

**Dr inż. Piotr Mocek**

Zakład Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza  
Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice  
Email: pmocek@gig.eu

**Mgr inż. Radosław Zamiar**

INTROL 4 TECH Sp. z o.o., 16 Lipca 14, 41-506 Chorzów Batory  
Email: rzamiar@i4t.com.pl

**Mgr inż. Robert Jachimczyk**

P.W. „SEMAKO” Sp. z o.o., Wiejska 40, 44-153 Łany Wielkie k/ Gliwic  
Email: rjachimczyk@semako.pl

**Mgr inż. Ryszard Gowarzewski**

Katowicki Holding Węglowy  
Kopalnia Węgla Kamiennego "Wieczorek"  
email: rgowarzewski@khw.pl

**Mgr inż. Jerzy Świądrowski**

Zakład Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza  
Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice  
Email: jswiadrowski@gig.eu

**Dr inż. Iwona Gil**

Zakład Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza  
Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice  
Email: igil@gig.eu

**Prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk**

Zakład Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza  
Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice  
Email: kstanczyk@gig.eu

**Wybrane zagadnienia eksploatacji instalacji podziemnego zgazowania węgla  
o mocy termicznej 3 MW**

**Słowa kluczowe:** *podziemne zgazowanie węgla, instalacja pilotowa, sterowanie procesem*

**Abstrakt:** Omówiono doświadczenia z eksploatacji urządzeń podziemnego zgazowania węgla (PZW). Próbę zgazowania przeprowadzono w funkcjonującej Kopalni Węgla Kamiennego "Wieczorek". Projektowana wydajność zgazowania wynosiła 600 kg/h węgla. Przekłada się to na 3 MW mocy termicznej zawartej w entalpii gazu. Przygotowując urządzenia instalacji PZW zastosowano zintegrowany cykl projektowania. Wynikiem było przeprowadzenie długotrwałych (ponad 1400 h) badań procesu zgazowania węgla przy ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego. Zgazowanie

prowadzono w złożu o średniej miąższości 5.4 m wykorzystując mieszaninę: powietrza i tlenu, powietrza i CO<sub>2</sub> oraz powietrza i wody. Uzyskano informacje z funkcjonowania w skali półtechnicznej instalacji PZW. Celem publikacji jest przedstawienie procesu i wybranych doświadczeń z funkcjonowania tej instalacji. Opisano ograniczenia zewnętrzne wpływające na sposób rozwiązania technologii zgazowania, konstrukcje podstawowych węzłów i zasady prowadzenia procesu. Wskazane zostały główne problemy występujące w trakcie procesu zgazowania i oczyszczania gazu z PZW.

## 1. Wprowadzenie

Podziemne zgazowanie węgla (PZW) bezpośrednio odbywa się poprzez doprowadzanie gazowego reagenta do obszaru zgazowania znajdującego się bezpośrednio w złożu węgla [4], [7], [20]. W wyniku przebiegających procesów konwersji chemicznej uzyskuje się: gaz procesowy, wodę, kondensaty zawierające związki węglowodorowe (substancje smoliste), nieprzereagowany karbonizat, oraz termicznie przetworzoną substancję mineralną węgla. Z georeaktora wyprowadzana jest mieszanina zawierająca: H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>+, oraz parę wodną. Do gazociągu przedostają się również części stałe (koksik z rozkładu węgla i termicznych przemian węglowodorów, pył). Część substancji mineralnej węgla, karbonizatu i kondensatów zostaje pod ziemią. Gaz PZW jest gazem zanieczyszczonym, dla którego w zależności od zastosowania należy przeprowadzić odpylanie, odsiarczanie, kondensację składników oraz dalsze procesy konwersji [8], [13], [27]. Prowadzone operacje oczyszczania wynikają z wymagań odnośnie składu gazu procesowego [1], [8], [18], [19], [25].

Instalacje technologiczne podziemnego zgazowania węgla znacznie różnią się swoim funkcjonowaniem od konwencjonalnych urządzeń zgazowania. Przemysłowe, naziemne instalacje zgazowania, zasilane węglem, biomasą lub komponowanymi mieszkankami odpadów nie odbiegają w sposób znaczny swoimi parametrami eksploatacyjnymi, w tym w szczególności dyspozycyjnością od typowych urządzeń energetyki zawodowej i chemii [17], [21], [24]. Charakteryzują się one relatywnie obniżoną trwałością eksploatacyjną w szczególności dotyczy to elementów narażonych na oddziaływanie agresywnych składników gazu procesowego. Układy energetyczne zgazowania naziemnego, w których gaz gorący zasila atmosferyczną komorę spalania nie posiadają długich odcinków łączących reaktor zgazowania z paleniskiem. W rezultacie zmniejszona jest ilość kondensujących składników smołowych. Urządzenia zintegrowanego cyklu zgazowania i spalania gazu IGCC, a zatem zgazowania ciśnieniowego zwykle charakteryzują się obniżoną dyspozycyjnością. Jest tak na wskutek wymagających technologicznie parametrów pracy urządzeń, odcinka reaktor - odpylacz - turbina gazowa [6], [11], [12], [23]. Wpływa również na to stosunkowo większa częstotliwość wymaganych przeglądów układu przepływowego turbiny gazowej.

Instalacje podziemnego zgazowania węgla nie wymagają realizacji reaktora konwersji, tak jak w przypadku pozostałych układów zgazowania. Proces podawania czynników zgazowujących i odbioru, oraz oczyszczania produktów PZW wymaga realizacji odpowiednich urządzeń. Charakterystyczne tutaj są: długie odcinki rurociągów substratów i gazu procesowego, zróżnicowane parametry termodynamiczne w georeaktorze, wymogi bezpieczeństwa i ograniczenia techniczne oraz ruchowe [13], [14], [15].

Czynnikiem decydującym o wyborze sposobu technicznej realizacji jest przyjęta technologia PZW. Zgazowanie prowadzone w warunkach eksploatowanych pokładów węgla lub pokładów o wysokim zagrożeniu wypływem gazu PZW do otoczenia [26], [29], wymaga utrzymywania w strefie zgazowania ciśnienia zbliżonego do atmosferycznego. Uzyskiwany gaz ma stosunkowo niską gęstość. Dominują w nim składniki dla których równowagowe

warunki konwersji chemicznej są charakterystyczne dla ciśnień niskich (CO, H<sub>2</sub>). Odbiór takiego gazu PZW prowadzony powinien być rurociągami wielkośrednicowymi.

