

Symulacja procesu podziemnego zgazowania węgla w eksperymentach *ex-situ*

Simulation of underground coal gasification process in *ex-situ* experiments



Dr Krzysztof Kapusta*)



Dr inż. Marian Wiatowski*)



Prof. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk*)

Treść: Przeprowadzono serię sześciu symulacji eksperymentalnych procesu podziemnego zgazowania węgla (PZW) w warunkach powierzchniowych (*ex-situ*), których celem było określenie typu geometrii kanału ogniowego oraz warunków prowadzenia procesu pozwalających na uzyskanie gazu o możliwie najwyższej wartości opałowej. 5 prób zgazowania prowadzono z wykorzystaniem węgla kamiennych oraz jedną na węglu brunatnym, stosując do zgazowania różne czynniki zgazowujące, tj. tlen, powietrze oraz ich mieszaniny. Badania wykazały, że konfiguracja kanału ogniowego ma istotny wpływ na przebieg procesu zgazowania oraz na wartość opałową gazu, głównie ze względu na różną zawartość tlenu węgla w gazach otrzymanych dla różnych konfiguracji. Dla przyjętych geometrii złóż węglowych, najkorzystniejsze warunki przebiegu procesu zgazowania obserwowano w przypadku stosowania czystego tlenu. Średnie wartości opałowe gazu produkowanego w trakcie zgazowania węgla kamiennych tlenem mieściły się w przedziale od 7,6 do 9,7 MJ/Nm³, a uzyskiwane sprawności energetyczne procesu mieściły się w przedziale od 46,8 % do 79 %. Zamiana czynnika zgazowującego na powietrze spowodowała znaczny spadek temperatur w reagującym układzie, skutkujący wyraźnymi spadkami stężeń głównych składników palnych gazu (H₂, CO). W warunkach podniesionego ciśnienia zgazowania powietrzem uzyskiwano wyższą wartość opałową gazu, głównie z powodu zwiększenia udziału metanu w gazie.

Abstract: A series of six experimental simulations of the underground coal gasification process (UCG) in the surface conditions (*ex situ*) was conducted. The main aim was to determine the influence of gasification channel geometry and process conditions on the calorific value of gas. Five gasification tests were conducted using hard coal samples and one experiment was carried out on lignite. The gasification tests were carried out with distinct gasification reagents, i.e. oxygen, air and their mixtures. Studies have shown that the gasification channel configuration has a significant influence on the gasification process and on gas calorific value, mainly due to the variation of the content of carbon monoxide in the gases obtained for the different configurations. For the tested geometries, the most favorable conditions for the gasification process were observed in the case of pure oxygen. Mean calorific value of the gas produced during the gasification of hard coal with oxygen ranged from 7.6 to 9.7 MJ/Nm³ and energy efficiency of the process obtained ranged from 46.8% to 79%. When using air as the gasifying agent, a significant decrease in temperature was observed, resulting in a decrease in the concentrations of combustible gas components (H₂, CO). Under the conditions of elevated pressure with air, a higher heating value of gas was obtained, mainly due to the increase in the concentration of methane in the UCG gas.

Słowa kluczowe:

podziemne zgazowanie węgla, symulacje *ex-situ*, czyste technologie węglowe, gaz syntezowy

Key words:

underground coal gasification, *ex-situ* simulations, clean coal technologies, synthesis gas

1. Wprowadzenie

Podziemne zgazowania węgla należy do zagadnień złożonych. Chociaż z chemicznego i termodynamicznego

punktu widzenia proces PZW przebiega w sposób analogiczny do procesów zgazowania realizowanych w reaktorach powierzchniowych (np. Lurgi), warunki prowadzenia PZW nie są porównywalne z warunkami panującymi w układach powierzchniowych. Zgazowanie węgla w warunkach podziemnych przebiega w zwiększonej kalozności węglowej, a kontakt

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

węgla z czynnikami zgazowującymi jest mocno ograniczony. Powoduje to przebieg reakcji tylko w miejscach, gdzie zapewniony jest odpowiedni kontakt węgla z czynnikami utleniającymi oraz gdzie panują odpowiednie dla zgazowania warunki termodynamiczne (wysoka temperatura). Niekorzystnym zjawiskiem związanym z prowadzeniem zgazowania węgla pod ziemią jest również równoległy przebieg procesów suszenia i pirolizy węgla, utrudniający interpretację zachodzących zjawisk. W przypadku powierzchniowych procesów zgazowania, zjawiska te przebiegają oddzielnie. Dodatkowo, proces PZW jest silnie uzależniony od warunków naturalnych panujących w miejscu realizacji procesu. Do najważniejszych zalicza się warunki geologiczne oraz hydrogeologiczne złoża [1]. Realizacja procesu zgazowania bezpośrednio w złożu (*in-situ*) niesie za sobą również znaczące ograniczenia w zakresie możliwości kontroli parametrów procesowych, głównie temperatury. Temperatura stanowi jeden z kluczowych dla zgazowania parametrów, wpływających na skład uzyskiwanego gazu, a jej rozkład wzdłuż kanału ogniowego świadczy o prawidłowym przebiegu procesu.

Jedną z metod pozyskania danych procesowych na etapie tworzenia koncepcji instalacji pilotowych, demonstracyjnych oraz budowy modeli numerycznych procesu PZW są symulacje eksperymentalne z wykorzystaniem wielkolaboratoryjnych stanowisk badawczych umożliwiających uzyskanie na powierzchni warunków zbliżonych do warunków naturalnego zalegania złoża, tzw. badania *ex-situ*. Stanowiska badawcze *ex-situ* pozwalają na zastosowanie szerokiej gamy przyrządów pomiarowych i uzyskanie tym samym cennych danych procesowych, których pozyskanie w warunkach podziemnych byłoby niemożliwe. Badania poprocesowe obejmują ponadto bezpośrednią inspekcję wytworzonej kawerny oraz pobór próbek stałych ze ściśle określonych miejsc po zakończeniu doświadczenia. Próby stałych produktów ubocznych zgazowania (karbonizaty, popioły i żużle) służą do dalszych badań, np. w zakresie mechaniki górotworu w otoczeniu reaktora podziemnego lub do oszacowania potencjalnego oddziaływania procesu na środowisko naturalne [2, 3].

