

Środowisko, technologia, ekonomia – czynniki określające perspektywę zagospodarowania polskich złóż węgla brunatnego z wykorzystaniem procesu zgazowania

Environment, technology, economics – the factors determining prospects of the use of Polish lignite deposits in a gasification process



*Dr inż. Stanisław Hajdo**



*Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kasztelewicz**



*Dr inż. Krzysztof Polak**



*Dr inż. Grzegorz Galiniak**



*Dr inż. Kazimierz Różkowski**

Treść: W artykule przedstawiono główne uwarunkowania technologiczno-złożowe i środowiskowe kwalifikacji złóż węgla brunatnego w Polsce przydatnych do podziemnego zgazowania. Uwarunkowania te określono przyjmując założenie, że ich spełnienie pozwoli na podziemne zgazowanie węgla, w wyniku którego uzyska się palny gaz palny możliwy do dalszego wykorzystania w procesach energetycznych lub chemicznej syntezy. Określone uwarunkowania (kryteria) mają charakter kryteriów wstępnych, gdyż w dotychczasowej historii podziemnego zgazowania na świecie nie są znane udane próby podziemnego zgazowania tego typu węgla brunatnych.

Abstract: This paper presents the main technological, geological and environmental conditions of qualification of brown coal deposits in Poland which are suitable for underground gasification. The conditions were determined by assuming that the coals would meet them and can undergo the underground gasification process, resulting in the production of combustible gas suitable for further use in energy generation processes or chemical synthesis. The presented conditions (criteria) are only preliminary, as in the world's history of underground gasification there were no successful attempts of gasification of this type of brown coal.

Słowa kluczowe:

węgiel brunatny, podziemne zgazowanie węgla

Key words:

brown coal, underground coal gasification

*) AGH w Krakowie

1. Wprowadzenie

Istotnym problemem strategicznym dla Polski jest zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego. Wśród rozpatrywanych elementów tego zabezpieczenia centralne miejsce zajmuje wykorzystanie krajowych surowców energetycznych, głównie węgla brunatnego i węgla kamiennego. W Polsce ponad 90 % energii elektrycznej produkowane jest w oparciu o spalanie węgla. Przy czym sam węgiel brunatny (wydobycie blisko 60 mln Mg rocznie) dostarcza w kraju ponad 33 % relatywnie najtańszej energii elektrycznej. Polska jest jednym z krajów, które posiadają udokumentowane i wciąż niezagospodarowane duże bilansowe zasoby węgla brunatnego. W naszym kraju rozpoznano ponad 150 złóż i obszarów węglonośnych, udokumentowano ponad 20 mld Mg zasobów w złożach pewnych, ponad 60 mld Mg w zasobach oszacowanych, a możliwości występowania paliwa w obszarach potencjalnie węglonośnych ocenia się na ponad 140 mld Mg. Jednak nie ma wątpliwości, że aby utrzymać obecny udział produkcji energii elektrycznej w bilansie energetycznym kraju z tego najtańszego źródła energii, należy wprowadzać tzw. czyste technologie węglowe. Już dzisiaj można to osiągnąć poprzez gruntowne modernizacje starych bloków energetycznych, czy też budując nowe bloki o sprawności netto dochodzącej do 45 % przy nadkrytycznych parametrach pary. Obiecującą technologią jest także produkcja energii elektrycznej w układach gazowo-parowych, zintegrowanych ze zgazowaniem węgla (IGCC). Naziemne zgazowanie węgla brunatnego w oparciu o technologię IGCC może być kierunkiem rozwoju energetyki wielkich mocy łączącym możliwość wykorzystania strategicznych zasobów, tj. węgla i gazu ziemnego konwencjonalnego lub niekonwencjonalnego. Niemniej istotnym oraz ważnym zagadnieniem jest odpowiedź na pytanie, czy w Polsce istnieje alternatywa dla dotychczasowego zagospodarowania złóż węgla brunatnego w oparciu o technologię innowacyjną, za jaką w niektórych kręgach uważane jest podziemne zgazowanie węgla. Mała skala zastosowania tej technologii w świecie i brak własnych doświadczeń sprawia, że wiarygodna odpowiedź na to pytanie jest jeszcze odległa w czasie. Zastosowanie technologii podziemnego zgazowania możliwe jest tylko w określonych warunkach górniczo-geologicznych i środowiskowych (kryteriach) zalegania zasobów węgla przeznaczonych do zgazowania. Skala zagospodarowania natomiast zależy będzie od wielkości zasobów złóż nadających się do zgazowania, czyli spełniających te warunki. Zależy ponadto od możliwości zastosowania i opanowania tej technologii w zakresie najlepszych dostępnych praktyk mogących zapewnić racjonalność ekonomiczną oraz akceptowalność środowiskową i społeczną [6, 7, 8]

Dla każdej z wymienianych technologii konieczny jest dostęp do tego paliwa, jakim są złoża węgla brunatnego. Duże zasoby tej kopaliny umożliwiają określenie bardzo wielu wariantów ich wykorzystania w przyszłości, ale już dzisiaj należy dokładać wszelkich starań, aby móc w pełni wykorzystać ich potencjał. Chodzi tu głównie o zabezpieczenie złóż, które powinny być traktowane jako trwały zasób strategiczny kraju, objęty szczególną ochroną prawną.

