Lubelskie Zagłębie Węglowe- występuje tu wyłącznie węgiel energetyczny, średnia zawartość popiołu wynosi 14,63%, a siarki od 1,21 do 1,46%.
3) Dolnośląskie Zagłębie Węglowe – w 2000 roku zakończono wydobycie i aktualnie zasoby oszacowane na 369 mln t traktowane są jako zasoby pozabilansowe.

Zasoby geologiczne- cała ilość węgla zalegająca na danym obszarze.

Zasoby bilansowe- zasoby spełniające odpowiednie kryteria bilansowości- głębokość zalegania, miąższość.
Zasoby przemysłowe- zasoby nadające się do wydobycia w danym czasie z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego.
Zagospodarowane zasoby węgla:

Złoża	Rodzaj zasobów [mln t]			
	Geologiczne	Bilansowe	Pozabilansowe	Przemysłowe
GZW	25034	14700	10334	5692
LZW	1016	590	426	320

Po za złożami zagospodarowanymi w GZW i LZW znajdują się złoża rezerwowe i perspektywiczne:

Złoża	Rodzaj zasobów [mln t]			
	Geologiczne	Bilansowe	Pozabilansowe	Przemysłowe
GZW	24749	18751	5998	2
LZW	15146	8655	6491	-

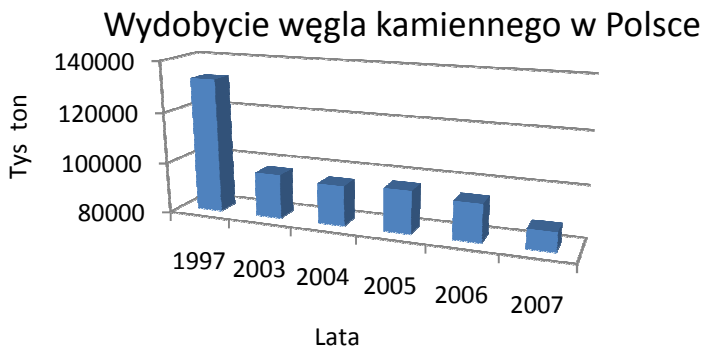
Jak widać tylko brak inwestycji mógłby spowodować deficyt węgla, gdyż złoża perspektywiczne i złoża aktualnie eksploatowane są złożami dużymi.

Spośród zasobów przemysłowych wydziela się jeszcze zasoby operatywne, które oznaczają złoża rentowne w eksploatacji. W obszarach czynnych wynosiły około 3,8 mld t. W pokładach czynnych i w budowie 2,5 mld t. Poniżej zamieszczam zestawienie kilku kopalń wraz z ich zasobami (dane z 2006 roku):

Kopalnia	Zasoby operatywne [tys t]		Wystarczalność zasobów [lata]	
	Ogółem	Czynne	Całkowite	Czynne
ZGE Sobieski- J-no III	125 418	56 380	41,2	18,1
ZG Janina	222 835	37 993	70,8	13
KWK Budryk	237 346	90 925	71,6	27,4
KWK Halemba	213 926	213 926	73,8	73,8
KWK Wesoła	210 248	210 248	59,5	59,5
Bogdanka SA	247 163	110 101	25,3	12,8
KWK Wujek	83 596	83 596	23,4	23,4
KWK Wieczorek	26 181	26 181	14,9	14,9
KWK Mysłowice	21 673	21 673	10,4	10,4

WYDOBYCIE WĘGLA KAMIENNEGO W POLSCE

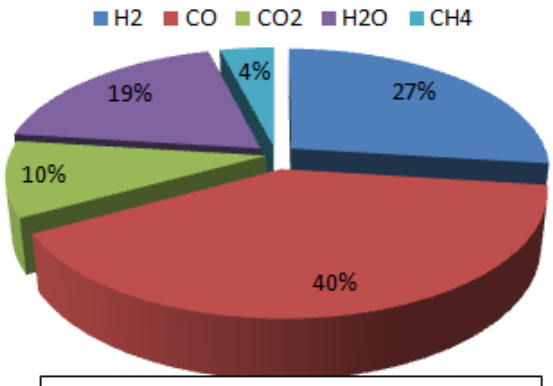
Wydobycie wykazuje tendencję spadkową co spowodowało, że w roku 2008 pierwszy raz w historii import węgla przewyższył eksport. Porównanie wydobycia węgla w latach 2007 i 1997 wykazuje spadek wydobycia o 34%! Czyli o około 45,2 mln t.



ZGAZOWANIE WĘGLA:

Zgazowanie jest to zespół przemian termicznych i chemicznych, zachodzących pomiędzy substancją organiczną i czynnikiem zgazowującym- takim jak powietrze, tlen, para wodna, dwutlenek węgla, czy też ich mieszanin- w warunkach podwyższonej temperatury. Czynnik zgazowujący, właściwości surowca oraz warunki fizykochemiczne procesu warunkują jakość i skład powstającego produktu gazowego. Zgazowanie węgla jest podstawowym sposobem przeróbki chemicznej węgla o słabych właściwościach koksotwórczych. Większość reakcji procesu zgazowania to reakcje endotermiczne, dlatego część pierwiastka C zostaje utleniona do CO_2 i zużyta na przeprowadzenie procesu. Niestety węgiel(surowiec) to nie tylko wodór i węgiel(pierwiastek), to również heteroatomy, które w wyniku zgazowania dają szkodliwe substancje takie jak; siarkowodór, amoniak, tlenosiarczek węgla w ilościach nie przekraczających 1% powstałych gazów.