Badania podziemnego zgazowania węgla w skali wielkolaboratoryjnej na stanowiskach, w których procesowi poddawane są duże bloki węglowe symulujące pokład, prowadzone były w ostatnich latach przez grupy badawcze z Chin [4], Słowacji [5] oraz Indii [6]. Znaczący wkład w aktualny stan wiedzy w zakresie procesu PZW wniosły również badania *ex-situ* prowadzone przez Główny Instytut Górnictwa w ramach projektów HUGE oraz HUGE2. W ramach wymie-

nionych projektów, finansowanych przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali (RFCS), na terenie Kopalni Doświadczalnej „Barbara” GIG w Mikołowie wybudowano instalację badawczą, w której przeprowadzono 8 symulacji eksperymentalnych procesu zgazowania podziemnego. Badania, których głównym celem było uzyskanie gazu bogatego w wodór, prowadzono z użyciem różnych typów węgla, stosując szeroką gamę czynników zgazowujących oraz warunków technologicznych. Uzyskane wyniki, przedstawione w licznych publikacjach [7÷11], z powodzeniem są wykorzystywane dla weryfikacji modeli matematycznych procesu i obliczeń na potrzeby koncepcji, analiz i projektów technicznych instalacji w skali pilotowej bądź demonstracyjnej.

W artykule zestawiono ogólne wyniki 6 powierzchniowych symulacji procesu PZW, przeprowadzonych w Głównym Instytucie Górnictwa w ramach projektu pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”. Projekt finansowany jest przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

2. Instalacje doświadczalne *ex-situ* wykorzystane do badań

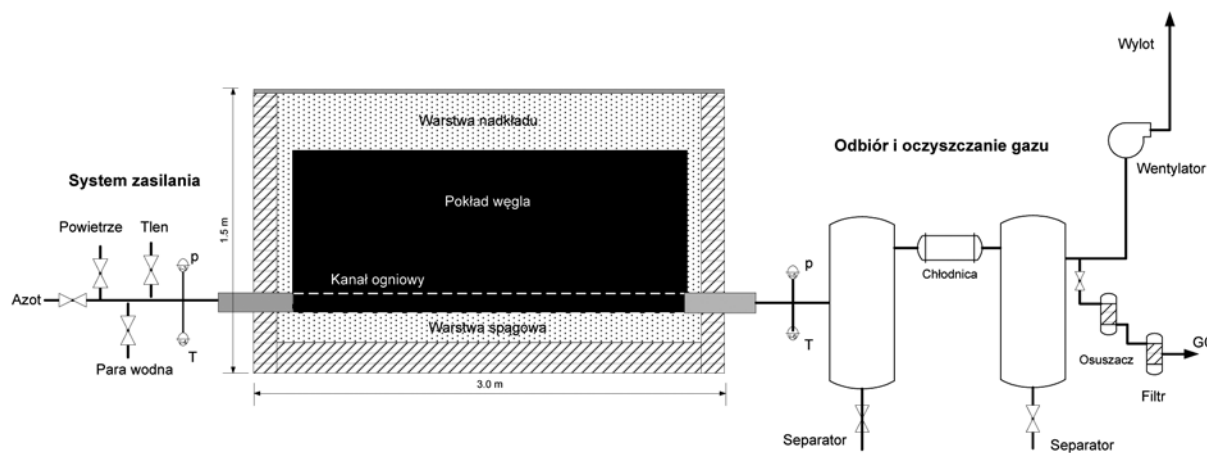
Badania prowadzone były z wykorzystaniem następujących instalacji doświadczalnych do symulacji procesu PZW w warunkach naziemnych (*ex-situ*):

- instalacja bezcisnieniowa o maksymalnej długości złoża 2,5 m,
- instalacja bezcisnieniowa o maksymalnej długości złoża 7,0 m,
- instalacja ciśnieniowa do 50 bar o maksymalnej długości złoża 3,5 m.

Konstrukcje wymienionych urządzeń dają możliwość uzyskania zbliżonych warunków geologicznych otoczenia reaktora podziemnego, zarówno w odniesieniu do pokładu węgla, jak i warstw otaczających oraz wyposażone są w niezbędną infrastrukturę techniczną do prowadzenia procesu zgazowania. Wykorzystane do badań instalacje przedstawiono w poniższych podrozdziałach.

2.1. Instalacja bezcisnieniowa *ex-situ* o długości złoża 2,5 m

Schemat instalacji bezcisnieniowej o długości złoża 2,5 m przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat instalacji doświadczalnej *ex-situ* 2,5 m do symulacji procesu podziemnego zgazowania węgla
Fig. 1. Scheme of the *ex-situ* experimental installation 2.5 m for the simulations of underground coal gasification

Geometria wewnętrzna komory reakcyjnej umożliwia utworzenie sztucznego pokładu węgla o maksymalnej długości ok. 2,5 m i wymiarach przekroju poprzecznego $0,8 \times 0,8$ m. Reaktor został zaprojektowany do prowadzenia symulacji procesu PZW pod ciśnieniem atmosferycznym, przy maksymalnych temp. procesu do $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jako czynniki utleniające stosowane mogą być tlen, powietrze, para wodna, podawane indywidualnie lub w mieszaninach o dowolnym stosunku objętościowym poszczególnych składników. Produkty gazowe podlegają oczyszczaniu w module oczyszczania składającym się z dwóch separatorów wilgoci, cząstek stałych oraz substancji olejowo-smolistych. Część produkowanego gazu kierowana jest ścieżką gazową do analizy chemicznej, gdzie po dodatkowym usunięciu wilgoci i cząstek stałych oznaczane zostają metodą chromatograficzną stężenia podstawowych składników gazu (H_2 , CO , CO_2 , CH_4). Profile temperaturowe mierzone są za pomocą zestawu 25 termopar umieszczonych na różnych wysokościach symulowanego złoża węgla oraz warstwy nadkładu.

2.2. Instalacja beciśnieniowa *ex-situ* o długości złoża 7,0 m

Instalacja beciśnieniowa umożliwia prowadzenie badań nad procesem PZW w symulowanym złożu węgla o maksymalnej długości 7,0 m i przekroju poprzecznym $1,0 \times 1,0$ m pod ciśnieniem atmosferycznym. Geometrię reaktora przedstawiono na rysunku 2.

