ZGAZOWANIE WĘGLA BRUNATNEGO W REAKTORZE ZE ZŁOŻEM STAŁYM

GASIFICATION OF BROWN COAL IN A LABORATORY SCALE FIXED BED REACTOR

Amelia Zielińska, Kazimierz Grabas - "Poltegor - Instytut" Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

W pracy przedstawiono wyniki badania zgazowania węgla brunatnego z kopalni „Turów" w reaktorze ze złożem stałym. Scharakteryzowano konwersję materii organicznej węgla brunatnego do gazu syntezowego, który charakteryzował się znaczną wartością opałową. Badano wpływ czynnika zgazowującego, temperatury i ciśnienia na skład otrzymywanych gazów.

Słowa kluczowe: *węgiel brunatny, zgazowanie, instalacja laboratoryjna, gaz syntezowy*

The paper presents the results of the research on gasification of lignite from the Turów mine in a reactor with a fixed bed. The conversion of brown coal organic matter to synthesis gas, which was characterized by a significant calorific value. The influence of the gasification agent, temperature and pressure on the gas compositions was investigated.

Keywords: *brown coal, gasification, laboratory installation, synthesis gas*

Wstęp

Polska należy pod względem rozpoznanych i eksploatowanych złóż węgla brunatnego do najbardziej zasobnych i przodujących, w rocznym wydobyciu krajów w Europie i na świecie. W rankingu państw wydobywających węgiel brunatny Polska zajmuje 8 miejsce na świecie, za Niemcami, Chinami, Turcją, Rosją, Stanami Zjednoczonymi, Australią i Grecją [1-3].

Korzystne warunki geologiczne i wykorzystywane nowoczesne technologie wydobycia, wyłącznie metodą odkrywkową sprawiają, że w przeliczeniu na wartość opałową (kaloryczność) węgiel brunatny jest i pozostanie najtańszym źródłem energii w Polsce [3]. W termicznych metodach przetwarzania węgla wyróżnia się trzy podstawowe procesy: spalanie, pirolizę i zgazowanie.

Spalanie

Tradycyjne wykorzystanie węgla brunatnego wiąże się z jego spalaniem z nastawieniem na odzysk i wykorzystaniem energii. Spalanie surowca powoduje przenikanie do atmosfery zanieczyszczeń w postaci m. in.: tlenku węgla, dwutlenku siarki, tlenków azotu oraz metali ciężkich. Negatywnie wpływa to na zdrowie zwierząt i co gorsza ludzi mieszkających w okolicach elektrowni i miejsca wydobycia, kopalni, powodując różnego rodzaju choroby dróg oddechowych. Węgiel brunatny w krajowej energetyce pełni rolę paliwa strategicznego. W elektrowniach opalanych węglem brunatnym zainstalowanych jest ponad 9200 MW mocy [4]. Głównymi produktami spalania są CO_2 i H_2O. Emisja CO_2 jest wyzwaniem w poszukiwaniu i wdrożeniu nowoczesnych, niskoemisyjnych technologii wraz z sekwestracją CO_2 [5,6]

Piroliza

Jedną z alternatywnych metod dla procesu spalania jest piroliza. Proces ten prowadzony jest bez dostępu czynnika utleniającego. Celem pirolizy jest przekształcenie frakcji organicznej węgla brunatnego w stałą pozostałość (karbonizat) wydzielając przy tym części ciekłe oraz lotne w postaci smoły pirolitycznej i gazu pirolitycznego. Obecnie piroliza węgla brunatnego, poprzez zmianę warunków procesowych takich jak: temperatura [7], wpływ CO_2 [8] czy prowadzenie procesu z udziałem biomasy oraz odpadów takich jak tworzywa sztuczne (tzw. współpiroliza) [9] umożliwia uzyskanie cennych produktów ciekłych (oleje).

Zgazowanie

Kolejnym procesem zastępującym tradycyjne spalanie jest zgazowanie, w którym następuje przeprowadzenie węgla z fazy stałej do gazowej z udziałem czynnika zgazowującego (powietrze, tlen, para wodna lub ich mieszanina). Naziemne zgazowanie węgla jest technologią o wysokiej efektywności procesu. Proces można łatwo kontrolować, dzięki czemu nie stwarza zagrożenia zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Alternatywą dla naziemnych metod zgazowania jest podziemne zgazowanie węgla [10]. Podstawową wadą tej metody jest brak pełnej kontroli procesu oraz szkody środowiskowe. Według raportu "Fuelling the Fire" [11] taki sposób postępowania z surowcem węglowym powodował poważne straty w środowisku naturalnym m.in. zanieczyszczenia warstw wodonośnych produktami spalania, osiadania powierzchni terenu, a ponadto obserwowano działanie toksyczne i właściwości wybuchowe powstających substancji gazowych.