Zintegrowane metody zgazowania węgla i konwersji gazu procesowego "in situ" w kierunku wysokiej zawartości CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub> w produktach procesu, takie jak metoda CRIP [22] pozwalają na utrzymywanie ciśnień w reaktorze i znacznej części instalacji przesyłowej gazu w pobliżu ciśnienia hydrostatycznego na głębokości zgazowania. Wyższe, niż hydrostatyczne ciśnienia procesu są ograniczone zagrożeniem niekontrolowanego wycieku gazu i podwyższonym potencjałem zanieczyszczenia wód podziemnych przez składniki kondensujące. Instalacje wysokociśnieniowe wymagają więc innych rozwiązań w zakresie podawania substratów, jak i odbioru, oczyszczania produktów i stabilizacji procesu PZW [23]. Metody wysokociśnieniowe charakteryzuje wyższa sprawność konwersji węgla w złożu, możliwość stosowania większych strumieni wody w czynniku zgazującym. W tym przypadku wymagane są znacznie większe rygory techniczne dla prowadzenia procesu [2].

W ramach projektu finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju p.t.: "Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii", zrealizowana została autorska instalacja pilotowa podziemnego zgazowania węgla powietrzem, powietrzem wzbogaconym w tlen, oraz powietrzem w mieszance z wodą lub CO<sub>2</sub>. Celem działań była próbna eksploatacja pokładu węgla metodą zgazowania podziemnego w skali instalacji półtechnicznej. W porównaniu z dotychczasowymi krajowymi badaniami istotne było powiększenie skali. Doświadczanie to miało na celu uzyskanie danych procesowych, bilansowych i ekonomicznych pozwalających na zaprojektowanie instalacji w skali pilotowej - przemysłowej. Ważne było również zebranie danych praktycznych z prowadzenia procesu w warunkach do tej pory nie przebadanych w kraju. W ramach prowadzonych prac technicznych i badań opracowano następujące istotne nowe elementy:

- nową koncepcję oczyszczania gazu PZW,
- własną metodę sterowania instalacji,
- metodę przesyłu gazu w długich odcinkach wysokotemperaturowego i kompensowanego termicznie, izolowanego rurociągu. W rezultacie kondensacja w znacznej części przesunięta została na powierzchnię.

Szczególnie unikalny charakter opracowanej instalacji wynika z faktu, że zaprojektowana ona została dla spełnienia rygorów bezpieczeństwa w warunkach działającego zakładu górniczego. Wymagało to opracowania odpowiednich metod zgazowania i monitoringu wyrobisk dookoła georeaktora.

Celem publikacji było przedstawienie doświadczeń eksploatacyjnych z funkcjonowania instalacji procesowej w skali półtechnicznej PZW. Proces prowadzony był w warunkach ruchu czynnego zakładu górniczego, metodą zgazowania niskociśnieniowego. Opisano ograniczenia zewnętrzne wpływające na sposób rozwiązania instalacji, konstrukcje podstawowych węzłów i zasady prowadzenia procesu. Jako istotne dla rozwoju tej technologii pozyskiwania energii opisano główne problemy występujące w trakcie funkcjonowania instalacji.

## **2. Założenia do procesu zgazowania**

Zgazowanie podziemne prowadzone było w Kopalni Węgla Kamiennego (KWK) "Wieczorek" Katowickiego Holdingu Węglowego (KHW) S.A. Proces przebiegał w pokładzie węgla nr 501, na głębokości względem rzędnej powierzchni terenu wynoszącej 464 m. Sposób lokalizacji georeaktora w górotworze został opisany w pracy [10], natomiast w [13] i [14] podano szczegóły konstrukcji elementów instalacji PZW przed jej konstrukcyjną modyfikacją. Główne założenia PZW zamieszczono w tablicy 1. Na rysunku 1, stanowiącym uproszczony schemat bilansowy georeaktora, przedstawiono założone strumienie

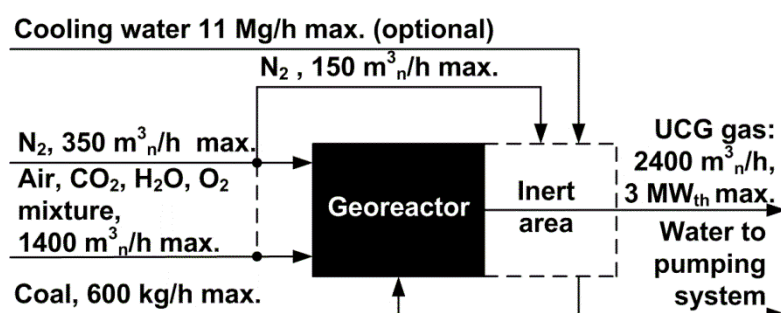
substancjalne. Konfigurację przestrzenną georeaktora pokazano na rysunku 2. Rurociągiem o średnicy DN150 doprowadzany był czynnik zgazowujący. Rurociąg DN100 służył jako rurociąg zapasowy i awaryjne doprowadzenie gazu inertnego do georeaktora oraz odprowadzenie nadmiaru produktów ciekłych z obszaru kawerny. Rurociągiem DN300 odprowadzane były produkty procesu z przestrzeni georeaktora.

Tablica. 1. Główne parametry procesu zgazowania i funkcjonowania instalacji oczyszczania, oznaczenia zgodne z rysunkami 1-10

Parametr, wymiar	Wartość
Miąższość pokładu H, m	5,4
Warunki zalegania pokładu	[3]
Maksymalna wydajność zgazowania, kg/h	600
Maksymalna uzyskana wydajność, kg/h	830
Średnia wydajność w trakcie eksploatacji, kg/h	174
Strumień powietrza zgazowania z D1, D1R, m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h	1400
Strumień maksymalny gazu PZW, m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /h	1800
Ilość pozostałych czynników zgazowujących	wg rys. 1
Czas eksperymentu, doby	~90
Główne elementy sterowania instalacji Ciśnienie w instalacji  Temperatura w instalacji  Temperatura w poszczególnych stopniach chłodzenia  Praca skrubera SV Temperatura wody w obiegu chłodzącym HE11, HE21, HE22, HE23 Regulacja adsorberów rewersyjnych  Ilość gazowych czynników doprowadzanych do georeaktora	Sposób realizacji: - poprzez stabilizację podciśnienia za georeaktorem w trzech wybranych punktach pomiarowo - kontrolnych wybieranych przez operatora (PID). - poprzez nastawę granicznej wartości strumienia powietrza lub poprzez zawartość utleniacza w czynniku zgazowującym - (PI) dla HE01 regulacja wartości wejściowej poprzez wydajność wymiennika gaz/powietrze, pozostałe (HE11, HE21, HE22, HE23) kalibrowane poprzez nastawę wstępną rozplywu wody. - okresowa, strumień wody dobrany nastawą ręczną poprzez zawory regulacyjne - uzupełnianie obiegu, regulacja 3-stawna.  - nastawiany okres rewersji, wymiana sorbentu na podstawie danych z systemu monitoringu składu gazu. - nastawa przepustnicy dla gazów podawanych ze zbiorników N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , nastawa falownika dla gazów podawanych z dmuchaw D1, D1R. Awaryjnie dla D1, D1R regulacja upustowo/dławieniowa PID
Minimalna dopuszczalna temperatura gazu procesowego w części podziemnej, °C	70
Zakres wartości opalowej gazu surowego, MJ/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	3,2-: -4,7