W artykule prezentuje się najważniejsze uwarunkowania technologiczno-złożowe, środowiskowe oraz ekonomiczne kwalifikacji złóż węgla brunatnego do podziemnego zgazowania.

2. Istota i uwarunkowania metody podziemnego zgazowania węgla

Zgazowanie jest procesem chemicznym zmiany paliwa stałego lub ciekłego w palny gaz, który może być wykorzy-

stany do produkcji energii cieplnej lub elektrycznej albo służyć do produkcji surowców do produktów chemicznych, takich jak wodór, metanol czy gaz syntetyczny. Na świecie istnieje ponad 160 dużych instalacji zgazowania, jednak są to powierzchniowe instalacje zgazowania węgla wydobywanego konwencjonalnymi metodami. Produkują one równowartość około 50 tys. MW syngazu [12]. Natomiast podziemne zgazowanie węgla polega na zmianie fazy stałej w mieszaninę gazów palnych bezpośrednio w złożu. Część warstwy węglowej, w której zachodzi proces zgazowania stanowi tzw. gazogenerator. Połączenie z powierzchnią odbywa się za pomocą wyrobisk doprowadzających media zgazowujące (powietrze, tlen i/lub parę wodną) i odprowadzających powstałą mieszaninę gazów palnych na powierzchnię (otworów pionowych, otworów kierunkowych, wyrobisk podziemnych pionowych i poziomych).

Istota metod geotechnologicznych polega na nieskomplikowanym sposobie udostępniania złoża. Eksploatację prowadzi się najczęściej przy wykorzystaniu otworów wiertniczych, z czego wynika wiele udogodnień, ale także i problemów. W dotychczasowej, blisko stoletniej, praktyce podziemnego zgazowania węgla (PZW) na świecie, otwory były wiercone w różnych konfiguracjach rozmieszczenia i nachylenia. Eksploatacja pionowymi otworami ewoluowała od pojedynczych gazogeneratorów do rozmieszczenia otworów zasilających i odbierających w regularnej siatce o module do 25 m. Rozwój techniki wiercenia otworów spowodował opracowanie i zastosowanie gazogeneratorów z kombinacją otworów pionowych inicjujących (lub odbierających) i kierunkowych z podciąganiem rur zasilających i odbierających. Daje to możliwość istotnego zwiększenia odległości między otworami, przez co eliminuje się ich usytuowanie w obszarze kumulacji naprężeń w osiadającym nadkładzie nad zgazowanym złożem, a tym samym ogranicza istotnie możliwość ich zniszczenia. Przemieszczanie się czynników zgazowujących węgiel, a później gazu w złożu, wykorzystuje naturalną gazoprzepuszczalność złoża węgla, która dodatkowo zwiększa się wskutek ubytku masy węgla oraz na skutek przepływu wód podziemnych przez strefę zgazowaną [6]. Często konieczne jest wykonywanie specjalnych połączeń i otworów w celu uformowania kanału zgazowania. Szczegółowe rozwiązania techniczne przedstawiono w wielu pracach [5, 7, 13, 14]

Zarysowana istota procesu podziemnego zgazowania węgla jako technologii zagospodarowania złóż węgla dla produkcji gazu energetycznego, w odniesieniu do metod konwencjonalnych jego eksploatacji ma wiele zalet i wad, które zostały wypunktowane w wielu publikacjach. Jednakże właśnie wady technologii PZW będą głównymi czynnikami, które trzeba uwzględnić przy określeniu kryteriów technologicznych i złożowych dla weryfikacji krajowej bazy złóż węgla brunatnego, by zapewnić możliwość ich neutralizacji. Wśród wad podziemnej gazyfikacji węgla wymienić należy m.in. [6]:

- brak pełnej kontroli procesu eksploatacji na poziomie podobnym, jak w przypadku metod konwencjonalnych bądź zgazowania prowadzonego na powierzchni;
- wpływ na środowisko naturalne (zanieczyszczenie warstw wodonośnych produktami spalania, osiadanie powierzchni terenu);
- działania trujące i własności wybuchowe powstających substancji gazowych;
- ograniczone możliwości reakcji na powstające zagrożenie dla środowiska, wynikające z opóźnionej w czasie kontroli skutków środowiskowych eksploatacji;
- wahania stabilności procesu podziemnego zgazowania w czasie, powodujące problemy w utrzymaniu stałej jakości produktu końcowego.

W odniesieniu do metod konwencjonalnych podziemne zgazowanie posiada również i zalety [4]:

- mniejsze koszty i krótki czas udostępniania, co umożliwia eksploatację złóż pozabilansowych dla konwencjonalnych metod wydobywania;
- mniejszy zakres przekształceń powierzchni terenu (eksploatacja selektywna);
- brak konieczności wydobywania i składowania skał płonnych w postaci odpadów na powierzchni terenu;
- brak konieczności transportu węgla na powierzchnię;
- brak powierzchniowych instalacji zgazowania;
- pozostawienie produktów spalania pod powierzchnią ziemi;
- redukcja emisji zanieczyszczeń do środowiska SO_x , NO_x , metali ciężkich i pyłów;
- możliwość składowania CO_2 w pustkach poeksploatacyjnych.