Zgazowanie węgla tlenem i parą wodna umożliwia uzyskanie gazu syntezowego, gazu opałowego średniokalorycznego(16-17 MJ/m^3) oraz substytutu gazu ziemnego SNG (34-35 MJ/m^3). Prowadząc proces przy użyciu powietrza i pary wodnej jako produkt uzyskujemy mieszaninę gazów o kaloryczności od 4 do 12,5 MJ/m^3. Uzyskujemy gaz o przykładowym składzie:



Przykładowy skład gazu ze zgazowania węgla

Reakcje dominujące w generatorze zgazowania:			
Substraty		**Produkty**	
C	O_2	CO_2	
C	CO_2	2CO	
C	H_2O	CO	H_2
C	2 H_2	CH_4	
C	1/2O_2	CO	
CO	H_2O	H_2	CO_2
CO	3 H_2	CH_4	H_2O

HISTORIA:

Paliwa gazowe towarzyszą ludzkości od zarania dziejów. Nieświadomie rozpoczęto ich wykorzystanie już w starożytności, gdy do nawigacji statków stosowano niegasnące ognie dagestańskie. Gaz ziemny stosowali również chińczycy do wypalania porcelany oraz na Birmie do ogrzewania pomieszczeń. W Europie zachodniej bardziej popularnym paliwem był węgiel. W Wielkiej Brytanii, kolebce rewolucji przemysłowej wykorzystywano zarówno węgiel kamienny jak i drzewny. Rozwijające się państwo pogrążało się w ciemnościach każdego wieczora. Sen z powiek naukowcom i inżynierom spędzał problem oświetlenia ulic i miejsc użyteczności publicznej. Problem rozwiązali dwaj brytyjscy inżynierowie- Moordock i Cleek- Opracowali oni bowiem produkcję gazu węglowodorowego z węgla. Gaz został nazwany gazem świetlnym. Spalany był w prymitywnych palnikach motylkowych.

Dobre spalanie gazu charakteryzuje się niebieskim płomieniem, który jak wiemy nie daje zbyt dużo światła. Prymitywna budowa palników była przyczyną spalania niezupełnego

którego jednym z produktów była sadza. Cząstki sadzy w płomieniu podgrzewały się do temperatur, które umożliwiały ich żarzenie. Żarząca się sadza była odpowiednim i wystarczającym źródłem światła na potrzeby oświetlenia ulic, bibliotek i teatrów. Niestety produkowany i spalany w palnikach motylkowych gaz świetlny nie nadawał się do gotowania, gdyż duża zawartość węglowodorów spalanych w palniku w zetknięciu z zimnym naczyniem skutkowała powstawaniem dużych ilości sadzy i kopceniem palnika.

Produkcja gazu świetlnego odbywała się w prymitywnych piecach retortowych w temperaturze 1000°C. Węgiel upakowany wewnątrz rurek był ogrzewany przeponowo poprzez spalanie koksu. Była to metoda mało wydajna i niewygodna- pozostały karbonizat należało wydłubać z retort. Powstawał gaz o kaloryczności około 25 MJ/m^3. Gaz transportowany był przy pomocy żeliwnych rur, które mimo swojego ciężaru i prymitywności były wystarczająco wytrzymałe i co ciekaw w pełni podołały próbie czasu.

Kolejnym etapem w rozwoju produkcji gazu z węgla kamiennego było pojawienie się pieców komorowych – poziomo, skośno i pionowo komorowych. W piecach pionowo komorowych, wsad trafiał od góry, ogrzewany był przeponowo-układ ogrzewania stanowiły ściany grzewcze z poziomymi kanałami grzewczymi- ciepło potrzebne do procesu pochodziło od spalenia części powstałego koksu. Uzysk gazu zbliżony był do 350 Nm^{3}gazu/tonę węgla.

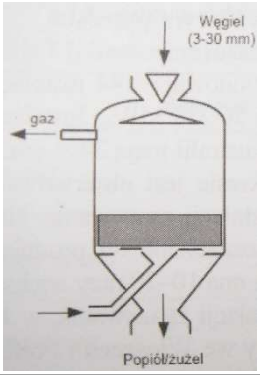
W celu zwiększenia wydajności procesu pod koniec reakcji na rozżarzony koks wprowadzano parę wodna – temperatura 1200°C- 1300°C- Pozwoliło to zwiększyć uzysk gazu do około 500 Nm^{3}gazu/tonę węgla, ale odbiło się to na kaloryczności gazu, która spadła do wartości około 13 MJ/m^3. Mniejsza kaloryczność nie była jednak problemem, gdyż do oświetlenia wymagano jak największych temperatur płomienia, a spadek kaloryczności niósł ze sobą wzrost tejże temperatury. Gaz taki stosowany był w zestawieniu z siatką Augera (tlenki ceru i cezu) dzięki temu gaz znów stał się konkurencyjny na rynku oświetleniowym- wcześniej pojawiła się lampa naftowa.

W Procesach opisanych wyżej produktem po za gazem był koks, lub półkoks, dlatego procesy te powinny być określane mianem odgazowania. Jednakże głównym produktem procesu był gaz dlatego też uznajemy to za początek zgazowania węgla.

Po I Wojnie światowej zaczął rozwijać się przemysł zgazowania węgla, w którym produktami był już tylko gaz i popiół. Uzyskiwano gaz o parametrach 14 MJ/m^3 w ilości 2000 Nm^{3}gazu/tonę węgla.

METODY ZGAZOWANIA:

Kierunki allotermiczne- dostarczanie ciepła do reaktora ze źródła zewnętrznego jest metodą znajdującą się na etapie badań, co nie oznacza, że nie jest kierunkiem przyszłościowym. Na skalę komercyjną dominuje metoda zgazowania autotermicznego, która można podzielić na cztery grupy różniące się sposobem prowadzenia procesu i konstrukcją reaktora:

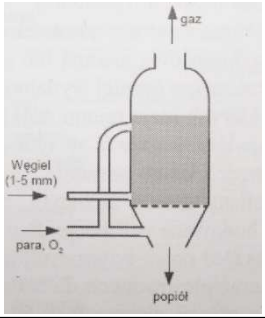


Reaktor ze złożem stałym

1) **Zgazowanie w złożu stałym lub przesuwnym** – do reaktora wypełnionego węglem, którego poziom jest stale uzupełniany w przeciwprądzie podawany jest czynnik zgazowujący. Przez taką konstrukcję reaktora możemy wyróżnić strefy suszenia, podgrzewania, odgazowania, spalania i zgazowania. Technologia dla węgli o stosunkowo dużej zawartości popiołów, mieszanin z biomasą i odpadami. Popiół odbierany albo w formie żużla, albo w formie suchej. Niska temperatura gazów wylotowych powoduje pozostałości w formie fenoli, olejów, substancji smolistych- zapobiega się