### 3. Prowadzenie procesu

Zasady funkcjonowania zakładów górniczych w Polsce opisane są w dokumentach wymaganych przez obowiązujące akty prawne [16]. W trakcie badań ze strony krajowych instytucji dozoru nie było zastrzeżeń formalnych odnośnie przyjętych procedur kierowania instalacją i założeń związanych z jej bezpieczeństwem. Proces zgazowania bezpośrednio kontrolowano ze sterowni umieszczonej w części naziemnej instalacji. Wielopunktowy pomiar i monitoring składu powietrza w chodnikach otaczających zgazowywane złożo węgla realizowany był w ramach kopalnianego systemu Zefir [5]. Komunikacja pomiędzy monitoringiem kopalnianym i systemem nadzorującym proces PZW umożliwiała podejmowanie decyzji w trybie operatorskim. W zakresie górniczego systemu "Zefir", w który włączono dodatkowe czujniki stężeń: wodoru, tlenu węgla i metanu, oraz czujniki temperatury i anemometryczne czujniki przepływu powietrza wentylacyjnego.



Rys. 1. Założenia bilansowe do zgazowania podziemnego

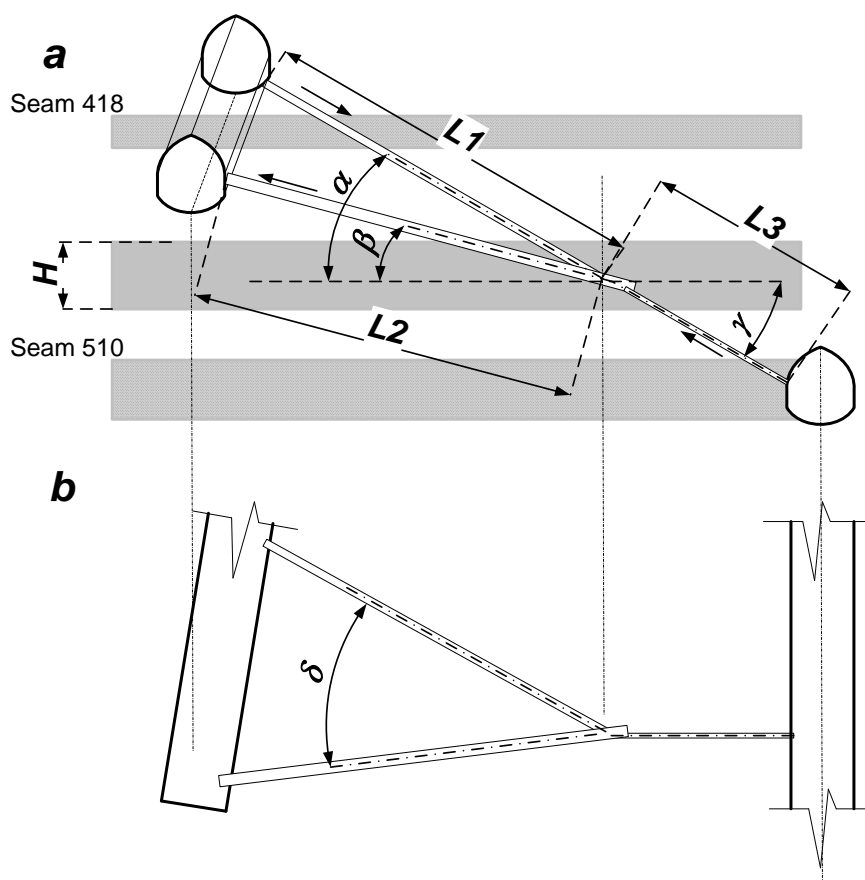
### 4. Ograniczenia uwzględnione w trakcie projektowania i budowy

Poza ograniczeniami wynikającymi z założeń prowadzenia procesu (tab. 1.) można wymienić:

- na długości około 42 m, rurociąg gazu procesowego miał być umieszczony pod wodą,
- rurociąg przebiegał w pobliżu pokładów węgla [3]. Związane to było z zagrożeniem zagrzania i w efekcie zapłonu pokładu. W związku z tym temperatura rurociągu nie powinna przekraczać 40 °C,
- maksymalne dopuszczalne stężenie tlenu węgla w części podziemnej nie mogło przekroczyć 26 ppm obj.,
- w sąsiedztwie instalacji prowadzono eksploatację górniczą,
- w części podziemnej nie można było stosować pomp do odbioru kondensatu,
- podziemna część instalacji PZW miała działać bezobsługowo.

Wymienione parametry ograniczające w głównej wierze zdeterminowane były funkcjonowaniem w warunkach zakładu górniczego. W celu zabezpieczenia przed zagrzaniem przebiegających w pobliżu trasy rurociąg pokładów węgla zastosowana została na całej długości rurociągu DN300 otulina izolacyjna. Zapobiegała ona kondensacji części związków smołowych i wody. Umożliwiało to odbiór kondensatu w przewidzianej do tego celu instalacji powierzchniowej. Wynikiem zastosowania izolacji był wzrost naprężeń

termicznych w rurociągu odbiorczym gazu procesowego. Rozkład temperatur rurociągu DN300 w warunkach eksperymentu został wyznaczony w oparciu o metody analityczne [15].