Technologie oparte na wodorze i gazie syntezowym wykorzystywane do produkcji energii są bardziej wydajne od technologii konwencjonalnych [12].

Rozwój tzw. **czystych technologii węglowych** (CTW), stał się koniecznością ze względu na przyjęte zobowiązania krajów UE dotyczące polityki Unii Europejskiej (strategia „2020") uwzględniającej tzw. „pakiet klimatyczny" oraz „pakiet zimowy" - ograniczający poziom emisji do wysokości 550g CO_2 na 1 kWh energii elektrycznej, co znacznie ograniczy energetykę węglową, której udział w Polsce szacuje się na ok. 90 %. Wiąże się to nierozerwalnie z likwidacją części, a w najbardziej optymistycznym wariancie, z ograniczeniem wydobycia węgla, w tym szczególnie węgla brunatnego, który jest bardzo emisyjnym paliwem [13]. Ze względu na posiadane zasoby węgla brunatnego oraz wykorzystanie ich w gospodarce, w tym głównie energetyce (paliwo strategiczne) i potrzeba ograniczenia emisji szkodliwych gazów, konieczne staje się poszukiwanie efektywniejszego i ekologicznego wykorzystania węgla brunatnego w gospodarce. Jednym z interesujących kierunków spełniających wyżej wymienione wymogi jest wykorzystanie go jako surowca do produkcji alternatywnych nośników energii [6]. Należą do nich przeróbka chemiczna, produkcja paliw płynnych i gazowych oraz wodoru [3, 14-17].

Proces zgazowania posiada kilka etapów obejmujących następujące procesy fizykochemiczne:

- suszenie (odparowanie wilgoci),
- piroliza - wydzielenie części lotnych (CO, CH_4, H_2, CO_2, produkty smoliste, oleje),
- reakcje składników lotnych w fazie gazowej,
- heterogeniczne reakcje fazy stałej (karbonizat) ze składnikami fazy gazowej (para wodna, O_2, CO_2, CO, H_2,
- tworzenie popiołów i żużla przez substancje mineralne znajdujące się w węglu.

Suszenie odbywa się w temperaturze poniżej 150°C, co pozwala na ubytek masy materiału, głównie wody. Następnie prowadzona jest piroliza w zakresie temperatur 150-700°C (CO, CH_4, H_2, CO_2, produkty smoliste, itp.), kolejno zgazowanie, które następuje w zakresie 700-1500°C. Ostatnim etapem jest dopalanie stałej pozostałości - występuje w zakresie 800-1100°C [18]. Reaktory/urządzenia wykorzystywane do zgazowania są klasyfikowane w zależności od tego, w jaki sposób gazy i surowiec/substancja zgazowywana kontaktują się ze sobą. W zależności od ciśnienia reaktory są klasyfikowane jako atmosferyczne lub ciśnieniowe. Ponadto, jeżeli reaktory są ogrzewane za pomocą źródła zewnętrznego, wówczas są one znane jako reaktory allotermiczne, a jeśli ciepło jest dostarczane przez częściowe spalanie surowca, są one znane jako reaktory samoczynne lub bezpośrednio ogrzewane. Zgazowanie przekształca surowiec poprzez rozkład zawartej substancji organicznej w gaz składający się głównie z: H_2, CO, CO_2 oraz CH_4. Surowy gaz poddawany jest obróbce polegającej na ochłodzeniu, wstępnemu oczyszczaniu oraz usunięciu zanieczyszczeń do poziomów wymaganych technologią docelową [19] prowadząc do uzyskania gazu syntezowego „syngazu". Gaz syntezowy należy do ważnych produktów, wykorzystywanych przez przemysł chemiczny szczególnie w tzw. „wielkiej syntezie", jako surowiec do produkcji m.in. amoniaku, wodoru, metanolu i produktów pochodnych aldehydu mrówkowego (półprodukt do produkcji żywic syntetycznych, włókien chemicznych), eteru metylo-tert-butylowego (MTBE), estrów metylowych i innych, aldehydów i alkoholi, węglowodorów w procesach syntezy GtL (Gas to Liquid).