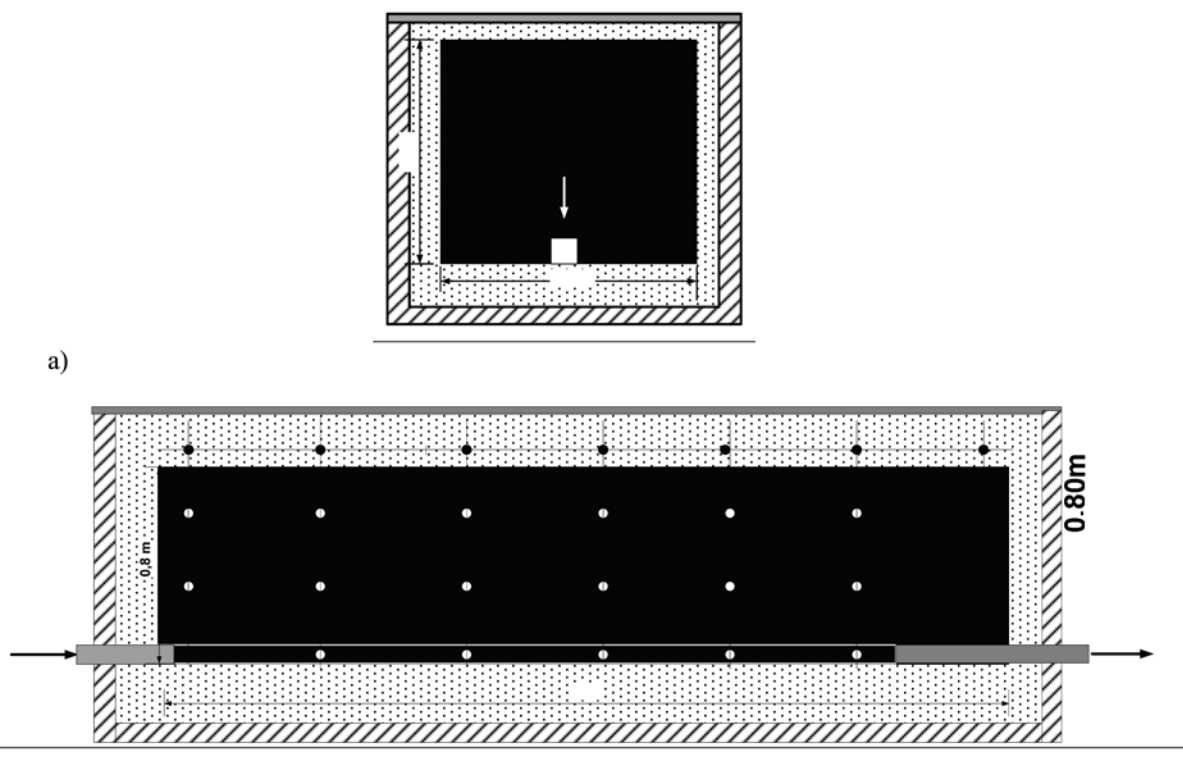
Maksymalna projektowana temperatura pracy instalacji wynosi $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zgazowanie prowadzone może być z zastosowaniem tlenu, powietrza oraz pary wodnej, podawanych indywidualnie lub w mieszaninach. Gaz surowy podlega oczyszczaniu w dedykowanym module separacji i oczyszczania, którego pierwszy element stanowi skrubler wodny

(mocne schłodzenie gazu oraz kondensacja smół procesowych). Następnie gaz kierowany jest do chłodnicy powietrznej, separatorów wilgoci, substancji olejowo-smolistych i cząstek stałych oraz chłodnicy wodnej. Część strumienia gazów kierowana jest ścieżką gazową do analizy chemicznej, gdzie metodą chromatograficzną oznaczane zostają stężenia podstawowych komponentów gazu oraz wybrane produkty uboczne (np. produkty smoliste). Profile temperaturowe reagującego układu mierzone są za pomocą zestawu 48 termopar umieszczonych w na różnych wysokościach symulowanego złoża węgla i warstwy nadkładu. Zdjęcia instalacji badawczej przedstawiono na rysunku 3.

2.3. Instalacja ciśnieniowa *ex-situ* (50 bar) o długości złoża 3,5 m

Instalacja ciśnieniowa umożliwia prowadzenie symulacji procesu PZW w zakresie ciśnień od 0 do 50 bar. Maksymalna długość złoża wynosi 3,5 m, a przekrój poprzeczny złoża: $0,42 \times 0,42$ m. Budowę reaktora zobrazowano na rys. 4.

Podobnie jak w przypadku wcześniej opisanych instalacji, czynnikiem zgazowującym może być tlen, powietrze, para wodna oraz wodór. Gaz surowy podlega oczyszczaniu w dedykowanym module separacji i oczyszczania, którego pierwszy element stanowi ciśnieniowy skrubler wodny. Pozostała część układu oczyszczania i analizy jest wspólna dla instalacji ciśnieniowej i beciśnieniowej i została opisana powyżej. Profile temperaturowe reagującego układu mierzone są przy pomocy zestawu 14 termopar. 7 termoelementów umieszczono w części spągowej wymurówki ogniotwórczej reaktora, pozostałe 7 w części stropowej wymurówki. Stanowisko ciśnieniowe przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 2. Przekroje komory reaktora atmosferycznego 7,0 m: a) poprzeczny, b) wzdłużny
Fig. 2. Sections of the atmospheric reactor 7.0 m: a) cross-section, b) longitudinal section

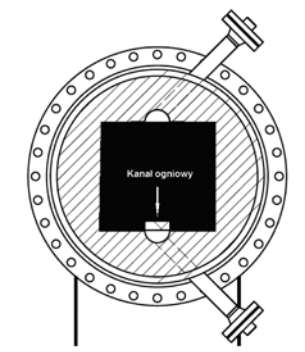


a)