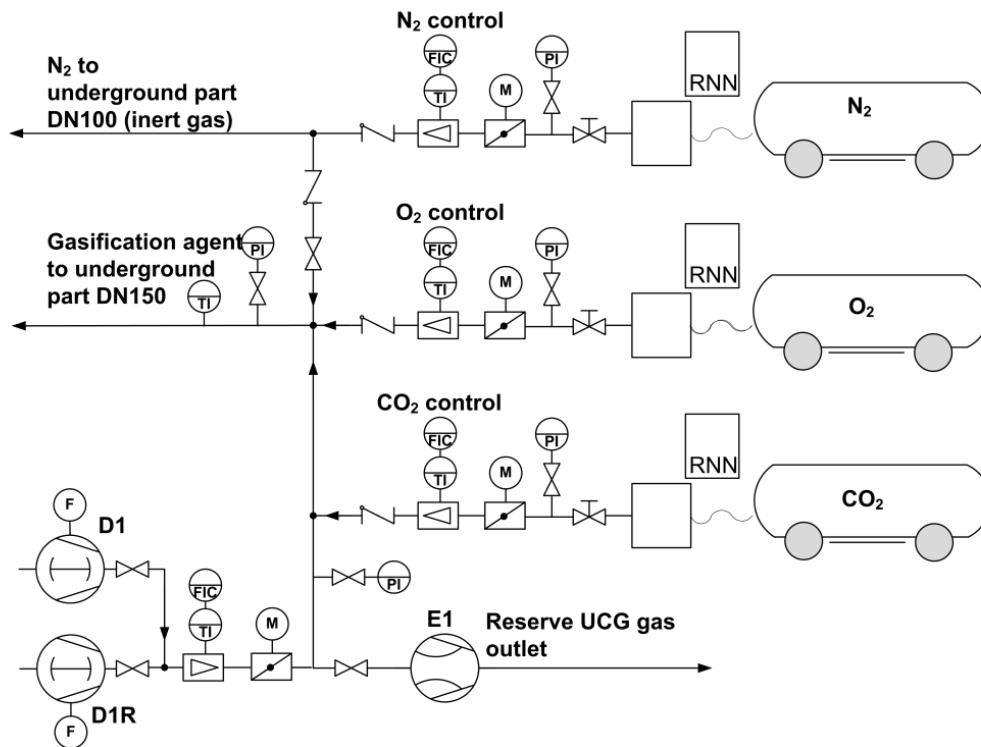
Rys. 2. Konfiguracja przestrzenna georeaktora: a. widok z boku. b. widok z góry

## 5. Opis procesu zgazowania

Część procesowa instalacji zgazowania funkcjonowała w zakresie systemu SCADA, który oparto na oprogramowaniu firmy ASKOM [28]. Zrealizowano układ kontrolno - pomiarowy procesu zgazowania i oczyszczania gazu w oparciu o dane pochodzące z sześćdziesięciu ośmiu czujników pomiarowych rozmieszczonych w istotnych punktach instalacji. Na rysunku 3 przedstawiono podawanie czynników zgazowujących zlokalizowanych w części powierzchniowej. Na rysunkach 3 - 6 przedstawiono również istotniejsze punkty pomiarowe.

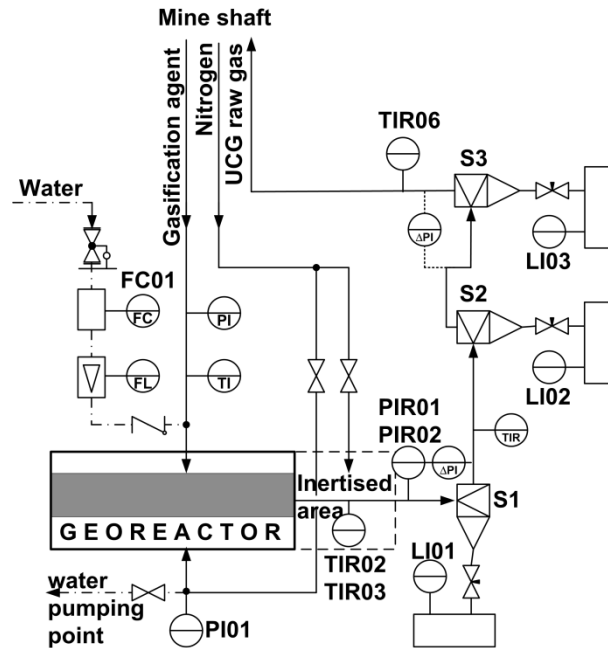
Azot dozowany był rurociągiem DN100 do kawerny, oraz do części chodnika badawczego umieszczonego za tamą. Istniała możliwość połączenia tego rurociągu z rurociągiem czynnika zgazowującego DN150, w którym tlen mieszano z powietrzem z dmuchaw bezolejowych D1/D1R. Sterowanie strumieniami substratów prowadzono: poprzez przepustnice - dla tlenu, dwutlenku węgla, azotu i awaryjnie dla powietrza; oraz za pomocą falownika dla powietrza. Ejektor E1 pełnił funkcję reduktora ciśnienia w instalacji podziemnej w przypadku odcięcia (zatkania, zawału w kawernie) rurociągu odbiorczego gazu. Wówczas możliwe było odebranie gazu i zmniejszenie ciśnienia. Ejektor zasilany był azotem, lub powietrzem w zależności od możliwego zagrożenia wybuchowego, które oznaczane było w oparciu o pomiary chromatograficzne składu gazu PZW. Część azotu

stosowana była również do inertyzacji (przedmuchu) fragmentów instalacji oczyszczania i do zasilania zdmuchiwnicy pyłomierza (te elementy nie zostały zaznaczone na rysunkach).



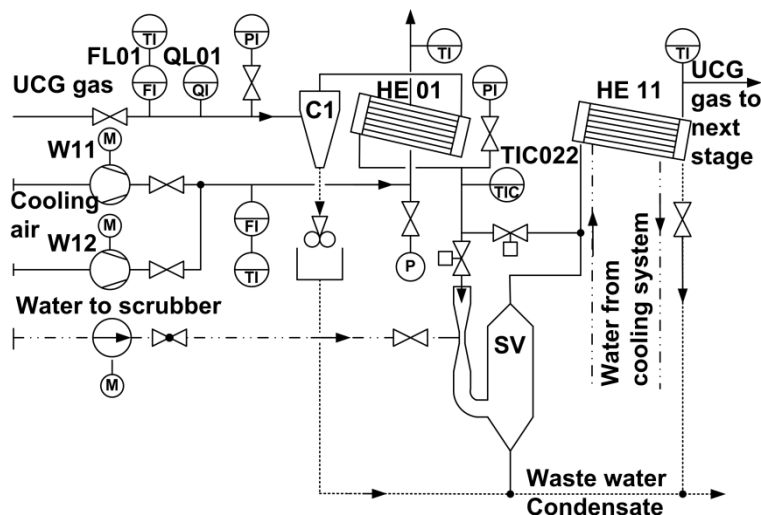
Rys. 3. Wizualizacja instalacji dozowania czynników zgasowujących

Schemat procesowy części podziemnej instalacji przedstawiono na rysunku 4, gdzie uwidoczniono najważniejsze parametry stosowane w procesie sterowania instalacją: ciśnienie przed (PI01) i za georeaktorem (PIR01, PIR02) oraz temperaturę gazu surowego (TIR02, TIR03). Poziom kondensatu w zbiornikach nadmiarowych separatorów S1, S2, S3 wskazywany był przez poziomowskazy LI01, LI02, LI03. W separatorach S1 i S3 mierzony był również spadek ciśnienia. Pomiar spadku umożliwiał kontrolę drożności tych elementów instalacji. Na rys. 4 pokazano również separatory pyłu i kondensatu S1, S2, S3. Na rysunku 4 widoczny jest też zastosowany system podawania wody procesowej sterowany poprzez FC01 w oparciu o pomiar strumienia wody. Strumień podawanej do georeaktora wody mierzony był przez przepływomierz FRC01. Woda doprowadzana była do rurociągu gazu surowego DN150 bezpośrednio przed wlotem do otworu doprowadzającego substraty do złoża węgla. Rurociąg gazu PZW wraz z separatorami zlokalizowano w chodnikach, które stanowiły część istniejącej infrastruktury dołowej i szybu kopalni.