Część eksperymentalna

Właściwości próbki węgla brunatnego

Próbkę węgla do badań pobrano ze złoża, PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. Oddział Kopalnia Węgla Brunatnego Turów, zlokalizowanego w południowo zachodniej części Polski w województwie dolnośląskim, w gminie Bogatynia.

Węgiel scharakteryzowano na podstawie analizy technicznej i analizy elementarnej. Podczas analizy technicznej oznaczono następujące parametry: wilgoci W, popiołu A i części lotnych w węglu V, a ponadto: ciepło spalania Qs oraz oblicza się wartość opałową Qi. Analiza elementarna obejmowała określenie zawartości pierwiastków C, H, O, S, N, P i innych w węglu.

Tab. 1. Wyniki analiz fizykochemicznych węgla brunatnego z KWB Turów w Bogatyni

Tab.1. Results of physicochemical analyzes of brown coal from KWB Turów in Bogatynia

Rodzaj analizy	Wyniki
Zawartość wilgoci przemijającej [% mas.]	15,00
Zawartość wilgoci związanej [% mas.]	8,00
Zawartość popiołu [% mas.]	4,70
Wartość opałowa Q_{VDI} [kJ/kg]	8799
Zawartość węgla całkowitego C_{daf} [%]	58,09
Zawartość siarki całkowitej S_{daf} [%]	1,19
Zawartość azotu N_{daf} [% mas.]	0,45
Zawartość tlenu O_{daf} [% mas.]	35.86
Zawartość wodoru całkowitego H_{daf} [% mas.]	4,41
Zawartość części lotnych V_{daf} [%]	56,55

daf – stan suchy i bezpopiołowy
VDI - formuła VDI (zgodnie z normą PN–81/G–04513)

Właściwości fizykochemiczne węgla brunatnego, ze złoża kopalni Turów, zastosowanego w eksperymencie przedstawiono w tabeli 1.

Instalacja zgazowania

Stanowisko badawcze instalacji do zgazowania węgla brunatnego przedstawiono na rysunku 1. Głównym aparatem instalacji jest modułowy reaktor ze stali, do prowadzenia ciśnieniowego zgazowania o średnicy wewnętrznej (segment 1) - 428 mm, (segment 2) – 185 mm i całkowitej wysokości 1580 mm. Reaktor jest izolowany, od wewnątrz, przed znacznymi stratami ciepła, elementami szamotowymi oraz w dolnej części (segment 1) dodatkowo wełną mineralną. W skład instalacji wchodzą jeszcze urządzenia towarzyszące: zasilanie elektryczne grzałki z transformatorem 24 V, system sterowania procesem wraz z wizualizacją, butle gazowe, aparatura kontrolno-pomiarowa służąca do pomiaru ciśnienia i temperatury, analizatory składu gazów zblokowane w module pomiarowym, chłodnica wodna, kolumna oczyszczania i kondycjonowania gazu, orurowanie, zamknięcie hydrauliczne wraz z kominem odprowadzającym gazy zakończonym zapłonnikiem pochodni, zawory. Próbki powstających gazów analizowano i rejestrowano w sposób ciągły analizatorami składu gazów firmy Siemens.

Przebieg procesu

Rozdrobnioną do wielkości 3-8 cm próbkę węgla brunatnego o całkowitej masie 19,8 kg umieszczono w dolnej części reaktora (segment 1) nad i pomiędzy spiralą grzałki elektrycznej o mocy 5 kW pozostawiając wzdłuż warstwy materiału centralnie umiejscowiony kanał. Strefy suszenia i kolejno spalania oraz zgazowania przy takim usytuowaniu, przesuwały się od dolnej do górnej części zgazowywanego węgla. Wnętrze reaktora ogrzewano przez okres 30 minut wprowadzając od dołu powietrze wzbogacone w tlen.