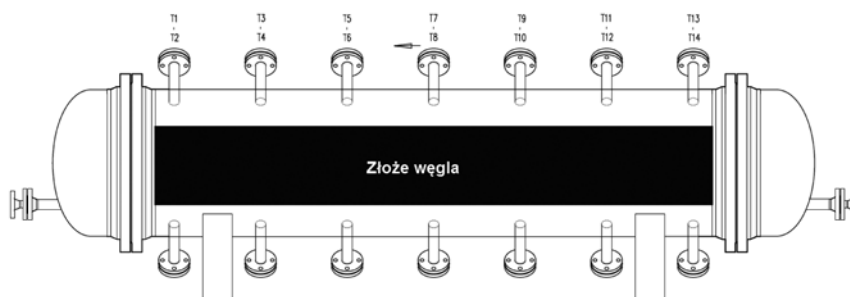
b)

Rys. 3. Stanowisko do symulacji procesu PZW w warunkach bezciśnieniowych o długości złoża 7 m: a) bok reaktora z termoparami, b) wyjście gazu z reaktora z instalacją skrubera mokrego

Fig. 3. Experimental stand for the simulations of UCG under atmospheric pressure with seam length 7.0 m: a) side view with thermocouples, b) gas outlet with water scrubber

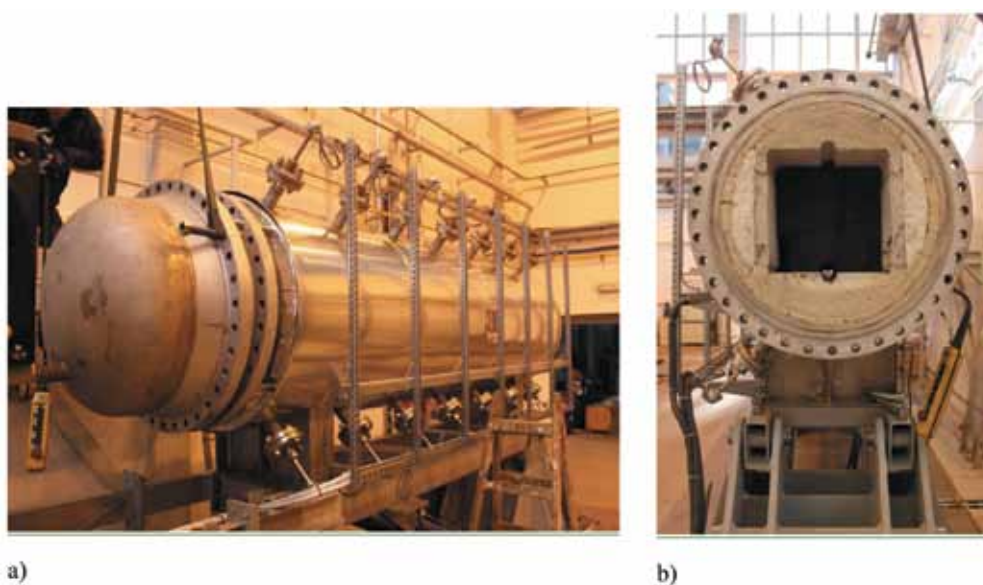


a)



b)

Rys. 4. Przekroje komory reaktora ciśnieniowego 3,5 m: a) poprzeczny, b) wzdłużny
 Fig. 4. Sections of the high-pressure reactor 3.5 m: a) cross-section, b) longitudinal section



Rys. 5. Stanowisko do symulacji procesu PZW w warunkach ciśnieniowych: a) bok reaktora, b) widok komory reaktora z załadowanym złożem

Fig. 5. Experimental stand for high-pressure simulations of UCG a) side view, b) reactor chamber with the artificial coal seam

3. Zakres prowadzonych badań oraz ich cel

Zasadniczym celem prowadzonych badań było określenie wpływu różnych konfiguracji kanałów ogniowych na przebieg procesu podziemnego zgazowania węgla. W szczególności przeprowadzone badania obejmowały określenie wpływu przyjętych konfiguracji kanałów ogniowych na:

- parametry jakościowe i ilościowe powstającego gazu,
 - kształt i rozwój w czasie kawerny poreakcyjnej,
 - rozkład profili temperaturowych w złożu w trakcie prowadzenia procesu,
- w zależności od zastosowanego węgla oraz rodzaju czynnika zgazowującego.

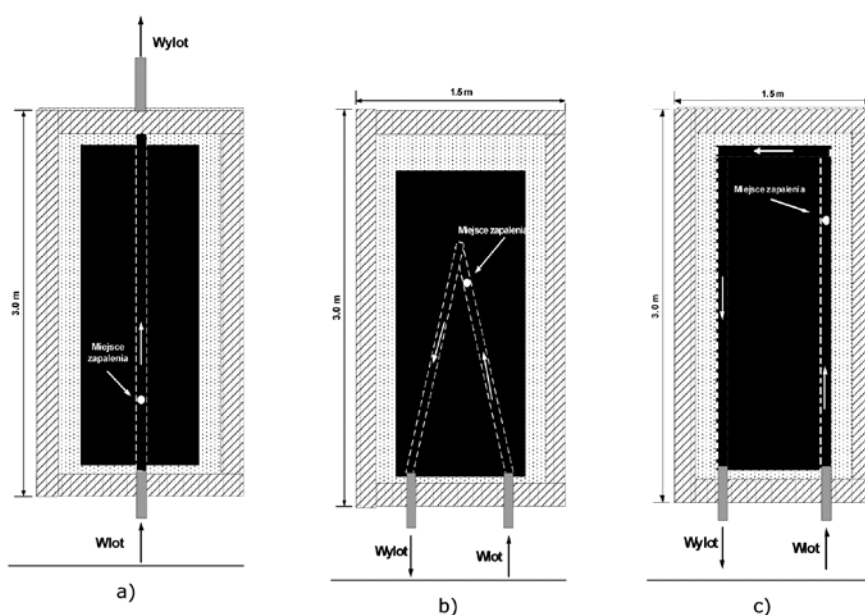
Doświadczenia w zakresie badania procesu PZW w skali

wielkolaboratoryjnej prowadzono dla uzyskania i weryfikacji założeń techniczno-technologicznych dla budowy reaktora pilotowego PZW w Kopalni Wieczorek.