Rys. 4. podziemna część instalacji zgazowania. — gaz, - - - - woda

Po opuszczeniu podziemnej części gaz surowy kierowany był do oczyszczania. Pierwsza część instalacji oczyszczania przedstawiona została na rysunku 5.

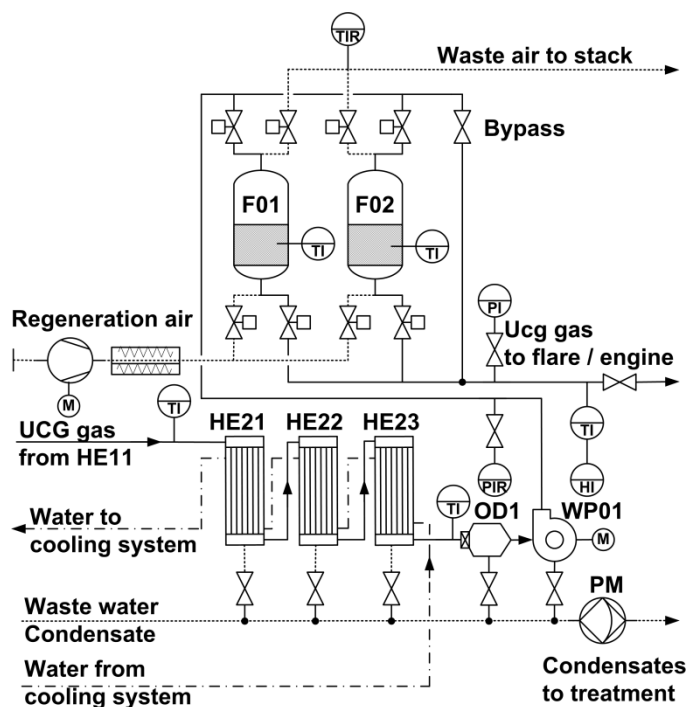


Rys. 5. Pierwsza część instalacji oczyszczania gazu: cyklon C1, chłodnica wstępna HE01, skruber SV, chłodnica główna HE11. — gaz, - - - - kondensat, pył, - - - - woda

Gaz procesowy odpylano w cyklonie C-1, a następnie wstępnie chłodzono w wymienniku HE01 za pomocą powietrza podawanego z wentylatorów W11 lub W12. Wydajność wentylatorów sterowana była poprzez falownik regulatorem PI. Wielkością regulowaną w procesie chłodzenia wstępnego gazu była jego temperatura mierzona przez czujnik TIC022 za wymiennikiem HE01. W kolejnej części gaz prowadzony był przez



skruber Venturi SV i główny kondensator smół HE11. Kondensator HE11 i pozostałe chłodnice poza HE01 chłodzone były wodą uzdatnioną.



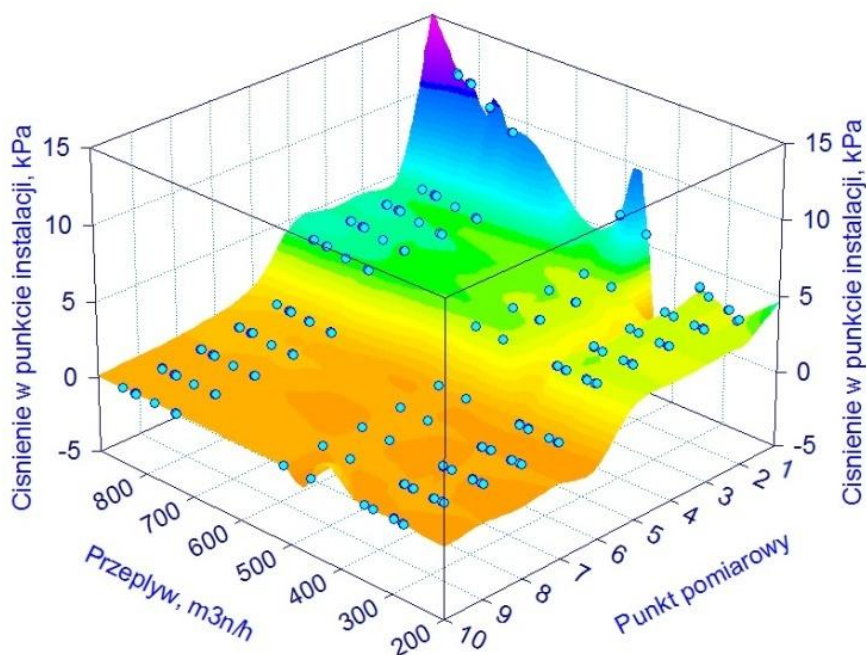
Rys. 6. Trzecia część instalacji oczyszczania gazu.  
 — gaz, - - - - kondensat, powietrze, pył, - - - - woda

Chłodziwo regenerowane było w chłodni wentylatorowej. Obiegi wodne nie zostały opisane w niniejszym tekście. W ostatnim etapie oczyszczania gazu z kondensatów (rys. 6) wykorzystywano chłodnice wodne HE21, HE22, HE23 oraz gazodynamiczny, wirowy kondensator smół OD1. Kondensat zbierany był w podgrzewanym kolektorze zbiorczym skąd odpompowywano go do paletopojemników. Odbiór kondensatu zapewniały pompy membranowe PM1 i PM2. Gaz oczyszczano ze związków kwaśnych w adsorberach z wypełnieniem stałym F01/ F02. Wypełnienie adsorberów stanowiły węgle aktywne. Regenerację złoża w adsorberach prowadzono rewersyjnie za pomocą podawanego z wentylatora W-13 powietrza podgrzanego do zadanej temperatury przez nagrzewnicę N1. Oczyszczony gaz wyprowadzany był przez bezpiecznik wodny do odpustnicy / świecy, w której następowało jego spalanie.