3. Ocena możliwości zastosowania zgazowania podziemnego złóż węgla brunatnego w Polsce

W dotychczasowej ponad stuletniej historii doświadczeń podziemnego zgazowania węgla pracowało kilkadziesiąt instalacji testowych i pilotowych o czasie prowadzenia eksperymentów od kilkunastu dni do kilku lat [1, 3, 4, 6, 13, 14]. Tylko pojedyncze instalacje przemysłowe pracowały w dłuższym czasie, tj. do kilkudziesięciu lat. Choć przeważająca większość prób dotyczyła zgazowania węgla kamiennego, to najbardziej optymistyczne rezultaty osiągnięto jednak przy zgazowaniu węgla brunatnego (Angren, Zagłębie Podmoskiewskie, Chinchila – Australia) [7, 8] Zestawienie najistotniejszych realizacji podziemnego zgazowania węgla brunatnego i jego niektórych parametrów jakościowych przedstawiono w tablicy 1.

Przez określenie „węgiel brunatny”, które w Polsce jest określeniem tradycyjnym i potocznym, należy rozumieć w pojęciu klasyfikacji międzynarodowej (UN-ECE) orto-lignity, meta-lignity i węgla subbitumiczny, czy też wg DIN węgiel brunatny miękki, matowy i błyszczący, których wartość energetyczna zawarta jest w przedziale $6,7 \text{ MJ/kg} \div 25 \text{ MJ/kg}$ [15]. Złóża, na których prowadzono udane próby PZ odpowiadały zazwyczaj węglom brunatnym matowym opisywanym w klasyfikacji DIN, a w klasyfikacji UN-ECE, meta-lignitom. Natomiast krajowe węgle brunatne, wg klasyfikacji DIN, zaliczane są przeważnie do węgla miękkich odpowiadających w skali UN-ECE orto-lignitom. Z przeprowadzonych studiów literaturowych wynika, że w dotychczasowej praktyce podziemnego zgazowania nie prowadzono udanych eksperymentów czy prób przemysłowych podziemnego zgazowania o większej skali, na złóżach o wartości energetycznej odpo-

wiadającej polskim złóżom węgla brunatnego. W prowadzonych próbach zgazowania na złożu Sinelnikowski wartość opałowa węgla wynosiła tylko $8,0 \text{ MJ/kg}$. Niestety brak jest szczegółowych danych dotyczących uzysku gazu, a nawet informacji czy eksperyment w ogóle się powiódł. Natomiast w literaturze rosyjskojęzycznej niepublikowanej, sformułowane były oceny, że proces podziemnego zgazowania na złóżach o ciepłe spalania poniżej 10 MJ/kg zachodzi trudno. Fakt ten wskazuje, że mimo podatności na zgazowanie naszych węgla brunatnych, ograniczone możliwości kontroli i przebiegu zgazowania pod ziemią mogą być główną barierą aplikacji tej metody dla ich zagospodarowania. Wyniki analizy dotychczas zrealizowanych eksperymentów podziemnego zgazowania węgla brunatnego wskazują, że w pełni udane próby zgazowania prowadzono dotychczas:

- na złóżach zalegających na głębokościach do max. 250 m,
- na złóżach o stosunkowo niedużej miąższości, w zakresie od 0,5 do 24 m, eksploatacja pokładów o miąższości poniżej 1 m stwarzała problemy techniczne, Ponadto w udanych eksperymentach:
- minimalna wartości opałowa węgla wynosiła $11,8 \text{ MJ/kg}$.
- najbardziej korzystne rezultaty eksperymentów uzyskiwano dla meta-lignitów i węgla podbitumicznych, tzn. o wartości opałowej powyżej 15 MJ/kg , a także węgla bitumicznych o wartości opałowej dochodzącej do 25 MJ/kg .
- zgazowywane węgle charakteryzowały się ponadto wilgotnością, zawartością popiołu i zawartością substancji lotnych zazwyczaj poniżej 35 %.

Na podstawie wyników z większości prowadzonych na świecie projektów podziemnego zgazowania węgla sformułowano kryteria technologiczno-złożowe i środowiskowe określające warunki prowadzenia podziemnego zgazowania węgla, czyli także stanowiące kryteria dla kwalifikacji złóż dla tego sposobu zagospodarowania. Nie są to kryteria zgeneralizowane, lecz tylko uwzględniające specyfikę złóż w rejonie podziemnej gazyfikacji i miejscowe uwarunkowania środowiskowe charakterystyczne dla regionu świata, w którym eksperymenty były prowadzone [16]. Wobec braku dotychczas jednoznacznego potwierdzenia praktycznej możliwości zgazowania podziemnego węgla brunatnych miękkich, odpowiadających występującym w Polsce typom, najważniejszym powinno być przygotowanie programów badawczych i eksperymentów podziemnego zgazowania na wytypowanych złóżach węgla brunatnego.