Zgodnie z przewidzianym planem badawczym przeprowadzono sześć powierzchniowych symulacji eksperymentalnych procesu podziemnego zgazowania węgla. Przeprowadzone badania dotyczyły określenia zasadności prowadzenia procesu PZW z wykorzystaniem kanałów ogniowych o następujących konfiguracjach:

- konfiguracja prosta „I”,
- konfiguracja w kształcie tzw. litery „V”,
- konfiguracja w kształcie tzw. litery „U”.

Konfiguracje kanałów w rzucie przekroju poziomego zasymulowanego złoża węgla, przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Konfiguracje kanałów ogniowych testowane w przeprowadzonych eksperymentach: a) kanał prosty „I”, b) kanał w kształcie litery „V”, c) kanał w kształcie litery „U”

Fig. 6 Configurations of gasification channels tested in the experiments conducted: a) straight channel "I", b) "V"-shaped channel, c) "U"-shaped channel

Zestawienie przeprowadzonych eksperymentów z uwzględnieniem wykorzystanej do badań instalacji oraz zastosowanych węgla, geometrii kanałów ogniowych i rodzaju dmuchu przedstawiono w tablicy 1.

Charakterystykę fizykochemiczną węgla wykorzystanych do badań przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 1. Zestawienie i ogólna charakterystyka przeprowadzonych prób zgazowania

Table 1. Coal samples used and general characteristics of conducted gasification experiments

Nr	Pochodzenie węgla	Typ węgla	Konfiguracja kanału ogniowego	Długość złoża	Czynnik zgazowujący	Ciśnienie zgazowania	Instalacja badawcza ex-situ
1	KWK Ziemowit	kamienny	litera „U”	2,2 m	tlen	bezcisnieniowo	bezcisnieniowa 2,5 m
2	KWK Bobrek	kamienny	litera „V”	2,0 m	tlen	bezcisnieniowo	bezcisnieniowa 2,5 m
3	LW Bogdanka	kamienny	kanał prosty „I”	2,2 m	tlen	bezcisnieniowo	bezcisnieniowa 2,5 m
4	KWK Wieczorek	kamienny	litera „V”	2,25 m	tlen/powietrze	bezcisnieniowo	bezcisnieniowa 2,5 m
5	KWK Bobrek – Centrum	kamienny	kanał prosty „I”	3,5 m	tlen/powietrze	ciśnieniowo (5 bar)	ciśnieniowa 3,5 m
6	KWB Turów	brunatny	kanał prosty „I”	5,7 m	tlen	bezcisnieniowo	bezcisnieniowa 7,0 m

Tablica 2. Charakterystyka węgla wykorzystanych do badań

Table 2. Characteristics of coals used in the experiments

Nr	Parametr	Ziemowit	Bobrek	Bogdanka	Wieczorek	Bobrek-Centrum	Turów
	<i>Stan roboczy</i>						
1	Zawartość wilgoci całkowitej W_t^r , %	8,97	4,01	5,03	19,66	3,88	46,52
2	Zawartość popiołu A_t^r , %	5,36	10,02	5,97	14,38	14,79	3,18
3	Zawartość siarki całkowitej S_t^r , %	0,63	0,97	0,99	0,63	0,72	0,15
4	Wartość opałowa Q_i^r , kJ/kg	26 969	28 611	29 226	20 232	24 638	12 656
	<i>Stan analityczny</i>						
5	Zawartość wilgoci W^a , %	6,77	2,06	4,88	5,44	2,67	10,17
6	Zawartość popiołu A^a , %	5,47	10,22	5,98	16,92	14,98	5,34
7	Zawartość części lotnych V^a , %	35,91	33,22	34,76	29,65	28,15	44,90
8	Ciepło spalania Q_s^a , kJ/kg	28 782	30 327	30 448	25 295	26 015	24 192
9	Wartość opałowa Q_i^a , kJ/kg	27 581	29 242	29 277	24246	24 978	22 920
10	Zawartość siarki całkowitej S^a , %	0,64	0,99	0,99	0,74	0,73	0,26
11	Zawartość pierwiastka węgla C_t^a , %	69,60	73,61	73,39	62,14	67,18	60,69
12	Zawartość pierwiastka wodoru H_t^a , %	4,64	4,72	4,82	3,71	3,53	4,60
13	Zawartość pierwiastka azotu N^a , %	0,91	1,23	1,57	1,00	0,67	0,57
	<i>Stan suchy</i>						
14	Zawartość popiołu d , %	5,87	10,43	6,29	17,89	15,39	5,94
15	Zawartość siarki całkowitej S_t^d , %	0,69	1,01	1,04	0,78	0,75	0,29
	<i>Stan suchy i bezpopiołowy</i>						
16	Zawartość części lotnych V^{daf} , %	40,92	37,87	38,99	38,19	34,18	53,14
17	Ciepło spalania Q_s^{daf} , kJ/kg	32 797	34 573	34 158	32 580	31 591	28 633

4. Wyniki badań

Ze względu na fakt prowadzenia eksperymentów z zastosowaniem różnych rodzajów dmuchu (tlen i powietrze) oraz stosując różne rodzaje węgla (kamienny i brunatny), celem ułatwienia interpretacji uzyskanych wyników, dane eksperymentalne zestawiono dla następujących grup eksperymentów:

- zgazowanie węgla kamiennych w tlenie dla różnych konfiguracji kanałów ogniowych (próby beciśnieniowe Ziemowit i Bobrek),
- zgazowanie węgla kamiennych w mieszaninie powietrzno – tlenowej (próby beciśnieniowe Bogdanka i Wieczorek oraz próba ciśnieniowa Bobrek-Centrum),
- zgazowanie tlenowe węgla brunatnego Turów w warunkach beciśnieniowych.

Wyniki dla poszczególnych grup eksperymentów przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

4.1. Eksperymenty tlenowego zgazowania węgla kamiennych dla różnych konfiguracji kanałów ogniowych

W ramach tej części badań przeprowadzono serię dwóch powierzchniowych symulacji eksperymentalnych procesu PZW:

- próba Ziemowit – kanał ogniowy „U”,
- próba Bobrek – kanał ogniowy „V”.

Eksperymenty prowadzono w atmosferycznej instalacji *ex-situ* o maksymalnej długości złoża 2,5 m, opisanej w rozdziale 2.1. Zestawienie średnich składów, wartości opałowych oraz strumieni objętościowych gazów produkowanych w przeprowadzonych eksperymentach przedstawiono w tablicy 3.