## 6. Doświadczenia z funkcjonowania instalacji

W instalacji występował specyficzny rozkład ciśnienia. Przed georeaktorem utrzymywane było lekkie nadciśnienie, zaś za nim- podciśnienie. Wzrost strumienia objętościowego gazu wywołany kontrakcją i konwersją węgla w złożu oraz wzrostem temperatury prowadził do zwiększenia oporów przepływu. W przypadku, gdy różnica ciśnień pomiędzy punktem pomiarowym w georeaktorze, a otaczającymi chodnikami mierzona czujnikiem PI01 przekraczała 2000 Pa istniało zagrożenie infiltracją gazów poprzez strukturę geologiczną do otoczenia georeaktora (chodników i obiegu wentylacyjnego). Obserwacja ta była wynikiem badań stężeń wodoru i tlenu węgla w otworach monitorujących

odwierconych dookoła strefy zgazowania. Zagrożenie wypływem gazu do powietrza wentylacyjnego powodowało konieczność sterowania podciśnieniem w georeaktorze tak, aby nie przekraczać wartości podciśnienia w rurociągu ssawnym odprowadzającym produkty zgazowania. Nadciśnienie mierzone przed georeaktorem utrzymywano na poziomie około 1500 Pa. Podciśnienie za georeaktorem było funkcją przyjętych wydajności zgazowania i analizy składu gazu prowadzonej w chodniku badawczym. Charakterystyka przepływowa instalacji była zmienna w czasie, co wynikało ze zmieniających się rozmiarów kawerny i w pewnym stopniu odkładającego w rurociągach osadu mieszaniny kondensatów, pyłu i sadzy. Początkowa charakterystyka całej instalacji przed uruchomieniem przedstawiona została na rysunku 7. Wyznaczano ją przy wyłączonym WP01 poprzez regulację wydajności strumienia powietrza z dmuchawy D1 falownikiem. Badanie to wykonano przy przepływie gazu poza układem rewersyjnym adsorberów (bypass na rys. 6)



Rys. 7. Charakterystyka przepływowa instalacji wyznaczona "na zimno". Oznaczenia poszczególnych punktów pomiarowych: 1. Za dmuchawą D1; 2. Przed georeaktorem; 3. Za georeaktorem; 4. Za separatorem S1; 5. Za separatorem S3; 6. Przed cyklonem C1; 7. Za HE01; 8. Za HE11; 9. Za układem chłodzenia; 10. Przed świecą

### 6.1. Część naziemna - podawanie czynników zgazujących

Regulacja strumieniami gazowych substratów w trakcie prowadzenia eksperymentów funkcjonowała poprawnie. Występujące problemy wiązały się ze stabilizacją ciśnienia i strumienia azotu podawanego do inertyzacji chodnika badawczego. Wynikało to z nieuwzględnienia montażu reduktorów w ścieżce azotu. Było tak, gdyż zgodnie z przyjętymi pierwotnie założeniami chodnik badawczy (rys. 2) miał być zalany wodą. W czasie testów rozruchowych z uwagi na zbyt duży przesiąk wody i zagrożenie zalania otworów w georeaktorze zmieniono sposób zabezpieczenia przed rozszczeniem georeaktora. Po zmianie zamiast zalewania zastosowano otamowanie części chodnika korkiem piaskowym.

Atmosferę inertną w chodniku badawczym utrzymywano podając strumień azotu wynoszący około 35-50 kg/h N<sub>2</sub>.

W trakcie eksperymentu wystąpiły problemy z drożnością rurociągu odprowadzającego gaz procesowy. W tym przypadku zastosowano ejektor E1, jako awaryjny upust gazów procesowych. W celu wytworzenia odpowiedniego podciśnienia w instalacji wykorzystano strumienicę Huragan 80 zabudowaną od strony wlotu rurociągu DN100. W zależności od wystąpienia zagrożenia wybuchowego mogła być zasilana azotem lub powietrzem sprężonym z sieci kopalnianej.

## **6.2. Część podziemna**

W części podziemnej wykonywano okresowe, wymagane przepisami górniczymi, kontrole wyłączników prądowych. Obejmowały one również część działających pod ziemią czujników i układów sterowania instalacji PZW. W trakcie kontroli przez okres do dwóch godzin obsługa eksperymentu nie uzyskiwała sygnałów pomiarów ciągłych. Instalacja w tym czasie była sterowana ręcznie. W przypadku sytuacji nagłej, jak np. zmieniający charakterystykę przepływową zawał złoża wiązać się to mogło z zagrożeniem dla stabilności funkcjonowania instalacji.

Brak pomp kondensatu zainstalowanych w separatorach S1, S2, S3 nakładał konieczność utrzymywania dopuszczalnej temperatury gazu w rurociągu DN300 o wartości nie mniejszej niż 70 °C w rzepiu szybu. Miało to zapobiec zbyt dużej kondensacji i niedrożności rurociągu. Nieprzestrzeganie minimalnej dopuszczalnej wartości temperatury gazu w rzepiu powodowało zbyt silną kondensację smoły. Zjawisko to było wywoływane głównie wzrostem strumienia wody spływającej w szybie (np. w wyniku opadów deszczu, czy rozszczelnienia instalacji podsadzkowej funkcjonującej podczas próby).

Innym problemem był dryft wskazań czujników ciśnienia. Zjawisko to wymagało okresowych kontroli i kalibracji, a więc konieczności dojścia obsługi do rurociągu zgazowania. Z uwagi na przyjęte wstępnie zasady bezpieczeństwa takie działania nie były możliwe.

Dozowanie wody do procesu sprawiało znaczne trudności wynikające z czystości wody w rurociągach. Woda w instalacji ppoż. pobierana była z osadników wody podsadzkowej, była w wysokim stopniu zapiaszczona, co przekładało się na awaryjność systemu dozującego.

## **6.3. Część naziemna oczyszczania gazów procesowych**

Na rysunku 8 przedstawiono zdjęcie instalacji od strony odpustnicy gazów. Oczyszczanie gazów procesowych opierało się na stopniowej kondensacji. Wymagało to utrzymywania odpowiednich temperatur gazu surowego opuszczającego szyb i na poszczególnych etapach chłodzenia. Głównymi kontrolowanymi parametrami były spadki temperatury na poszczególnych stopniach chłodzenia oraz strumień gazu i wody zasilającej skrubler.