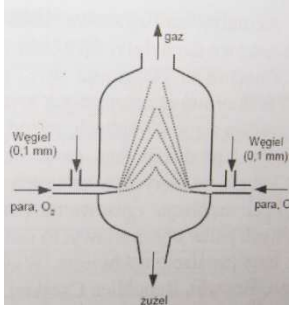
temu poprzez stosowanie recyrkulacji gazu. By zapewnić dobrą wymianę ciepła pomiędzy fazami stałą i gazową stosuje się złoża o dużej przepuszczalności(zależna od: uziarnienia, spiekalności, spiekalności popiołu) Technologia Lurgii, BGL i BHEL.

2) **Zgazowanie w złożu fluidalnym**– do reaktora podawany jest zmielony węgiel, który trafia do strumienia czynnika zgazowującego. Złoże formowane jest z popiołu, piasku lub koksu, popiół odbierany jest natomiast na dole reaktora. Niskie temperatury procesu (900- 1050°C) skutkują niepełną konwersją węgla w pojedynczym cyklu. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie układów hybrydowych, składających się z reaktora zgazowania i komory spalania w złożu fluidalnym, w stopniu drugim. Metoda ta dotyczy głównie reaktywnych węgli brunatnych.
Technologia HTW, KRW, U- Gas i BHEL.



Reaktor ze złożem fluidalnym

3) **Zgazowanie w reaktorach strumieniowych**- ideą tej metody jest równoczesne podawanie zawiesiny drobno zmielonego węgla w wodzie i czynnika zgazowującego do palnika. Duży temperatury reakcji i krótki czas przebywania węgla w strefie reakcji zapewniają duży stopień konwersji węgla, oraz brak substancji smolistych. Korzysta się z paliw o niskiej temperaturze topnienia popiołów(dodatek kamienia wapiennego obniża temperaturę topliwości) umożliwia to odprowadzenie popiołu w formie płynnej po ścianach reaktora. Konstrukcja takich reaktorów wymaga wysokich nakładów finansowych na kosztowne-odpowiednio wytrzymałe- materiały konstrukcyjne i skomplikowane wymienniki ciepła do chłodzenia gazu. Technologia Shell, GE- Texaco, E-Gas, BBP, GSP, MHI.



Reaktor strumieniowy

4) **Zgazowanie w reaktorze z ciekłą kąpielą.**

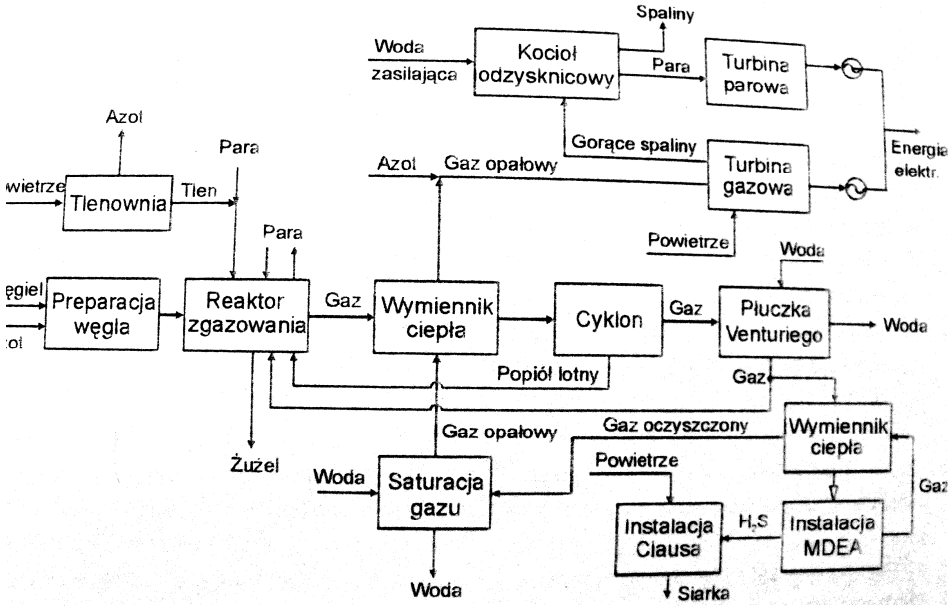
ZALETY PROCESÓW ZGAZOWANIA:

- proces dobrze kontrolowany,
- umożliwia całkowite usunięcie i deponowanie ditlenku węgla,
- wysoka sprawność procesu,
- powstający produkt- gaz o wysokich walorach użytkowych,
- przyjazny dla środowiska- obniżenie emisji zanieczyszczeń,
- możliwość wykorzystania w energetyce rozproszonej,
- umożliwia wytwarzanie lub kogenerację wodoru,
- duża elastyczność w zakresie uzyskiwanych produktów
- możliwość wspólnego zgazowania węgla i biomasy

Uzyskane paliwo gazowe charakteryzuje się następującymi zaletami:
- brak uciążliwych produktów po procesie spalenia,
- wysoka efektywność wykorzystania gazu, poprzez możliwość kontrolowania natężenia strumienia gazu- w zależności od zapotrzebowania,
- wysoka sprawność urządzeń przemysłowych
- łatwość przesyłu, dystrybucji i magazynowania.
- czystość paliwa- nie powstają pyły, tlenki siarki, emisja tlenków azotu i węglowodorów jest niższa niż w przypadku spalania paliw stałych, lub ciekłych.