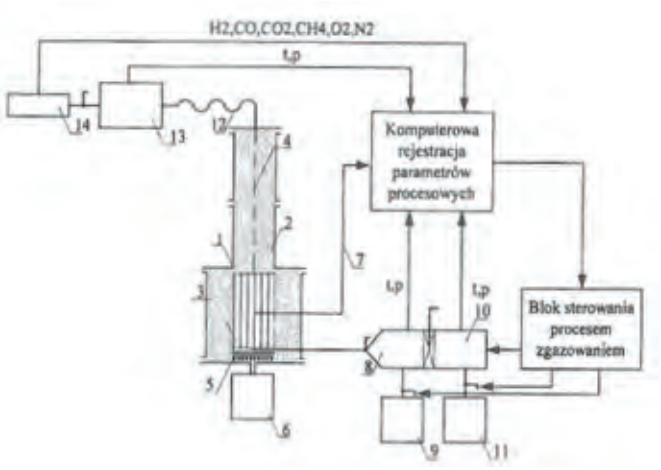


Fig. 1. Schemat układu eksperymentalnego zgazowania węgla brunatnego 1. Reaktor, 2. Możliwość wypełnienia reaktora kształtkami ceramicznymi lub utworami geologicznymi (nadkład), 3. Wsad, złoże węgla brunatnego w komorze zgazowania, 4. Kanał odprowadzania gazów poreakcyjnych, 5. Grzałka elektryczna 5 kW, 6. Zasilanie elektryczne 24 V, 7. Pomiar temperatury i ciśnienia w reaktorze, 8. Zbiornik pary wodnej z podgrzewaniem, 9. Wytwornica pary wodnej, 10. Zbiornik powietrza (tlenu) z podgrzewaniem, 11. Butla sprężonego powietrza (tlenu) lub sprężarka, 12. Chłodnica wężownica, 13. Zbiornik gazów (pomiar ilości gazów), 14. Analizator gazów

Fig.1. Scheme of the experimental brown coal gasification setup 1. Reactor, 2. Possibility of filling reactors with ceramic fittings or geological formations (overburden), 3. Charge, brown coal bed in the gasification chamber, 4. Post-reaction channels discharge channel, 5. 5 kW electric heater, 6. 24 V power supply, 7. Measurement of temperature and pressure in the reactor; 8. Steam tank with heating; 9. Steam generator; 10. Air (oxygen) reservoir with heating, 11. Compressed air cylinder (air) or compressor, 12. Cooler, coil, 13. Installation tank (quantitative installations), 14. Installation analyzer

W początkowej fazie procesu, gdy do reaktora dostarczana była energia w postaci ciepła, w wyniku czego temperatura układu systematycznie wzrastała, następowało odparowanie wody, która stanowiła 15% wsadu węglowego oraz przechodzenie lotnych składników węglowodorowych i gazowych. W miarę dostarczania energii do układu oraz w wyniku doprowadzania do reaktora mieszanki gazowej wzbogaconej w tlen obserwuje się powstawanie dwutlenku węgla oraz wodoru i metanu w bardzo zbliżonej ilości wyrażonej w % objętościowych (tab. 4). Wprowadzenie tlenu do układu powietrza skutkuje tym, że węgiel elementarny utlenia się i przebiegają intensywne procesy odgazowania, pirolizy i zgazowania. Korzystne warunki temperaturowe i składu mieszanki gazowej bogatej w dwutlenek węgla sprzyjają konwersji węgla pierwiastkowego do tlenku węgla. Ubytek węgla pierwiastkowego zmienia proporcje udziału wodoru i metanu. Rozpoczyna się zużywanie wodoru i metanu, których udział w końcowej fazie wynosi 0,396 i 0,008% obj. Dominującym składnikiem staje się azot (nie uwzględniony na wykresach), gdyż jest gazem intertnym. Jego obecność przyczynia się do obniżenia wartości opałowej gazu.

Po rozpoczęciu produkcji gazu z węgla brunatnego rozpoczęto pomiar kluczowych parametrów, a w miarę zgazowywania wytwarzał się popiół w miejsce węgla brunatnego. Część gazów wytworzonych podczas zgazowania przepuszczono przez układ kondensacyjny, który wykraplał wysokowrzące składniki, a następnie kolumnę hybrydową oczyszczania i kondycjonowania gazu, gdzie następowało dalsze usuwanie zanieczyszczeń, aby umożliwić przedostanie się czystego gazu do analizatorów gazu. Reprezentatywne próbki gazu pobierano do ampuł szklanych do pomiarów off-line. Gazy następnie analizowano za pomocą chromatografu gazowego Perkin Elmer Autosystem XL model Arnel M 2008.