Rys. 8. Widok odpustnicy, w tle fragmentu instalacji oczyszczania gazu PZW

Układ kondensacji gazu pracował przez cały okres eksperymentu. Okresowo badano proces odsiarczania gazu surowego w skruberze. W trakcie badań odbierano około  $90 \pm 20$  g kondensatu wodno-smołowego na  $1 \text{ m}^3_n$  gazu PZW. Skuteczność oczyszczania wynosiła średnio dla wszystkich frakcji od 85 do 92 % w zależności od badanej konfiguracji urządzeń i strumienia doprowadzanej wody do wymienników przeponowych i skrubera SV. Efektem stosowania znacznego podciśnienia gazu procesowego w rurociągu DN300 przed wentylatorem WP01 prowadzonego celem zabezpieczenia części podziemnej było utrudnione pompowanie kondensatu wodno - smołowego. Związki chemiczne zawarte w pompowanej cieczy obniżał trwałość membran zastosowanych pomp kondensatu. Konieczna była wymiana pomp membranowych na urządzenia pewniejsze, o większej wydajności i lepiej dostosowane do przetłaczania mieszaniny wodno - smołowej.

W trakcie eksperymentu występowały również problemy ze zbyt niską temperaturą gazu na wlocie do naziemnej części instalacji oczyszczania, a tym samym kondensacją w nieprzystosowanych do tego celu punktach. Problemy te rozwiązano poprzez okresowe podnoszenie temperatury wymiennikach ponad standardową temperaturę ich funkcjonowania.

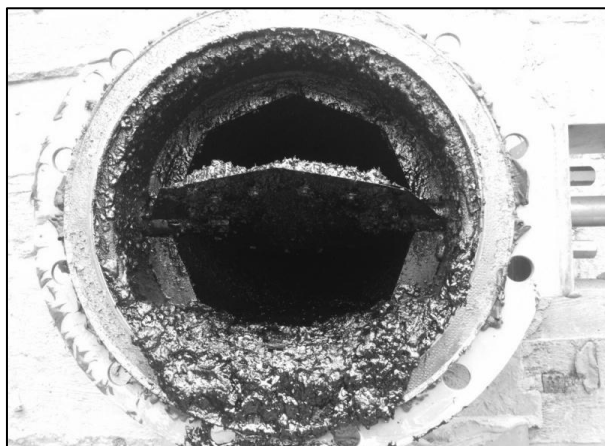
## 7. Stabilność procesu

Proces PZW charakteryzował się dużą stabilnością sterowania. Sprawdziły się dobrane zakresy pomiarowe czujników sprzężonych z układem sterowania i zastosowanie

automatycznego sterowania głównymi parametrami. Czynnikiem stabilizującym funkcjonowanie instalacji była powiększająca się stale objętość kawerny, dzięki czemu poszczególne odpowiedzi na zmiany wartości zadanych i występujące zakłócenia zachodziły w miarę rozwoju procesu z coraz większymi czasami opóźnień.

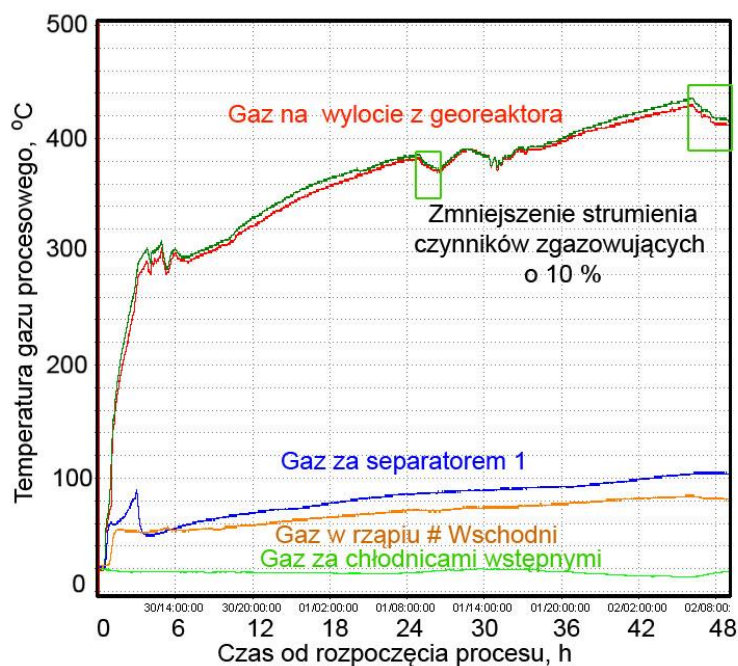
Najistotniejszym zakłóceniem procesu była występująca w wyniku zbyt niskiej temperatury w rzapiu kondensacja. Występowały dwa główne czynniki sprawcze kondensacji. Pierwszy z nich stanowiło prowadzenie georeaktora przy zbyt niskich parametrach. Wynikało to z zakresu prac eksperymentalnych oraz nałożonych przez Okręgowy Urząd Górniczy ograniczeń odnośnie maksymalnej temperatury gazu PZW na wylocie z georeaktora (550 °C, podczas, gdy maksymalna obliczeniowa temperatura długotrwałej eksploatacji wynosiła 750 °C). Innym czynnikiem sprawczym była woda spływająca w szybie do rzapia. Woda pochodziła z opadów powierzchniowych, nieszczelności stale obsługiwanej instalacji podszkawkowej i dopływająca z pozostałych w obszarze szybu chodników. Napływ wody wychładzał powierzchnię izolowanego rurociągu. W praktyce eksploatacyjnej pierwsze symptomy zmniejszonej drożności rurociągów odnotowywano zwykle od 20 do 40 godzin przed wystąpieniem zdarzenia. Nadmiernej kondensacji uniknięto poprzez utrzymywanie właściwych rozkładów temperatury gazu w instalacji i obserwacja zmian spadków ciśnień w przepływie gazu PZW przez różne odcinki instalacji.

Na rysunku 10 zamieszczono widok gniazda przepustnicy zaporowej zabudowanej w rurociągu DN300 przy wlocie gazu surowego do instalacji oczyszczania. Widoczne jest na występach w pobliżu gniazda osadziła się znaczna ilość kondensatu i pyłu. W pobliżu tej przepustnicy na gładkim rurociągu proces ten nie zachodził, z czego można wnioskować, iż ważne jest dobre izolowanie mostków termicznych (kołnierze, punkty zamocowania podpór, kompensacje). W tym przypadku takimi mostkami były kołnierze rurociągu i przepustnicy.



Rys. 9. Widok gniazda przepustnicy zaporowej w rurociągu gazu surowego DN300

Na rysunku 10 zaprezentowano przebieg temperatury gazu w głównych elementach instalacji po rozruchu procesu zgazowania. Widoczny początkowy szybki wzrost temperatury jest efektem zastosowanego materiału inicjującego i znacznej ilości części lotnych tworzących się w pierwszej fazie procesu.