ZINTEGROWANE UKŁADY GAZOWO- PAROWE

Zainteresowanie rozwojem zgazowania węgla, w połączeniu z produkcja energii elektrycznej, wiąże się z rozwojem turbin gazowo- parowych umożliwiających efektywne wykorzystanie gazu średniokalorycznego. Ówczesne układu zintegrowane pozwalają osiągnąć wysokie sprawności termodynamiczne przy niskiej emisji zanieczyszczeń do otoczenia. Przykładowy schemat zamieszczono obok. Najważniejszymi i niezastąpionymi elementami układu IGCC są generator gazu, instalacja oczyszczania i schładzania, turbina gazowa oraz parowa z kotłem odzyskowym. Instalacje pilotażowe w latach 1994-1998 ruszyły w następujących elektrowniach:



1) Demkolec – Holandia – 252 MW
2) Wabash River – USA – 252 MW
3) Tampa Electric – USA- 250 MW
4) Puertollano – Hiszpania – 300 MW
5) Pinon Pine – USA – 100 MW

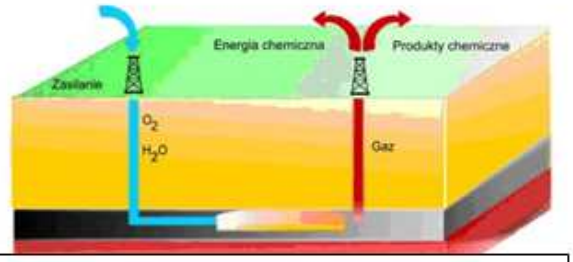
W realizowanych obecnie układach gazowo- parowych, najpoważniejszym problemem jest oczyszczanie gazu z pyłu, aerozoli oraz związków siarki. Problem uzyskania odpowiedniej czystości gazu wytworzonego na drodze zgazowania węgla jest bardzo istotnym zagadnieniem realizacji procesów karbochemicznych i energetycznych.

PORÓWNANIE TECHNOLOGII ZGAZOWANIA:

PARAMETR	RODZAJ GENERATORA								
	Złoże stałe	Złoże fluidalne			Reaktor strumieniowy				
	Lurgi/BG	HTW	KRW	U-Gaz	Texaco	Shell	DOW	PREN FLO	VEW
Czynnik zgazowujący	O_2+H_2O	Powietrze [O_2+H_2O]	Pow. + H_2O [O_2+H_2O]	Pow. + H_2O [O_2+H_2O]	O_2+H_2O	O_2+H_2O	O_2+H_2O	O_2+H_2O	Powietrze
Postać paliwa	Węgiel suchy	Węgiel suchy	Węgiel suchy	Pasta węglowo-wodna	Zawiesina wodno-węglowa	Węgiel suchy	Węgiel suchy	Węgiel suchy	Węgiel suchy
Wielkość ziarna paliwa [mm]	3-50	6	5	6	0,5	0,1	-	0,1	0,1
Odprowadzenie popiołu	Żużel	Popiół suchy	Popiół zlepiony	Popiół zlepiony	Żużel	Żużel	Żużel	Żużel	Żużel
Sposób chłodzenia generatora	Wodne	Proces adiabatyczny	Proces adiabatyczny	Proces adiabatyczny	Proces adiabatyczny	Wodne	Proces adiabatyczny	Wodne	Proces adiabatyczny
Temperatura °C -Strefa reakcji -Gaz surowy	1800 430-500	950 900	1100 1000	1100 1000	- 1300-1500	Do 2000 900	1430- 1038	Do 2000 900	2000 1400-1600
Ciśnienie [MPa]	2,5-3	1- 2,7	2	2,5	3-8	2-3	2,2	2-3	2-2,5
Stopień konwersji węgla %	99,7	90- 92 [pow]	96,5 [pow]	97[pow]	99	99,7	99,3	99,7	60
Energetyczna sprawność konwersji	89-91	70-75	69,7	69,6	76	81,6	77	74,5	Brak danych

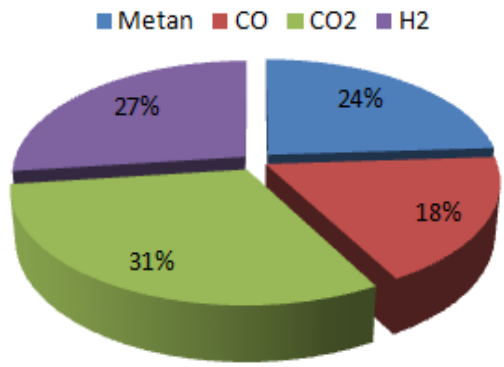
PODZIEMNE ZGAZOWANIE WĘGLA

Podziemne zgazowanie węgla jest jedną z perspektywicznych metod wykorzystania surowca, oraz pozyskania z niego energii chemicznej. Technika ta jest ciekawą i alternatywną propozycją dla tradycyjnych metod eksploatacji złóż, szczególnie w sytuacji gdy wydobycie z nich nie jest ani ekonomiczne, ani bezpieczne.



Ideowy schemat procesu zgazowania podziemnego.

Z punktu widzenia termodynamiki i chemii, podziemne zgazowanie niczym nie różni się od procesu prowadzonego na powierzchni. Cały proces najbardziej przypomina zgazowanie w złożu stacjonarnym. Podziemne zgazowanie jest procesem pozyskiwania energii chemicznej węgla w miejscu jego zalegania. Pierwszym krokiem jest zapalenie pokładu na początku otworu generatorowego- ciepło pochodzące ze spalania substancji organicznej umożliwi przebieg procesu. Do złoża podawany jest czynnik zgazowujący którym może być powietrze, tlen czy też para wodna. Końcowy produkt stanowi mieszanina gazów takich jak: metan, wodór, tlenek i dwutlenek węgla czyli mieszaniny jak najbardziej przydatnej i wartościowej przemysłowo. Skład procentowy uzyskanego gazu zależny jest od parametrów prowadzonego procesu. Nie bez znaczenia jest temperatura, typ i rodzaj zgazowywanego złoża i czynnik zgazowujący. Poniższy wykres ilustruje skład gazu wstępnie oczyszczonego, o kaloryczności 13,6 [MJ/m^3] pochodzącego z procesu PZW z tlenem jako czynnikiem utleniającym.