Parametry procesu

Procesowi zgazowania w laboratoryjnej instalacji poddano próbkę o masie 19,8 kg o uśrednionych parametrach próbki podanych w tabeli 1. Proces zgazowania prowadzono w przedziale temperatur 300-430ºC przez 320 minut pod ciśnieniem 5 atm. Kontrolowane parametry procesu i metoda pomiaru:

- Temperatura w komorze spalania/zgazowania (za pomocą termopary w dolnej części komory (segment 1)
- Temperatura spalin/powstających gazów (za pomocą termopar z przetwornikami prądowymi)
- Ciśnienie (za pomocą manometru przemysłowego i przetwornika ciśnienia)
- Doprowadzenie gazów (powietrze, tlen), regulacja zaworami kulowymi z napędem pneumatycznym
- Skład gazów (za pomocą analizatorów Colomat 6, Ultramat 23 i Oxymat 61 firmy Siemens), oraz pomiar kontrolny składu gazów metodą chromatografii gazowej w zależności od etapu procesu

- Przepływ gazów (przepływomierze, regulacja zaworami dozującymi media procesowe)

W trakcie zgazowania podawano, mierząc przepływomierzami pływakowymi, mieszaninę czynników zgazowujących w postaci: powietrza, tlenu oraz azotu jako środowiska reakcji. Ilości zużytych w procesie mediów gazowych w poszczególnych fazach procesu podano w tabeli 2.

Tab. 2. Czynniki zgazowujące (powietrze, tlen) oraz gaz inertny (azot) użyte w procesie zgazowania węgla brunatnego
Tab. 2. Gasifying agents (air, oxygen) and inert gas (nitrogen) used in the lignite gasification process

Podane media Etap	Powietrze [Nm³]	Tlen [Nm³]	Azot [Nm³]
Rozpalanie	5,80	1,30	4,53
Etap1	13,29	4,06	10,36
Etap2	15,81	5,00	12,33
Etap końcowy	6,87	2,44	5,36
Suma/średnia	41,77	12,81	32,58

Rozkład temperatur procesu zgazowania przedstawiono na rysunku 2.

Wyniki i dyskusja

W czasie procesu zgazowania rejestrowano ilość i skład gazów w poszczególnych etapach procesu. Skład procentowy powstających gazów podczas procesu przedstawiono na rysunku 4. Ponadto kontrolnie pobrano i wykonano analizę chromatograficzną powstałych gazów, które pobierano do ampuł szklanych co 90 sekund. Pozwoliło to na wykonanie analizy porównawczej otrzymanych gazów.

Porównanie składu gazów mierzonych analizatorami modułu pomiarowego (poz. 13 i 14 rysunek 1) z pobranymi do analizy chromatograficznej próbkami gazów przedstawiono w tabeli 4.

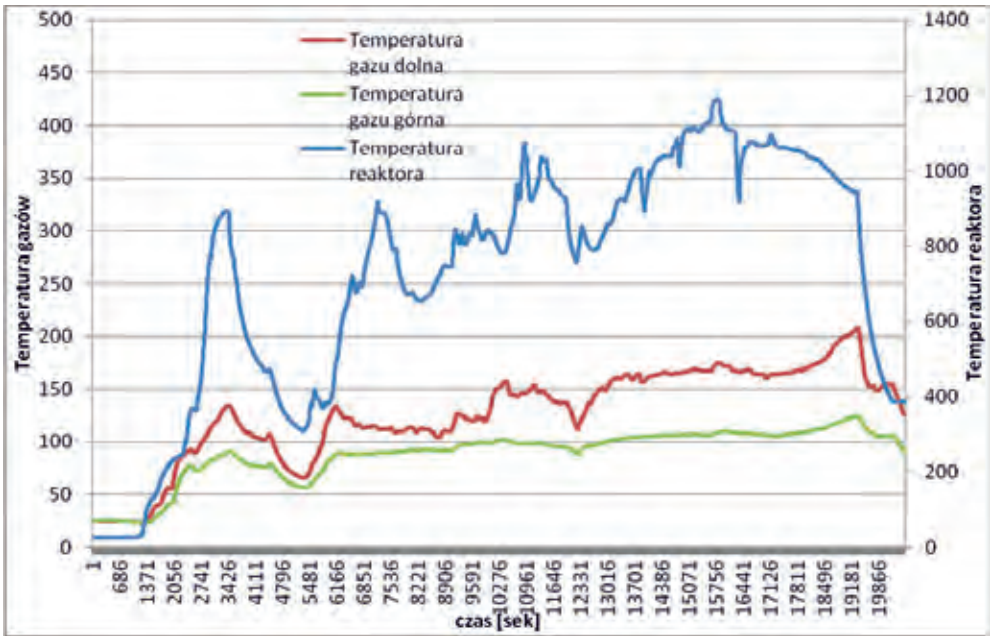
Analiza porównawcza gazów uzyskanych podczas rejestracji ciągłej z wykorzystaniem analizatorów gazów i wynikami analizy chromatograficznej wykazuje zbieżność. Wyraźne różnice pojawiają się w przypadku oznaczania zawartości wodoru, co jest nieuniknione ze względu na jego masę cząsteczkową i rozmiary cząsteczki (przenikliwość przez materiały zbiorników próbek). W związku z tym jest gazem trudnym do magazynowania i przechowywania. Ponadto wyniki uzyskane metodą chromatografii gazowej wskazują na wyższą zawartość procentową pozostałych składników gazowych tj. CO, CO_2 i CH_4, co ma związek z dużą dokładnością metody.