Skuteczne, stabilne i bezpieczne sterowanie procesem podziemnego zgazowania oraz minimalizacja wystąpienia zakłóceń i ich negatywnego oddziaływania na środowisko wymaga szczegółowej znajomości budowy geologicznej złoża i równie szczegółowego rozpoznania warunków hydrogeologicznych w jego otoczeniu. Należy tu podkreślić,

Tablica 1. Parametry jakościowe węgla w eksperymentach podziemnego zgazowania [6]

Table 1. Quality parameters of coal during the experiments of underground gasification [6]

Lokalizacja/Nazwa	Rodzaj węgla UN-ECE	Wilgotność węgla %	Zawartość popiołu %	Substancje lotne %	Wartość energetyczna węgla MJ/kg
Józno-Abińsk	Subbitumiczny	2,5 ÷ 8,0	2,3 ÷ 5,2	27,0 ÷ 32,0	21,0 ÷ 25,0
Lisiczańsk	Subbitumiczny	12,0 ÷ 15,0	7,0 ÷ 17,0	39,0 ÷ 40,0	20,0 ÷ 23,0
Chinchila	Subbitumiczny	10,0	19,3	40,0	23,0
Taszkient (Angren)	Meta-lignite	35,0	12,2	33,0	15,1
Tula, Podmoskownaja 1	Orto-lignite	30,0	34,3	44,5	11,8
Szatsk, Szatskaja 1	Orto-lignite	30,0	26,0	38,1	11,1
Sinelnikowsk	Orto-lignite	55,0	23,8	65,5	8,0

że krajowe złoża węgla brunatnego występują w obszarach wielopoziomowych i nieciągłych struktur piętra czwartorzędowego i neogeńskiego, w kontakcie hydraulicznym z poziomami wodonośnymi piętra kredowego i jurajskiego. W wyniku podziemnego zgazowania tych złóż mogą także powstać lokalne ograniczenia ilościowe w dostępności do zasobów wód podziemnych o dobrym stanie chemicznym w użytkowych poziomach wodonośnych. Kryteria związane z minimalizacją negatywnego wpływu procesu na środowisko powiązane są ściśle z izolowaniem gazogeneratora i hermetyzacją względem otoczenia skalnego i horyzontów wodonośnych oraz powierzchni. Konieczność tej hermetyzacji wynika nie tylko z aspektów technologicznych ochrony gazogeneratora, ale także ze względów środowiskowych. Przez kryteria fizjograficzne i środowiskowe należy rozumieć ograniczenia formalne i parametryczne wynikające z ustaleń wiążących aktów prawnych krajowych i UE, które mają na celu eliminację lub zmniejszenie stopnia zagrożenia podziemnym zgazowaniem węgla dla jakości wód podziemnych, użytkowych poziomów wodonośnych, wód powierzchniowych i powierzchni ziemi w odniesieniu do chronionych ekosystemów łądowych, użytków rolnych, łąkowych i leśnych oraz dla infrastruktury osadniczej, drogowej i budowlanej [5, 10]. Dla zachowania dobrego ilościowego i chemicznego stanu wód podziemnych na potrzeby zaopatrzenia ludności w wodę do spożycia, a także decydujących o stanie wód powierzchniowych i ekosystemów łądowych i wodnych, wymagane jest sformułowanie kryteriów odległości rejonu podziemnego zgazowania od stref potencjalnych kontaktów hydraulicznych pionowych i bocznych między poszczególnymi poziomami wodonośnymi, od kontaktów hydraulicznych wód podziemnych z wodami powierzchniowymi, od stref potencjalnych dróg migracji produktów termicznej gazyfikacji węgla brunatnego. W tym zakresie kryteriami fizjograficznymi i środowiskowymi winny być następujące kryteria [5, 10]:

- nieprzepuszczalności nadkładu bezpośredniego,
- stopnia izolacji poziomów wodonośnych,
- odległości od zbiorników wód podziemnych mających znaczenie dla obecnego i przyszłego zaopatrzenia w wodę do spożycia i do produkcji żywności.
- odległości od podziemnych ujęć wody,
- odległości od struktur uskokowych jako potencjalnych dróg migracji zanieczyszczeń,
- odległości od wód powierzchniowych (rzek, jezior naturalnych i sztucznych),
- odległości od obszarów systemu ochrony przyrody Natura 2000 i korytarzy ekologicznych, czyli obszarów specjalnej ochrony ptaków i obszarów mających znaczenie dla ochrony przyrody,
- odległości od parków krajobrazowych i obszarów chronionego krajobrazu,
- odległości od sąsiednich obszarów górniczych,
- odległości od sieci osadniczych, liniowych i przestrzennych obiektów zagospodarowania na powierzchni terenu.