Przykładowy skład gazu ze zgazowania węgla

Niestety podziemne zgazowanie węgla jest znacznie trudniejsze i zdecydowanie bardziej skomplikowane w odniesieniu do zgazowania w reaktorach naziemnych. Trudność procesu polega przede wszystkim na zmieniających się w czasie parametrach. Bardzo ważna jest struktura pokładu, gdyż pod ziemią węgiel występuje w postaci litej skały, poprzecinanej przerostami i pęknięciami, o małej powierzchni kontaktu- w przypadku procesów naziemnych wykorzystujemy rozdrobniony węgiel o odpowiednio większej porowatości i dostępności powierzchni. Pod ziemią reakcja może przebiegać tylko w miejscach gdzie jest łatwy kontakt złoża z czynnikiem utleniającym i do tego odpowiednio wysoka temperatura. Nie jest to koniec trudności jakie napotykamy w procesie PZW. W czasie trwania reakcji, równocześnie do procesów zgazowania przebiega proces odgazowania (destylacji) węgla. Jest to zjawisko na tyle niekorzystne, że niechciany gaz koksowniczy pozostający w kontakcie z utleniaczem ulega spaleniu, a to powoduje obniżenie się zawartości gazów palnych w produkcie końcowym odbieranym na powierzchni. Procesy w reaktorach umożliwiają większą kontrolę procesu i rozdzielenie procesów zgazowania i odgazowania.

HISTORIA:

Początek podziemnego zgazowania węgla sięga roku 1920, gdy zapoczątkowano ją w Durham w Wielkiej Brytanii, kolejne instalacje otwarto w latach pięćdziesiątych. Obniżenie cen gazu i ropy naftowej spowodowało zamknięcie tych instalacji. Kolejnym państwem w którym prowadzono badania nad podziemnym zgazowaniem było ZSRR. Otwarto tam pięć instalacji- z których dwie pracowały na węglu brunatnym, dwie na węglu kamiennym i jedna na antracycie. Aktualnie działają tylko dwie z nich – jedna na Syberii, a druga w Uzbekistanie. W ciągu niecałych 50 lat(do roku 1996) technologią podziemną zgazowaniu poddano 17 mln m^3 węgla.

Kolejnym mocarstwem prowadzącym intensywne badania w tym temacie były Stany Zjednoczone, które w latach 1973- 89 przeprowadzono badania za kilkaset milionów USD na ok. 30 instalacjach pilotowych wykonanych w czterech rejonach zalegania węgla. Planowane testy zmierzały do zbadania określonych odmian technologii. Największym sukcesem zakończyła się instalacja Chinchilla w Australii- reaktor na głębokości 140m. Otrzymany gaz był wykorzystywany w produkcji energii elektrycznej w turbinach gazowych. W RPA obecnie realizowany jest projekt w kopalni Majuba, otrzymany gaz ma zasilać elektrownię, która dotychczas wykorzystywała węgiel.

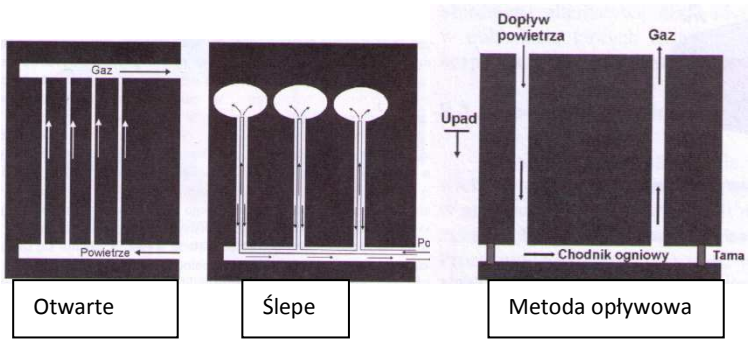
Na marzec naukowcy z Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach zaplanowali rozpoczęcie pilotażowej próby podziemnego zgazowania węgla. W eksperymencie przewidziano kilka cykli zgazowania, służących przetestowaniu metody i skuteczności tego procesu w podziemnych warunkach. Pilotażowe zgazowanie węgla w złożu odbędzie się w należącej do GIG Kopalni Doświadczalnej „Barbara" w Mikołowie. To część rozpoczętego ponad dwa lata temu międzynarodowego projektu HUGE (Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe), którego celem jest podziemne zgazowanie węgla, ukierunkowane na pozyskanie wodoru.

METODY ZGAZOWANIA:

Istnieją dwie metody przygotowania reaktora, zależne od sposobu dostępności złoża:

1) Metoda szybowa- historycznie pierwsza metoda, najstarsza i najmniej perspektywiczna, w dodatku mało ekonomiczna, choć ciekawa w odniesieniu do zamykanych kopalń. Polega ona na udostępnieniu pokładu szybem. Czynnik zgazowujący i produkty reakcji poruszają się wyrobiskami. Do tej metody opracowano dwa rodzaje reaktorów:
   - Reaktor metody opływowej
   - Reaktor metody otworów generatorowych

   W metodzie otworów generatorowych stosuje się dwa rodzaje generatorów: ślepe, lub otwarte.

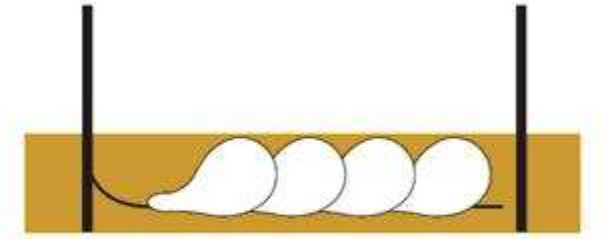


2) Metoda bezszybowa- aktualnie najpopularniejsza i najbardziej perspektywiczna, jej rozwój umożliwił rozwój w dziedzinie wierceń kierunkowych. Z powierzchni rozpoczynamy wiercenie pionowych kanałów zasilających i produkcyjnych, których połączenie następuje w złożu przez otwory robocze.