Na podstawie danych bilansowych dotyczących ilości zgazowanego węgla oraz ilości wyprodukowanych gazów oszacowano średnią moc reaktora, sprawności energetyczne brutto procesów oraz wydajności energetyczne procesów w przeliczeniu na masę zużytego węgla. Wyniki szacunków wraz z wybranymi danymi przyjętymi do obliczeń przedstawiono w tablicy 4.

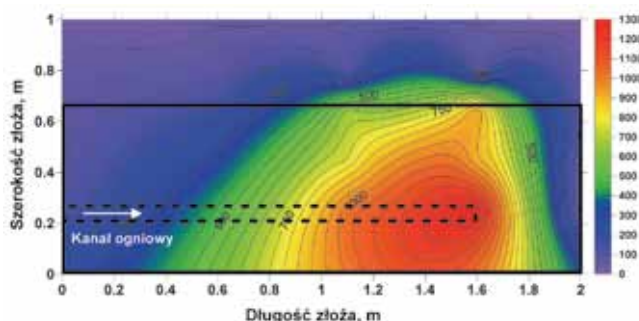
Maksymalne zmierzone temperatury w złożu w trakcie próby zgazowania Ziemowit wyniosły około 1350 °C i obserwowano je na poziomie 0,2 m nad kanałem ogniowym, blisko czoła złoża. W przypadku próby zgazowania Bobrek, maksymalne temperatury wyniosły około 1300 °C i zarejestrowano je na poziomie 0,25 m ponad spągiem, blisko miejsca połączenia kanałów zasilającego i odbierającego, tj. w strefie utleniania (rys. 7).

Tabela 3. Średnie składy i strumienie objętościowe gazów otrzymanych w próbach zgazowania Ziemowit i Bobrek
Table 3. Average gas compositions and gas production rates obtained in the experiments Ziemowit and Bobrek

Węgiel/konfiguracja kanału	Czas trwania, h	Produkcja gazu, Nm ³ /h	Skład, % _{obj}								WO ₂ , MJ/m ³
			CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	H ₂ S	
Ziemowit konfiguracja „U” całkowita długość kanału: 4,8 m	50	8,9	31,7	0,1	26,7	2,7	3,5	2,9	32,1	0,3	8,1
Bobrek konfiguracja „V” całkowita długość kanału: 3,4 m	72,5	10,4	32,1	0,0	15,8	0,7	3,1	0,7	47,5	0,1	8,0

Tabela 4. Wybrane parametry energetyczne charakteryzujące próby Ziemowit i Bobrek
Table 4. Selected energy parameters for experiments Ziemowit and Bobrek

Lp.	Parametr	Węgiel/konfiguracja kanału	
		Ziemowit konfiguracja „U”	Bobrek konfiguracja „V”
1	Moc reaktora, kW	21,4	23,1
2	Wydajność energetyczna, MJ/kg węgla	15,7	13,4
3	Sprawność energetyczna brutto, %	58,2	46,8



Rys. 7. Dwuwymiarowy profil temperaturowy uzyskany drogą interpolacji danych pomiarowych (25 punktów) w 50. godzinie prowadzenia próby Bobrek.

Fig. 7. Two-dimensional temperature profile obtained through interpolation of measurement data (25 points) at 50th hour of Bobrek experiment

4.2. Eksperymenty zgazowania węgla kamiennych z zastosowaniem mieszaniny powietrzno – tlenowej

W ramach tej części badań przeprowadzono serię trzech powierzchniowych symulacji eksperymentalnych procesu PZW:

- próba Bogdanka – kanał ogniowy prosty „I”,
- próba Wieczorek – kanał ogniowy „V”,
- próba Bobrek-Centrum - kanał ogniowy prosty „I”.

Eksperymenty Bogdanka i Wieczorek prowadzono beciśnieniowo w instalacji *ex-situ* o maksymalnej długości złoża 2,5 m. Eksperyment Bobrek-Centrum prowadzono w warunkach podwyższonego ciśnienia (5 bar) w ciśnieniowej instalacji *ex-situ* o długości złoża 3,5 m, opisanej w rozdziale 2.3. Zestawienie średnich składów, wartości opałowych oraz strumieni objętościowych gazów produkowanych w przeprowadzonych eksperymentach, w rozbiu na poszczególne etapy prowadzenia zgazowania przedstawiono w tablicach 5 ÷ 7.

Tablica 5. Średni skład oraz strumień objętościowy gazów otrzymanych w próbie zgazowania Bogdanka
Table 5. Average gas composition and gas production rate obtained in the experiment Bogdanka

Węgiel/ciśnienie/ konfiguracja kanału	Rodzaj zgazowania	Czas trwania, h	Produkcja gazu, Nm ³ /h	Skład, % _{obj}								WO, MJ/m ³
				CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	H ₂ S	
Bogdanka bezcisnieniowo konfiguracja prosta „I”	Powietrzno - tlenowe (stężenie tlenu ~60 %)	29,0	8,9	21,0	0,0	14,5	0,7	38,2	0,4	25,1	0,1	4,9

Tablica 6. Średni skład oraz strumień objętościowy gazów otrzymanych w próbie zgazowania Wieczorek
Table 6. Average gas composition and gas production rate obtained in the experiment Wieczorek

Węgiel/ciśnienie/ konfiguracja kanału	Etap zgazowania	Okres, h	Produkcja gazu, Nm ³ /h	Skład, % _{obj}							WO, MJ/m ³
				CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	
Wieczorek bezcisnieniowo konfiguracja „V”	I - tlen	0-48	10,8	15,1	0,03	32,9	1,4	5,6	2,1	42,9	9,7
	II – powietrze	48-82	8,8	13,2	0,02	4,8	1,2	77,4	0,7	2,7	1,1
	III – powietrze/tlen 44%	82-96	7,0	25,0	0,01	4,8	0,9	61,6	1,2	6,5	1,8

Tablica 7. Średni skład oraz strumień objętościowy gazów otrzymanych w próbie zgazowania ciśnieniowego(5 bar) Bobrek-Centrum
Table 7. Average gas composition and gas production rate obtained in the high-pressure (5 bar) experiment Bobrek-Centrum