Z innych kryteriów fizjograficznych i środowiskowych formalnych wymienić należy kryterium eliminacji podziemnego zgazowania węgla ze złóż węgla brunatnego na terenach mających klasę bonitacyjną gleby I-IV, która powinna podlegać ochronie, a także z terenów większych kompleksów leśnych. Określenie i spełnienie tych kryteriów daje gwarancje uzyskania pozytywnych raportów OOS, które są wymagane na różnych etapach przygotowania i realizacji projektów PZW. Ograniczeniem dla stosowania PZW są dyrektywy, które wymagają dążenia do osiągnięcia, co najmniej dobrego stan wód, ekologicznych ich funkcji oraz ekosystemów łądowych i z terenów podmokłych zależnych od wód. Środkiem prowa-

dzającym do tego celu jest określenie i wdrożenie koniecznych przedsięwzięć ochronnych. Tam, gdzie stan czystości wody jest dobry, powinien zostać utrzymany, a znaczący i utrzymujący się trend wzrostu stężenia jakiegokolwiek zanieczyszczenia, powinien zostać zidentyfikowany i odwrócony przez długoterminowe planowanie i zastosowanie przedsięwzięć ochronnych prowadzących do odtworzenia pożądanego stanu wód podziemnych. W tej chwili brak jest wiarygodnych ocen podziemnego zgazowania węgla od strony kosztowej, a zatem także nie wiadomo, jaka jest możliwość działań kompensacyjnych w zakresie niwelowania niekorzystnego wpływu na środowisko i osiągnięcia racjonalności ekonomicznej metody. Rozpatrując charakterystykę hydrogeologiczną warstw, konieczna jest obecność w stropie i spągu pokładu węgla utworów o niskiej przepuszczalności, najlepiej zwężonych, odkształcających się plastycznie, bądź w przypadku osadów skonsolidowanych, o dużej wytrzymałości.

Analiza światowej literatury wykazała istnienie opinii sugerujących, że pod względem infrastruktury powierzchniowej kryteria lokalizacji PZW powinny odpowiadać założeniom zdefiniowanym dla zakładów górniczych eksploatujących kopaliny metodą podziemną natomiast infrastruktura przesyłowa winna być objęta takimi obostrzeniami, jak instalacje przesyłowe gazu [6].

Przegląd literatury oraz analiza poszczególnych przypadków w zakresie wyników produkcji gazu z instalacji podziemnego zgazowania węgla oraz wpływu na środowisko naturalne, pozwoliła na wskazanie kryteriów selekcji w postaci katalogu (karty) dziesięciu najważniejszych wymagań technologiczno-złożowych i środowiskowo-fizjograficznych będącego podstawą do kwalifikacji polskich złóż węgla brunatnego do podziemnego zgazowania (tabl. 2). Kryteria te powinny mieć także zastosowanie zarówno przy wyborze złóż węgla brunatnego do przeprowadzenia prac pilotowych, jak i doświadczalnych. Jako najważniejsze kryteria uznano:

- minimalną głębokość zalegania pokładu, od której można prowadzić podziemne zgazowanie węgla (określono jako 130 m),
- minimalną miąższość zgazowywanego pokładu (powyżej 2 m),
- niezbędną izolacyjną miąższość nieprzepuszczalnych warstw nad stropem pokładu węgla w powiązaniu z jego miąższością.

Mając na uwadze przeprowadzoną analizę i syntezę światowych wyników badań eksperymentalnych i przemysłowych podziemnego zgazowania węgla brunatnego oprócz sformułowanych najważniejszych uwarunkowań technologiczno-złożowych należy wziąć pod uwagę stosowane w Polsce kryteria środowiskowe oraz fizjograficzne w zakresie eksploatacji złóż surowców stałych. W tym zakresie proponuje się następujące rodzaje kryteriów dotyczących planowanych eksperymentów i doświadczeń pilotowych w zakresie podziemnego zgazowania węgla brunatnego:

- odległość do zbiorników wód podziemnych – brak GZWP w sąsiedztwie, brak poziomów użytkowych.
- minimalna odległość do rzek i zbiorników wodnych – brak rzek nad obszarem eksploatacji, 1 km od powierzchniowych zbiorników wodnych.
- mała gęstość zaludnienia i ograniczona działalność człowieka w najbliższym sąsiedztwie.
- odległość do eksploatowanych kopalń – min. 2 km.
- odległość do zamkniętych kopalń – 1 km.
- większe przewyższenia przeważającej powierzchni terenu złożowego ponad poziomem wody w ciekach drenujących ten teren jest czynnikiem korzystnym przy tworzeniu rankingu złóż.

Tablica 2. Proponowane kryteria technologiczno-złożowe dla określenia potencjalnej bazy złożowej węgla brunatnego przydatnej do podziemnego zgazowania
Table 2. Technological and geological criteria proposed for the determination of the potential deposit source of brown coal suitable for underground gasification