TECHNOLOGIE ZGAZOWANIA:

Technologia eUCG- jest własnością Ergo Energy, idea oparta na badaniach w ZSRR, która polega na przygotowaniu reaktora podziemnego poprzez wywiercenie otworów zasilającego i odbiorczego oraz spulchnienia pokładu węgla między nimi. Spulchnienia dokonuje się przez działanie dużego ciśnienia przewyższające o 0,5- 1 MPa ciśnienie nadkładu. Pozostałe szczegóły procesu stanowią zagadkę. Metoda ta była z powodzeniem stosowana w Australii w projekcie Chinchilla, gdzie zgazowano 35 tys. ton węgla otrzymując 80 mln m^3 gazu o kaloryczności 5 [MJ/m^3].

Technologia CRIP- Jest ona odpowiedzią na badania, które wykazały, że w miarę wzrostu średnicy po zgazowanym surowcu, stopniowo pogarsza się jakość uzyskiwanego gazu. Zasilanie generatora w ściśle określonym miejscu przez giętki przewód pozwala zniwelować to zjawisko. Upraszczając: przesunięcie przewodu zasilającego powoduje powstanie nowego reaktora, przyczyną przesunięcia zasilania jest spadek kaloryczności produktu



Technologia CRIP

ANALIZA POTENCJAŁU KRAJOWEGO I PERSPEKTYWY ROZWOJU:

Pokłady węgla przeznaczonego do procesów podziemnego zgazowania powinny charakteryzować się odpowiednimi parametrami. Najlepsze do zgazowania są węgle typu 31- węgle płomienne o małej spiekalności i małej zawartości części lotnych. W Polsce węgle takie zalegają w złożach Lubelskiego Zagłębia Węglowego i Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (dane na 2005). Interesują nas aktualnie zasoby geologiczne z uwzględnieniem złóż pozabilansowych oraz zasobów niezagospodarowanych i rezerwowych.

- GZW- 36 788 mln ton- przemysłowe 3 159 mln t
- LZW- 14 260 mln ton- przemysłowe 223 mln t

Wybrane kryteria kwalifikacji złóż:

Kryterium	Charakterystyka
Typ węgla	Od płomiennego do antracytu
Własności fizykochemiczne	Mało spiekalne, duża zawartość części lotnych
Głębokość zalegania	Większa głębokość- większe koszty
Grubość	Powyżej 1m
Kąt nachylenia	Dowolny
Wielkość zasobów	Kryterium opłacalności
Obecność metanu	Zagrożenie metanowe
Tektonika	Brak szczelin i uskoków
Infrastruktura	Brak zabudowy

Przeprowadzone badania dowodzą pełnej wykonalności i atrakcyjności ekonomicznej procesu. W Polsce ze względu na duże zasoby geologiczne leżące po za zasięgiem górnictwa konwencjonalnego planowanie tego rodzaju inwestycji staje się w pełni uzasadnione. Projekty badawcze powinny zajmować się półtechnicznymi próbami zgazowania, działaniami koncepcyjnymi i opracowaniami teoretycznymi. W ramach programu HUGE na dniach ma ruszyć instalacja półtechniczna na pokładzie 310 kopalni doświadczalnej „Barbara”.

Wyniki tego projektu mają dostarczyć niezbędnej wiedzy na temat PZW w złożach krajowych. Bazując na aktualnych doświadczeniach i obserwując komercyjne zastosowanie procesu zgazowania, wdrożenie tej technologii w złożach krajowych może nastąpić za co najmniej 8-9 lat.

PZW, ZAGROŻENIA ŚRODOWISKA, SEKWESTRACJA CO_2

Oddziaływanie na wody, podziemne osiadanie terenu to najbardziej negatywne skutki procesu podziemnego zgazowania. Jeżeli osiadanie terenu jest na bardzo porównywalnym poziomie jak dla górnictwa tradycyjnego(maleje ze wzrostem głębokości), to w przypadku skażenia wód skutki mogą być katastrofalne. Dzieje się tak w przypadku znacznego i rażących zaniedbań podczas eksploatacji oraz podczas wyboru pokładów. Instalacje w Australii i Uzbekistanie pokazały, że proces może być w pełni bezpieczny. Wystarczy przestrzegać kilku reguł, a do skażenia nie dojdzie:
- zapewnienie dokładnej izolacji kanałów wiertniczych
- prowadzenie monitoringu otoczenia
- uniemożliwić kontakt generatora z wodą gruntową- prowadzenie zgazowania w półkach oddzielonych od warstw wodonośnych warstwą nieprzepuszczalną, lub utrzymywanie w reaktorze niższego niż atmosferyczne ciśnienia.

Ważnym aspektem jest redukcja zawartości dwutlenku węgla w strumieniu gazu surowego. Analizy wykazały, że w przypadku PZW najlepszą i najbardziej opłacalną metodą jest usunięcie CO_2 przed procesem spalania. Oczyszczenie z CO_2 ze względu na dużą ilość wodoru da możliwość wykorzystania gazu w ogniwach paliwowych. Wyeksploatowane złoża pozwalają dodatkowo na deponowanie wydzielonego dwutlenku węgla. Na przykład: w pokładzie na długości 200m, pozostają wolne przestrzenie o średnicy 5-8m. Powoduje to pozostałą objętość rzędu 4000- 1000 m^3. Z powodu zawału ścian i stropów możliwe jest wykorzystanie połowy objętości- nawet do około 3000t CO_2.

Sekwestracja jest jednak procesem, który wymaga dalszych badań, ze względu na zachowanie się skał z geomechanicznego i geochemicznego punktu widzenia.

EKONOMIA PROCESU PZW

Porównanie opłacalności instalacji zintegrowanych układach gazowo- parowych, kotłów pyłowych na parametry nadkrytyczne z instalacją gazowo- parową wykorzystującą gaz z podziemnego zgazowania jest trudne i należy je uznać tylko za porównanie szacunkowe [instalacje o mocy 280 MW]

Koszty	Kotły pyłowe	IGCC	PZW- IGCC
Budowa instalacji $/kW	1200-1460	1320- 1600	450
Wyprodukowanie energii $/MWh	46,6	49,9	12

Najprostszą i najekonomiczniejszą opcja jest zgazowanie powietrzem, i wykorzystanie niskokalorycznego gazu do produkcji energii elektrycznej w turbinie gazowej. W przypadku instalacji zgazowania połączonych z syntezą FT, również „wygrywa” zgazowanie podziemne.