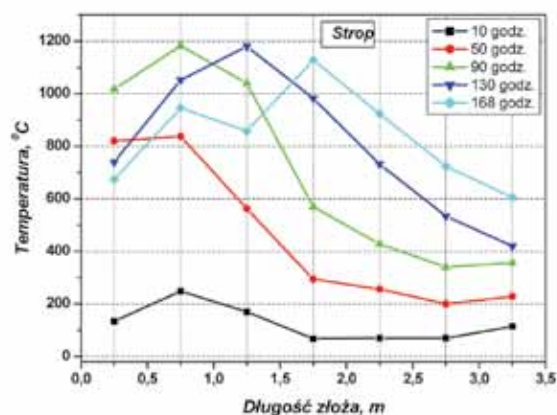
Węgiel/ciśnienie/ konfiguracja kanału	Etap/czynnik zgazowujący	Czas trwania, h	Produkcja gazu, Nm ³ /h	Skład, % _{obj}						WO, MJ/m ³
				CO ₂	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	
Bobrek - Centrum 5 bar konfiguracja prosta „I”	Etap I: Tlen	46	5,2	34,1	28,3	3,4	3,3	4,1	26,8	7,9
	Etap II: Powietrze wzbogacone w tlen (~30%)	122	10,6	20,2	7,3	0,0	60,7	2,2	9,4	2,8

Tablica 8. Wybrane parametry energetyczne charakteryzujące próby zgazowania powietrzno-tlenowego
Table 8. Selected energy parameters for the air-blown gasification experiments

Próba	Etap/czynnik zgazowujący, Nm ³ /h	Moc reaktora, kW	Wydajność energetyczna, MJ/kg węgla	Sprawność energetyczna brutto, %
Bogdanka bezcisnieniowa	powietrze/tlen 60%	12,1	14,4	49,3
Wieczorek bezcisnieniowa	Etap I: tlen	29,3	15,9	78,8
	Etap II: powietrze	2,8	6,7	33,1
	Etap III: powietrze/tlen 44%	3,4	5,3	26,2
Bobrek-Centrum cisnieniowa (5 bar)	Etap I: Tlen	11,3	14,9	60,5
	Etap II: Powietrze wzbogacone w tlen (~30%)	8,5	11,0	44,5

Wyniki bilansowania energetycznego dla przeprowadzonych prób przedstawiono w tablicy 8.

Maksymalne temperatury w złożu w trakcie próby Bogdanka wyniosły około 1200 °C i obserwowano je w kanale ogniowym w okolicach miejsca zapalenia złoża. W przypadku próby Wieczorek, maksymalne zmierzone temperatury w złożu wyniosły również ok. 1200 °C i zarejestrowano je w końcowej fazie zgazowania tlenowego na poziomie 0,60 m ponad spągiem, blisko miejsca połączenia kanałów zasilającego i odbierającego. W trakcie ciśnieniowej próby zgazowania Bobrek-Centrum rozkład temperatur mierzono w 14 punktach pomiarowych, obrazujących rozkład temperatur wzdłuż osi podłużnych kanału ogniowego oraz stropu złoża węglowego (3,5 m). Maksymalne obserwowane temperatury w trakcie próby Bobrek-Centrum wyniosły ok 1200 °C i obserwowano je w części stropowej zgazowywanego pokładu węgla (rys. 8).



Rys. 8. Rozkłady temperatur w części stropowej złoża w trakcie próby zgazowania Bobrek-Centrum
Fig. 8. Temperature distribution in the floor of coal bed during Bobrek-Centrum experiment

4.3. Eksperyment zgazowania węgla brunatnego w tlenie

Średni skład oraz wartość opałowa gazu otrzymanego w trakcie próby zgazowania węgla brunatnego przedstawiono w tabelicy 9.

Tabela 9. Średni skład oraz wartość opałowa gazu produkowanego w trakcie próby Turów

Table 9. Average gas composition and gas calorific value obtained in the experiment Turów

Próba	Czas trwania, h	Skład, % _{obj}						WO, MJ/m ³
		CO ₂	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	
Bezcisnieniowa węgiel brunatny Turów	120	45,3	29,8	0,2	3,7	5,2	15,5	7,2

Na podstawie danych bilansowych dotyczących ilości zgazowanego węgla oraz ilości wyprodukowanych gazów oszacowano średnie moce reaktora w poszczególnych etapach, sprawności energetyczne brutto oraz wydajności energetyczne procesu w przeliczeniu na masę zużytego węgla. Wyniki szacunków wraz z wybranymi danymi przyjętymi do obliczeń przedstawiono w tabelicy 10.

Tabela 10. Wybrane parametry energetyczne charakteryzujące próbę zgazowania Turów

Table 10. Selected energy parameters for the gasification experiment Turów

Próba	Moc reaktora, kW	Wydajność energetyczna, MJ/kg węgla	Sprawność energetyczna brutto, %
Bezcisnieniowa węgiel brunatny Turów	13,9	7,4	58,8

Maksymalne zmierzone temperatury w złożu w trakcie próby Turów wyniosły około 900 °C i obserwowano je na poziomie 0,3 m ponad spągami, w okolicach miejsca zasilania reaktora (strefa utleniania).

5. Dyskusja wyników i wnioski

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że dla przyjętych geometrii złożów węglowych, najkorzystniejsze warunki przebiegu procesu zgazowania obserwowano w przypadku stosowania czystego tlenu. Średnie wartości opałowe gazu produkowanego w trakcie zgazowania węgla kamiennych tlenem mieściły się w przedziale od 7,6 do 9,7 MJ/Nm³, a uzyskiwane sprawności energetyczne procesu mieściły się w przedziale od 46,8 % (Bobrek) do 79 % (Ziemowit). Zamiana czynnika zgazowującego na powietrze powodowała znaczny spadek temperatur w reagującym układzie, skutkujący wyraźnymi spadkami stężeń głównych składników palnych gazu (H₂, CO) i obniżeniem wartości opałowej gazu, często do poziomu uniemożliwiającego jego gospodarcze wykorzystanie (~1 MJ/Nm³ w przypadku procesu bezcisnieniowego).