Lp.	Kryterium	Zakres zmienności
1	Typ węgla i właściwości fizykochemiczne: a – wartość opałowa b – zawartość części lotnych c – zawartość popiołu d – wilgotność naturalna e – zawartość siarki	wartość minimalna – nie określona (od 6,5 MJ/kg) poniżej 50 % poniżej 20 % ewentualnie 25 % poniżej 55 % poniżej 4,0 %
2	Miąższość pokładu: a - minimalna b - maksymalna	2 m, 4 m optymalna uzależniona od warunków izolacyjności hydraulicznej oraz konieczności jej ochrony oraz od ochrony konstrukcji otworów (sterowanie osiadaniem nadkładu)
3	Głębokość zalegania: – minimalna	powyżej 150 m* - poniżej wymyć erozyjnych i rynien glacictektonicznych w złożach pozbawionych glacictektoniki głębokość może być mniejsza
4	Rodzaj złoża: a - jednopokładowe b - wielopokładowe	preferowane możliwe przy zaawansowanej technologii (np. z podsadzaniem) odległość między pokładami >20m
5	Wskaźnik nadkładu N:W:	> 12 (10) przy zaleganiu stropu złoża do głębokości 350 m**
6	Kąt nachylenia pokładu	poziome lub lekko nachylone
7	Warunki izolacyjności pokładu od skał otoczenia	skały stropowe pokładu w postaci bardzo słabo przepuszczalnych utworów typu ily, mułki ($k \leq 9 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$) o miąższości $\geq 10 \div 20 \text{ m}$; 2,8 miąższości pokładu)**
8	Warunki hydrogeologiczne: a - usytuowanie względem poziomów wodonośnych b - wielkość dopływu wody do pokładu	poniżej użytkowych poziomów wodonośnych i poza GZWP, minimalna odległość 40m. poniżej 2 m³/ Mg węgla bez dodatkowych zabiegów odwadniania
9	Tektonika	brak szczelin i uskoków – niewskazana obecność istotnych zaburzeń tektonicznych w obrębie pól eksploatacyjnych
10	Porowatość skał otaczających	skały w stropie i spągu powinny mieć mniejszą gazoprzepuszczalność niż pokład węgla, miąższość słaboprzepuszczalnych skał otaczających pokład węgla powinna wynosić 1÷2 m dla 2 m pokładu węgla lub miąższość 2÷4 m dla 3÷10 m pokładu węgla **
11	Wielkość zasobów	dla instalacji pilotowej wymagane zasoby to 75 ÷ 450 tys. Mg , przy komercjalizacji projektu należy zapewnić minimalne zasoby na poziomie 3,5 Mt**
12	Własności filtracyjne ośrodka skalnego	Stosunek porowatości pokładu węgla do porowatości otaczających go skał nie powinien być mniejszy niż mD 18:20**
Lokalizacyjne		
13	Powierzchnia terenu pod instalację PZW	minimalna powierzchnia dla instalacji pilotowej to 50 ÷ 100 ha (0,5÷1 km ²), dla instalacji komercyjnej powyżej 100 ha**
14	Warunki bezpieczeństwa	minimalna odległość od: terenów zamieszkałych (1÷3 km), rzek i jezior (1÷3 km), obszarów chronionych (5 km), pracujących kopalń/terenów eksploatacji górniczej (5 km), nieczynnych kopalń/wyrobisk (3 km), przewodów przesyłowych i linii kolejowych (1÷3 km)**

* w szczególnych przypadkach braku glacictektoniki warunki mogą być mniej restrykcyjne

** kryteria według Cuprum

* in specific cases of the lack of glacial tectonics the conditions may be less restrictive

** criteria according to Cuprum

Pojawienie się konfliktu ze środowiskiem naturalnym, lub potrzeba ochrony powierzchni ze względu na istniejącą infrastrukturę w sposób automatyczny ogranicza możliwość zagospodarowania złoża. W przypadku szczególnie cennych przyrodniczo obszarów, objętych ochroną prawną w ramach parków krajobrazowych, narodowych, rezerwatów, obszarów Natura 2000, czy innych form ochrony, w warunkach ograniczonych możliwości zagospodarowania powierzch-

ni, lokowanie instalacji staje się praktycznie niemożliwe. W przypadku, gdy ze względu na nadrzędny interes publiczny związany z realizacją przedsięwzięcia, pogorszenie stanu wód podziemnych i środowiska jest nie do uniknięcia, oraz gdy nie ma korzystniejszych rozwiązań alternatywnych – technicznie i ekonomicznie możliwych do zastosowania – niezbędne są działania kompensacyjne w odniesieniu do objętych ochroną elementów środowiska i użytkowników wód do spożycia.

Kolejnym czynnikiem decydującym o możliwości zastosowania w warunkach polskich metody eksploatacji polegającej na podziemnej gazyfikacji węgla brunatnego jest strategia górnictwa węgla brunatnego i oparta na nim polityka energetyczna kraju. Wydobycie węgla brunatnego przez kopalnie odkrywkowe, które są powiązane układem sztywnym z elektrowniami, powoduje, że eksploatowane zasoby muszą być w pierwszej kolejności przypisane i przeznaczone dla tej technologii. Obecnie poziom techniczny elektrowni opalanych tym paliwem spełnia współczesne wymagania, stawiane konwencjonalnym technologiom. Z tych właśnie względów, oceniając polskie zasoby węgla brunatnego nadające się do zagospodarowania w procesie zgazowania, zweryfikowano potrzeby obecnej energetyki, opartej na węglu brunatnym, pozyskiwanym metodami klasycznymi (metodą odkrywkową), w zależności od możliwych do zrealizowania strategii rozwoju górnictwa węgla brunatnego. Istniała więc konieczność przeprowadzenia analizy tych strategii w celu określenia ostatecznej bazy zasobowej węgla brunatnego dla potrzeb zgazowania. Węgiel brunatny do celów energetycznych wydobywany jest obecnie w czterech zagłębiach górniczo-energetycznych: adamowskim, bełchatowskim, konińskim i turoszowskim. W każdym z tych zagłębi eksploatacja tego surowca prowadzona jest metodą odkrywkową. Średnie roczne wydobycie węgla brunatnego w Polsce kształtuje się na poziomie 60 mln Mg. Analizując stan zasobów przemysłowych, a więc takich, na które kopalnie posiadają koncesje na wydobywanie, umożliwią one pracę tych kopalń przez kolejne 22 lata. Jednak ze względu na wyczerpywanie się zasobów w dwóch zagłębiach (konińskim i adamowskim) obecny poziom wydobycia może zostać utrzymany tylko do początku 2022 r. [2, 11, 17, 18]. Analizując więc stan zasobów przemysłowych, jak również obecne scenariusze wykorzystania zasobów ze złóż, na które kopalnie posiadają koncesje można zauważyć, że scenariusze te w pełni podporządkowane są zaspokojeniu dostaw do pobliskich elektrowni, zarówno istniejących bloków jak i tych planowanych (m.in. 450 MW w PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. Oddział Elektrownia Turów). Realnym scenariuszem dalszego wykorzystania zasobów węgla brunatnego do celów energetycznych jest zagospodarowanie złóż satelickich czynnych zagłębi górniczo-energetycznych. Złóża te, z uwagi na ich położenie geograficzne, można przypisać do odpowiednich zagłębi:

- adamowskiego: Grochowy-Siąszyce, Piaski oraz Rogóźno,
- bełchatowskiego: Złoczew,
- konińskiego: Ościsłowo, Mąkoszyn-Grochowiska i Dęby Szlacheckie-Izbica Kujawska,
- turoszowskiego: Radomierzyce.

Zagospodarowanie nowych złóż poza dotychczasowymi zagłębiami górniczo-energetycznymi węgla brunatnego jest częścią opracowanego tzw. scenariusza optymistycznego rozwoju działalności górnictwa węgla brunatnego w Polsce w kontekście zgazowania węgla. Perspektywiczne złoża zostały umownie podzielone na trzy rejony:

- lubuski,
- legnicki,
- centralnej Polski.

4. Podsumowanie

Rekomendowane na obecnym etapie rozpoznania technologii podziemnego zgazowania węgla brunatnego kryteria weryfikacji polskich złóż pod kątem możliwości takiego ich kierunku zagospodarowania należy traktować jako wstępne. Pozwalają one jednak na wskazanie potencjalnych złóż do zagospodarowania w oparciu o technologie podziemnego zga-

zowania węgla i szacunkowe określenia wielkości zasobów przemysłowych i operacyjnych.

Ich uściślenie i pogłębiona analiza będą możliwe etapowo, dopiero po pierwszych próbach przemysłowych w skali instalacji pilotowych i półtechnicznych i dalszej weryfikacji modeli teoretycznych opisu zjawisk występujących w otoczeniu gazogeneratora (gazogeneratorów).

Dalsze wykorzystanie węgla brunatnego uzależnione jest od wielu czynników, jednak najważniejszym z nich są wyzwania stawiane przez politykę klimatyczną UE, skupiającą się na ograniczeniu emisji CO₂. Jej realizacja będzie powodowała poważne implikacje ekonomiczne. Z uwagi na to, jedynym sposobem na utrzymanie znaczącej roli węgla brunatnego w wytwarzaniu energii elektrycznej w Polsce jest budowa nowoczesnych bloków energetycznych pracujących na podstawowe obciążenie (około 7000 godzin/rok) o sprawności wytwarzania netto zbliżonej do 45 %, a w niedalekiej przyszłości do 50 %. Dużą szansę należy także upatrywać w blokach o technologii hybrydowej z układem gazowo-parowym o sprawności około 60 %. Bloki te powinny pozwolić w przyszłości na wykorzystanie syngazu ze zgazowania węgla brunatnego w połączeniu z gazem ziemnym. Powyższa technologia wykorzystania węgla brunatnego, zaliczana do tzw. „czystych technologii węglowych”, powinna umożliwić w przyszłości na zagospodarowanie wielu perspektywicznych złóż węgla brunatnego w Polsce w XXI wieku. W związku z potrzebami zabezpieczenia dostaw węgla do obecnie istniejących elektrowni można stwierdzić, że w przypadku eksploatowanych już złóż trudno będzie znaleźć rezerwy węgla, które mogą zostać przeznaczone dla zgazowania węgla. Najszerzą perspektywę potencjalnego wykorzystania węgla oraz długoletni dostęp do tego rodzimego surowca dałoby zbudowanie nowych zagłębi górniczo-energetycznych w rejonie lubuskim bądź legnickim. Złóża w tych rejonach są jednymi z największych złóż w Europie i gwarantowałyby bezpieczeństwo energetyczne na co najmniej kolejne 50 lat. Warto rozważyć także zagospodarowanie złoża w rejonie Legnica-Ścinawa lub mniejszych złóż rejonu centralnej Polski, na których, w szczególnie sprzyjających warunkach środowiskowych oraz technologicznych, można będzie przeprowadzić pierwsze próby przemysłowych instalacji podziemnego zgazowania węgla. Bez względu na przyszłe propozycje inwestycji w odkrywkową eksploatację złóż dla tradycyjnych bloków energetycznych wysokiej sprawności, czy też dla układów gazowo-parowych lub w końcu dla podziemnego zgazowania, należy w racjonalny sposób wykorzystać posiadane zasoby.