O atrakcyjności podziemnego zgazowania węgla świadczy fakt o obniżeniu nakładów inwestycyjnych- w porównaniu do reaktorów powierzchniowych- nie powstają odpady takie jak żużel i popiół. Zanikają koszty transportu magazynowania i przygotowania węgla oraz konserwacji i utrzymania reaktora. Kolejnym pozytywnym aspektem, jest ograniczona emisja szkodliwych substancji do środowiska. Nie emituje się tlenków siarki i azotu, a emisja szkodliwej rtęci jest o połowę niższa. Ciągłe dostawy gazu do instalacji gwarantują dużą wydajność procesu i co najważniejsze nie musimy się martwić, że ktoś nie zdąży dostarczyć surowca do zgazowania.

ASPEKTY EKONOMICZNE

EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA UKŁADÓW ZAZOWANIA W CELU PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ.

Przedstawiona poniżej analiza uwzględnia uwarunkowania krajowe, dodatkowo przewidywane koszty emisji CO_2, zwiększające koszty produkcji energii elektrycznej. Koszty te mogą decydować o efektywności ekonomicznej technologii i muszą być rozpatrywane na linii emisji substancji takich jak dwutlenek węgla.

Mówiąc o analizie układu IGCC należy wspomnieć o opracowaniu firmy Mitretek, w którym rozpatrzono różne konfiguracje stosowanej technologii. **Pierwsza** z nich zawiera przyszłościowe elementy takie jak selektywne katalityczne utlenianie siarczków, oraz membranową separację powietrza na tlen i azot. Takie rozwiązania pozwolą uzyskać sprawność netto układu wynoszącą 48% i znaczne obniżenie kosztów inwestycyjnych. **Druga** zakłada całkowitą separację di tlenku węgla ze strumienia spalin. Do spalania stosuje się czysty tlen, który umożliwi łatwą separację układu spalin zawierających tylko parę wodną i CO_2.

Biorąc pod uwagę, że cena energii elektrycznej wynosi 140,8zł/MWh cena węgla 7 zł/ GJ o wartości opałowej 22MJ/kg (dane na 2005 rok) otrzymano wyniki zamieszczone w tabeli. Rozpatrywano trzy warianty:

I- Elektrownia IGCC, z przyznanymi limitami emisji CO_2

II- Elektrownia IGCC, ponosząca koszty emisji CO_2

III- Elektrownia IGCC, zainstalowany układ usuwania CO_2 ze składowaniem w górotworze.

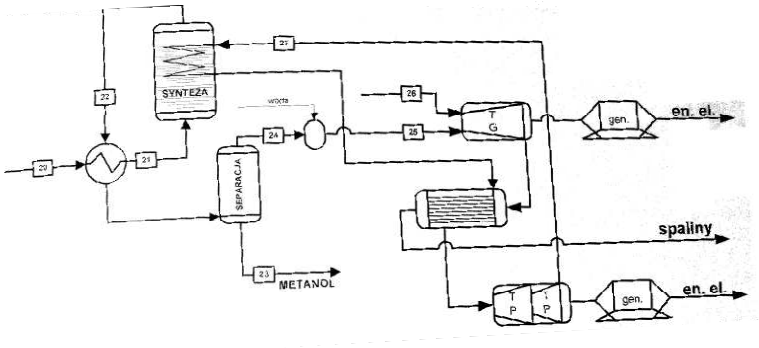
Współczynnik wykorzystania mocy wynosi 85%, a łączna wytwarzana moc wynosi 625 MW (365 MW turbina gazowa, 260 MW turbina parowa)

WYSZCZEGÓLNIENIE	Wariant		
	Pierwszy	Drugi	Trzeci
Nakłady inwestycyjne mln zł	1940	1940	2275
Moc netto	598	598	523
Współczynnik wykorzystania mocy %	85	85	85
Sprawność układu netto, %	48,3	48,3	41,7
Produkcja energii elektrycznej MWh/rok	4452708	4452708	3894258
Wskaźnik nakładów inwestycyjnych zł/kW	3244	3244	4349
Zużycie paliwa Mg/h	223	223	225
Emisja di tlenku węgla Mg/rok	4467600	4467600	223380
Koszty operacyjne mln zł.	371	371	392
Opłaty za emisję, mln zł	0	371	13
Koszty transportu i składowania mln zł	0	0	128
Amortyzacja, mln zł	97	97	114
Odsetki średnioroczne, mln zł	45	45	50
Koszty produkcji mln zł/rok	513	782	697
Koszty wykorzystania energii El. Zł/ MW	115	176	179
NPV mln zł	250	-1872	-1935

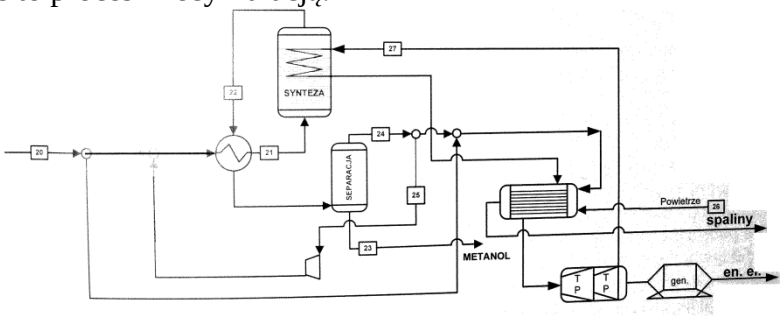
Z tabeli wynika że mimo przyjęcia stosunkowo korzystnych kosztów inwestycyjnych i wysokiej sprawności jedynie wariant podstawowy jest uzasadniony ekonomicznie. Analiza NPV na zmienność opłat za emisję CO_2 wykazuje, że wprowadzenie nawet niewielkich opłat za emisję może spowodować nieopłacalność inwestycji.