Rys. 10. Rozkład temperatury w procesie zgazowania w początkowej jego fazie dla różnych punktów instalacji zgazowania

## 8. Podsumowanie

1. Zastosowanie autorskiego, zintegrowanego podejścia projektowego i pomiarowego pozwoliło na uzyskanie sprawnej technologicznie metody pozyskiwania energii w procesie PZW.
2. Przyjęta metoda stabilizacji podciśnienia w objętości georeaktora zapewniło bezpieczne funkcjonowanie instalacji w części podziemnej. W jej otoczeniu przez cały czas prowadzone były normalne czynności wydobywcze, zaś stężenia składników toksycznych (tj.: CH<sub>4</sub>, CO i H<sub>2</sub>) nie przekroczyły wartości granicznych.
3. Izolowanie rurociągu odbiorczego zredukowało ilość składników kondensujących w rurociągach gazu surowego i przesunęło główną część kondensacji do instalacji powierzchniowej.
4. Sprawność oczyszczania gazu z substancji kondensujących wyniosła (poza H<sub>2</sub>O) średnio 86 % przy wyłączonym skruberze, a 92 % przy skruberze włączonym.
5. Bezpośrednio w oparciu o dane ruchowe i eksploatacyjne opracowywano procedury związane z funkcjonowaniem zakładu zgazowania podziemnego. Procedury te mogą być traktowane, jako wzorcowe w przypadku wdrażania tego typu procesów przemysłowych.
7. Uzyskano wystarczającą szczelność instalacji. Świadczyło o tym śladowe stężenie O<sub>2</sub> w gazie procesowym podczas funkcjonowania georeaktora.
8. Badania prowadzone w reaktorach laboratoryjnych lub *minimalnych instalacjach modelowych* nie pozwalają na uzyskiwanie informacji związanych z eksploatacją, trwałością instalacji, problemami cieplnymi w warunkach przemysłowych i zdarzeniami typowymi dla procesów przemysłowych. W tym celu konieczne jest prowadzenie badań zgazowania w długotrwałych warunkach eksploatacyjnych.

*Publikacja została opracowana w ramach projektu pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez*

## **Literatura**

1. Advanced materials modelling and lifting technologies for gas turbine components operating in coal gasification plant. Cleaner Coal Technology Programme Project Profile 287, DTI, Alstom 2001.
2. Bell D A, Towler B F, Fan M. Coal gasification and its applications. New York: Elsevier 2011.
3. Chećko J. Analiza warunków geologiczno - górniczych i hydrogeologicznych w rejonie projektowanego georeaktora zlokalizowanego w KWK "Wieczorek". Przegląd Górniczy 2; 2013: 37-45.
4. Couch G. Underground coal gasification. London, United Kingdom: IEA Clean coal Centre. 2009. Report No. CCC 151.
5. Dec B, Gajoch A. System dyspozytorski ZEFIR - struktura programu. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa. 2000, 4-5, 108-118.
6. Doctor R D, Molburg J C, Thimmapuram P R. KRW oxygen-blown gasification combined cycle. carbon dioxide recovery, transport and disposal, Raport NETL 1996.
7. Howard J B, ed. Elliot M A. Chemistry of coal utilization. Vol. II. New York: Willey and Sons 1981.
8. Karcz A. Koksownictwo. P. II. Kraków: Wyd. Akademii Górniczo – Hutniczej, 1991.
9. Kowalski J. Wytwarzanie gazu do syntezy. Warszawa: PWT, 1954.
10. Krause E, Lasek S. Wpływ uwarunkowań górniczo - geologicznych oraz wentylacyjnych na projektowaną lokalizację georeaktora oraz bezpieczeństwo procesowe podziemnego zgazowania węgla w czynnej kopalni. Przegląd Górniczy, 2013; 2: 46-54.
11. Matuszewski M, Rutkowski R, Schoff R, Comparison of Pratt and Whitney Rocketdyne IGCC and commercial IGCC performance, Raport NETL 2006 r.
12. Maurstad O. An overview of coal based integrated gasification combined cycle (IGCC) Technology. MIT Publication no.: MIT LFEE 2005-002 WP. 2005.
13. Mocek P, Gil I, Świądrowski J. Instalacja procesowa dla hybrydowej technologii podziemnego zgazowania węgla. Przemysł Chemiczny 2014; 1: 66-69.
14. Mocek P, Gil I, Wodołański A. Wybrane zagadnienia projektowania instalacji oczyszczania produktów podziemnego zgazowania węgla. Przegląd Górniczy 2013; 2: 99-107.
15. Mocek P, Gil I. Przesył gazu z podziemnego zgazowania węgla. Przegląd Górniczy 2013; 2: 107-115.
16. Prawo geologiczne i górnicze. Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Dziennik Ustaw 2011 nr 163 poz. 981.
17. Rezaiyan J, Cheremisinoff N P, Gasification technologies. A primer for engineers and scientists. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.
18. Spath P L, Dayton D C. Preliminary Screening — Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas. Raport NREL/TP-510-34929, 2003.
19. Specification for Fuel Gases for Combustion in Heavy-Duty Gas turbines. Raport GE power Systems Gas Turbine; GEI41040G, 2002.
20. Stańczyk K, Howaniec N, Smoliński A, Świądrowski K, Kapusta K, Wiatowski M. Gasification of lignite and hard coal with air and oxygen enriched coal in a pilot scale ex situ reactor for underground gasification. Fuel 2011; 5: 1953-1962.
21. Steinbrecht D, Wolff H J, Matzmohr R, Nassour R, Didk H. Investigations of low

- calorific landfill gases by a small scale fluidised bubbling bed combustion plant. *Global NEST Journal* 2007; 9: 42-50.
23. SwanHills Synfuels. Swan Hills In-situ coal gasification technology development final outcomes report. Alberta Innovates - Energy and Environment Solutions Report 2012.
  24. Tampa Electric Polk power station integrated gasification combined cycle project. Raport NETL nr.: DE-FC-21-91MC27363: 2002 r.
  25. Tomeczek J. Zgazowanie Węgla. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej, 1994.
  26. Vulfovich K E. Producton of synthetic hydrocarbons for coal through its underground gasification. *International Journal of Mining Science and Technology* 2013; 23: 279-285.
  27. Wiatowski M, Stańczyk K, ŚwiądrowskiJ, Kapusta K, Cybulski K, Krause E, Grabowski J, Rogut J, Howaniec N, Smoliński A. Semi-technical underground coal gasification (UCG) using the shaft method in Experimental Mine "Barbara". *Fuel* 2012; 99: 170-179.
  28. Woolcock J, Brown R. A Review of Cleaning Technologies for Biomass-Derived Syngas. *Biomass and Bioenergy* 2013; 52: 54-84.
  29. [www.asix.com.pl](http://www.asix.com.pl)
  30. Yang L, Zhang X, Liu S, Yu L, Zhang W. Field test of large-scale hydrogen manufacturing from underground coal gasification (UCG). *International Journal of Hydrogen Energy* 2008; 33: 1275-1285.