Praca została wykonana w ramach Zadania Badawczego nr 3 pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

Literatura

1. Arens W.Ż., Semenenko D.K.: Fiziko-chemiczne metody rozrabotki miastorożdżenij kaustobiolitow, Gosudarstwiennyj Nauczno-Issledowatielskij Institut Gornochimiczieskowo Syria. Moskwa 1971. (pod redakcją akad. N.W. Mielnikowa).
2. Bednarczyk J. Nowak A.: Strategie i scenariusze perspektywicznego rozwoju produkcji energii elektrycznej z węgla brunatnego w świetle występujących uwarunkowań. Górnictwo i Geoinżynieria. Rok 34. Zeszyt 4. Kraków 2010.

3. *Creedy, D. P., Garner K., February.*: Clean Energy from Underground Coal Gasification in China. DTI Cleaner Coal Technology Transfer Programme, Report No. COAL R250, DTI/Pub URN 03/1611, 2004.
4. *Fyodorov N.A., Kreinin E.V., Zvygiantsev K.N.*: Underground coal gasification and its application in world practice. Energy resources of the world 27- th nt. Geol. Congress. Coll 02 Reports vol. 2, p. 121- 133. PO Nauka. Moscow 1984.
5. *Gautam N. N.*: Underground Coal Gasification - Application In The Country. 1st Asian Mining Congress, 2006, Kolkata, India 2006.
6. *Hajdo i inni.*: Sprawozdanie merytoryczne dla NCBiR z Części tematu badawczego 1.4.1. pt.: Analiza wyników eksperymentalnych dotyczących wymagań technologicznych i środowiskowych podziemnego zgazowania węgla brunatnego oraz opracowanie kryteriów złożowych i technologicznych dla weryfikacji krajowych zasobów węgla. Praca niepublikowana. AGH Kraków – listopad 2010.
7. *Hajdo S., Klich J., Polak K.*: Uwarunkowania podziemnego zgazowania węgla - 100 lat rozwoju metody. Górnictwo i Geoinżynieria. Kwartalnik AGH, rok 34, zeszyt 4, Kraków 2010.
8. *Hajdo S., Kasztelewicz Z., Polak K.*: Perspektywy, ograniczenia oraz zadania dla wdrożenia podziemnego zgazowania węgla w Polsce w świetle doświadczeń światowych. Konferencja SITG – 4 listopad 2010, Ustroń.
9. *Hajdo S., Klich J., Polak K.*: Własności węgla niskogatunkowych w podziemnym zgazowaniu węgla. Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 35, Zeszyt 3, Wyd. AGH – Kraków 2011.
10. *Herbich P.*: Sprawozdanie merytoryczne dla NCBiR z Cz.T.B. nr 1.4.5., pt. Ocena wpływu na wody podziemne i środowisko geologiczne procesów zgazowania węgla charakteryzowanych kryteriami złożowo-technologicznymi w odniesieniu do dyrektyw środowiskowych UE oraz przepisów krajowych”. PIG- PIB, Praca niepublikowana. Warszawa – maj 2011.
11. *Kasztelewicz Z., Kaczorowski Z., Mazurek S., Orlikowski D., Żuk S.*: Stan obecny i strategia rozwoju branży węgla brunatnego w I połowie XXI wieku w Polsce. VI Międzynarodowy Kongres Górnictwo Węgla Brunatnego. Kwartalnik AGH, seria Górnictwo i Geoinżynieria, rok 33, zeszyt nr 2, Kraków, 2009.
12. *Kasztelewicz Z., Polak K., Zajączkowski M.*: Metody wydobycia i przetwórstwa węgla brunatnego w I połowie XXI wieku. Węgiel Brunatny, nr 4 / 65, 2008.
13. *Khadse A., Qayyumi M., Mahajani S., Aghalayam P.*: Underground coal gasification: A new clean coal utilization technique for India. Energy 32, 2061–2071 Elsevier, 2007.
14. *Kraynin E.V.*: Underground coal gasification: theoretical and practical foundations. Corina-ofset. Moscow 2010 (oryginał w języku rosyjskim).
15. *Libicki J., Szczepiński J.*: Międzynarodowy System Klasyfikacji Węgla oraz Rozporządzenie Rady Ministrów w Sprawie Pomocy Publicznej dla Przemysłu Węglowego. Węgiel Brunatny, nr 2/59, 2007.
16. *Mastalerz M., Drobniak A., Parke M., Rupp J.*: Site evaluation of subsidence risk, hydrology, and characterization of Indiana coals for underground coal gasification (UCG). Final report to CCTR, 2011.
17. *Tajduś A., Czaja P., Kasztelewicz Z.*: Stan obecny i strategia rozwoju branży węgla brunatnego w I połowie XXI wieku. Kwartalnik „Górnictwo i geologia”, Tom 5, Zeszyt 3. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice, 2010.
18. *Tajduś A., Kaczorowski J., Kasztelewicz Z., Czaja P., Cala M., Bryja Z., Żuk S.*: Węgiel brunatny – oferta dla polskiej energetyki. Możliwość rozwoju działalności górnictwa węgla brunatnego w Polsce do 2050 roku. Komitet Górnictwa PAN, Kraków. 2014.



Zadanie badawcze „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoelektrycznej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