Istnieje możliwość skojarzenia produkcji energii elektrycznej z produkcją paliw ciekłych lub z produkcja metanolu. W tym przypadku rozpatrzono dwa układy poligeneracyjne połączone z syntezą metanolu:

Pierwszy zakłada jednokrotne przejście gazu syntezowego przez reaktor,



Drugi proces to proces z recyrkulacją.



WYSZCZEGÓLNIENIE	Wariant	
	Pierwszy	Drugi
Nakłady inwestycyjne mln zł.	2145	1967
Produkcja energii elektrycznej MWh/rok	2241991	453461
Produkcja metanolu, Mg/ rok	408934	968948
Koszty operacyjne, mln zł	315	315
Amortyzacja mln zł	133	122
Odsetki średnioroczne, mln zł	107	100
Koszty produkcji razem, mln zł/rok	555	537
Przychody ze sprzedaży metanolu, mln zł	549	1300
Przychody ze sprzedaży energii El. mln zł	316	64
Przychody razem mln zł/rok	865	1364
NPV mln zł	2121	5664

Warianty poligeneracyjne mogą być korzystne nawet w przypadku ponoszenia dodatkowych kosztów związanych z emisją CO_2. Produkcja metanolu z węgla wykazuje najwyższą efektywność ekonomiczną spośród analizowanych układów. Dopiero znaczny spadek cen metanolu może spowodować spadek opłacalności inwestycji.

PODSUMOWANIE

Biorąc pod uwagę interes krajowy mający na celu zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego i ekologicznego jego mieszkańców, należy stworzyć odpowiednie warunki technologiczne, ekonomiczne i polityczne wspomagające wdrażanie czystych technologii węglowych. Musimy pamiętać i wykorzystywać krajowe złoża węgla kamiennego w sposób racjonalny i efektywny. Zgazowanie jawi się jako szansa na wzrost sprawności produkcji energii!

Uważam, że powinno dojść do połączenia niektórych działów przemysłu chemicznego, wydobywczego i energetycznego w jeden zwany karbo- energo- chemią. Bez górnictwa nie moglibyśmy korzystać z energii węgla, wydobyć ją pozwalała od zawsze chemia, a od wielu lat też energetyka. Współpraca jest widoczna gołym okiem, ale może to wciąż za mało? Może czas przejść na wyższy poziom? Zintegrowane systemy produkcji gazu, paliwa i energii- to jest to!

Polska od lat węglem stała- skoncentrowanie źródeł energii wokół jednego rodzaju paliwa, które dla wielu było naszym przekleństwem. Może właśnie szaro- czarne „węglowe brzydkie kaczątko" już wkrótce zamieni się w czystego- śnieżno białego łabędzia? Może właśnie ten sam węgiel który towarzyszy nam od dzieciństwa jako czarny palny kamień, wepchnie Polską energetykę na tory czystej energii? My Polacy kochamy węgiel i niech tak zostanie! Pokłady są, technologie również, może już czas stworzyć odpowiednie warunki pracy, zakupić niezbędne licencje i rozpocząć zgazowanie?

Samo zgazowanie w aktualnych warunkach techniki- co pokazała analiza ekonomiczna- spędza sen z powiek wielu naukowcom. Należy zatem połączyć zgazowanie w celach czysto energetycznych, ze zgazowaniem w celach chemiczno wytwórczych. Współpraca produkcji gazu węglowego dla celów energetycznych z produkcją metanolu mogącego stać się paliwem do ogniw paliwowych zaczyna być tematem dominującym w kreowaniu wizerunku zgazowania. Zgazowanie jest szansą dla Polski, dla Polaków, a w szczególności dla terenów bogatych w węgiel kamienny, który jest niedostępny dla tradycyjnych technik wydobywczych.

Mam nadzieję, że ta praca przybliża choć trochę problematykę zgazowania węgla zarówno w reaktorach powierzchniowych jak i podziemnych. Problematykę zgazowania stanowiącego szansę dla energetycznych węgli jaworznicko- mikołowskich, będącego szansą dla środowiska, gdyż łatwiej jest oczyszczać gaz niż węgiel czy też produkty jego spalania. Zgazowanie daje szansę na bezpieczne i czyste jutro!

Na w pełni czystą energię z węgla nie ma szans, gdyż jest on surowcem nieodnawialnym w krótkim czasie- czasie życia człowieka. Zgazowaniu możemy poddać biomasę pochodzenia roślinnego, odpadowego, które w krótkim czasie potrafią się zregenerować. Niech zgazowanie węgla będzie pierwszym krokiem do poznania nowoczesnych metod wykorzystania paliw odnawialnych.

BIBLIOGRAFIA:

- „Zintegrowana karbo- energo- chemia”; Marek Ściążko , Alfred Tramer; POLITYKA ENERGETYCZNA TOM 8; Zeszyt specjalny ISSN 1429-6675

- „Czysta energia- produkty chemiczne i paliwa z węgla – ocena potencjału rozwojowego”; praca zbiorowa; ISBN 978-83-913434-6-3; Zabrze 2008

- „Energetyka a ochrona środowiska” ; Jerzy Kucowski, Damazy Laudyn, Mieczysław Przekwas; ISBN 83-204-2027-X; Wydawnictwa Naukowo- Techniczne

- „Czyste technologie użytkowania węgla” ; Krzysztof Stańczyk; ISBN 978-83-61126-15-7; Główny Instytut Górnictwa; Kraków 2008

- „Technologie Energetyczne”; Tadeusz Chmielniak; ISBN 978-83-204-3387-6; Wydawnictwa Naukowo- Techniczne

- „Koksownictwo”; Aleksander Karcz; Wydawnictwo AGH Kraków 1991.

- Materiały wykładowe prof. dr inż. Alaksandra Karcza z przedmiotu „Surowce energetyczne stałe i ich przetwarzanie” oraz „Surowce energetyczne gazowe i ich przetwarzanie”.