W warunkach podniesionego ciśnienia zgazowania powietrzem uzyskiwano wyższą wartość opałową gazu, głównie z powodu zwiększenia udziału metanu w gazie. Zaznaczyć jednak trzeba, że uzyskane wyniki zgazowania powietrznego przypisane mogą być tylko do wykorzystanej do badań geometrii układu, w której niemożliwe było uzyskanie temperatur odpowiednio wysokich dla prawidłowego przebiegu procesu

zgazowania. Sytuacja ta może się zmienić w przypadku znacznego powiększenia skali eksperymentu.

Wydłużenie całkowitej długości kanałów ogniowych w badanych konfiguracjach „V” oraz „U” w stosunku do długości kanałów w reaktorze skonstruowanym wg tzw. „konfiguracji prostej”, powoduje znaczne zwiększenie powierzchni kontaktu produkowanych gazów z węglem oraz intensyfikację zjawisk nagrzewania się kanału zbiorczego od strony kanału produkcyjnego. W wyniku tego obserwuje się intensyfikację reakcji heterogenicznych (szczególnie endotermicznych) na granicy gaz – węgiel, w tym reakcję CO₂ z węglem pierwiastkowym, prowadzącą do zwiększenia udziału CO w produkcie (reakcja Boudouarda). Taki przebieg procesu może być korzystny w przypadku energetycznego zagospodarowania produktów gazowych (spalanie, produkcja energii elektrycznej), ze względu na stosunkowo wysoką kaloryczność tlenu węgla lub w przypadku, kiedy zwiększony udział CO w gazie jest korzystny ze względu na dalsze kierunki przetwarzania gazu syntezowego (synteza chemiczna).

Złożone konfiguracje kanałów ogniowych, których przykład stanowią układy typu „V” i „U” (próby Ziemowit, Bobrek, Wieczorek), przyczyniają się do znacznych wzrostów oporów przepływu czynników zgazowujących oraz odbioru produkowanego gazu. Parametrami decydującymi o utrzymaniu strefy reakcji w założonym miejscu kanału będą więc prędkości przepływu czynników zgazowujących oraz odbioru produktu, a utrzymanie optymalnych parametrów pracy reaktora będzie w dużej mierze zależne od doboru odpowiednich średnic kanałów ogniowych. Konfiguracje kanałów ogniowych typu „V” i „U” podatne są na zmniejszenie przekrojów czynnych w związku z możliwością gromadzenia się zanieczyszczeń mechanicznych (pyłu, kawałków odpadającego złoża i stropu) w miejscach zmiany kierunku przepływu gazu. Ze względu na ograniczone ryzyko powstawania zatorów kanału ogniowego, ryzyko wystąpienia problemów eksploatacyjnych w przypadku prowadzenia procesu PZW w układzie kanałów prostych jest dużo mniejsze w porównaniu do realizacji procesu w układach złożonych. Wykonanie reaktora podziemnego w układzie kanałów prostych jest również dużo prostsze z technicznego punktu widzenia.

Eksperyment tlenowego zgazowania węgla brunatnego w warunkach bezcisnieniowych wykazał możliwość uzyskania w sposób ciągły gazu o stosunkowo wysokiej wartości opałowej (7,2 MJ/Nm³) z wysoką sprawnością energetyczną brutto ~59 %. Uzyskane rezultaty odniesiono do wcześniejszych prób GIG (proj. HUGE) z wykorzystaniem węgla brunatnego o porównywalnych parametrach, w których produkowano gaz o wartości opałowej około 4 MJ/Nm³ z niską sprawnością energetyczną wynoszącą około 20 %. Polepszenie uzyskanych parametrów procesowych przypisuje się znacznemu zwiększeniu długości otworu generatorowego (z ~2,5 do ~6m), który umożliwił wyraźne wytworzenie się pożądaných stref zgazowania (utleniania, redukcji, odgazowania) oraz polepszenie bilansu cieplnego układu.

Literatura:

1. *Nieć M.*: Geologiczne bariery i ograniczenia dla podziemnego zgazowania węgla, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 2012; 448:183-194
2. *Liu S, Wang Y, Yu L, Oakey J.*: Thermodynamic equilibrium study of trace element transformation during underground coal gasification. Fuel Processing Technology 2006; 87:209-215
3. *Liu S, Wang Y, Yu L, Oakey J.*: Volatilization of mercury, arsenic and selenium during underground coal gasification. Fuel 2006; 85:1550-1558

4. *Yulan Li, Xinxing L, Jie L.*: An overview of the Chinese UCG Program, Data Science Journal, Volume 6, Supplement, 11 August 2007
 5. *Kostur K, Blistanova M.*: The research of underground coal gasification in laboratory conditions, Petroleum & Coal 51 (1), 1-7, 2009
 6. *Prabu V, Jayanti S.*: Laboratory scale studies on simulated underground coal gasification of high ash coals for carbon-neutral power generation Energy 46 (2012) 351÷358
 7. *Kapusta K, Stańczyk K.*: Pollution of water during underground coal gasification of hard coal and lignite, Fuel 2011; 90:1927÷1934.
 8. *Stańczyk K, Howaniec N, Smoliński A, Świądrowski J, Kapusta K, Wiatowski M, Grabowski J, Rogut J.*: Gasification of lignite and hard coal with air and oxygen enriched air in a pilot scale ex situ reactor for underground gasification, Fuel 2011; 90:1953÷1962
 9. *Stańczyk K, Smoliński A, Kapusta K, Wiatowski M, Świądrowski J, Kotyrba A.*: Dynamic experimental simulation of hydrogen oriented underground coal gasification of lignite, Fuel 2010; 89:3307÷3314
 10. *Stańczyk K., Kapusta K., Wiatowski M., Świądrowski J., Smoliński A., Rogut J., Kotyrba A.*: Experimental simulation of hard coal underground gasification for hydrogen production. Fuel 2012; 91, 40÷50
 11. *Stańczyk K, Dubiński J, Cybulski K, Wiatowski M, Świądrowski J, Kapusta K, Rogut J, Smoliński A, Krause E, Grabowski J.*: Podziemne zgazowanie węgla – doświadczenia światowe i eksperymenty prowadzone w KD Barbara, Polityka Energetyczna 2010; 13,2:423÷432
-
-