Analiza powstałego kondensatu

Technika chromatografii gazowej połączonej ze spektrometrią mas (ang. *GC-MS gas chromatography-mass spectrometry*), umożliwiła identyfikację jakościową i ilościową smół występujących w kondensacie. Smoły określane są jako mieszaniny związków chemicznych o masie cząsteczkowej większej od benzenu. Wyniki uzyskane przedstawiono w tabeli 5.

Wyniki chromatografii GC-MS wykazały obecność 9 związków organicznych (smół) w kondensacie. W pracy [20] smołę określono jako wszystkie organiczne zanieczyszczenia o masie cząsteczkowej większej niż benzen. Korzystając z klasyfikacji substancji smolistych, zawartej w przytoczonym wyżej artykule, można zauważyć, iż w otrzymanym kondensacie występują głównie lekkie węglowodory aromatyczne (WWA) dwu- i trzypierścieniowe tj. inden, naftalen, pochodne naftalenu (tj. 1-metylonaftalen i 2-metylonaftalen, acenaftalen), antracen. Związki te charakteryzują się tym, iż skraplają się w niskiej temperaturze nawet przy bardzo niskim stężeniu. Wyraźnie dominuje naftalen - około 40%, następnie antracen (~15%), a pozostałe substancje smoliste – stanowią zaledwie < 10%. Ponadto można zaobserwować obecność pirenu (~6%) i fluorantenu (~8%), czyli ciężkich węglowodorów aromatycznych (więcej niż trzy pierścienie). Składniki te kondensują w wysokich temperaturach przy niskich stężeniach.

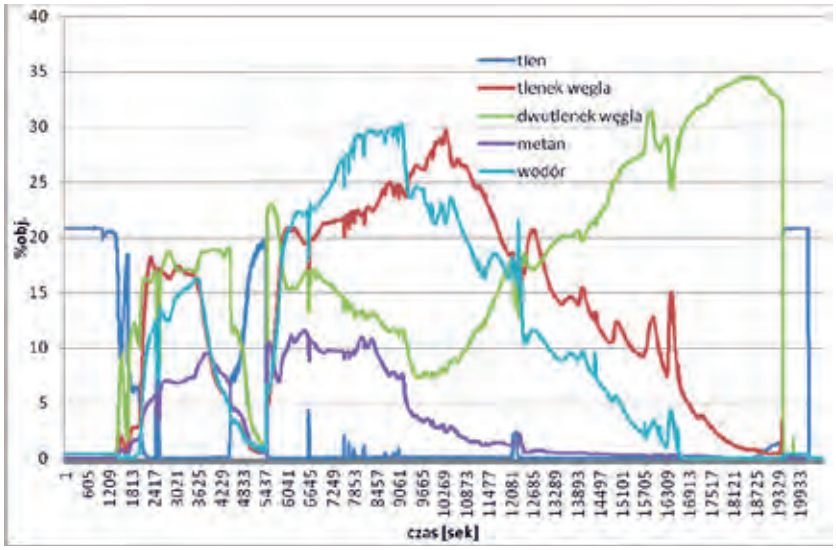
Zgazowanie węgla brunatnego powietrzem wzboga-



Rys. 2. Rozkład temperatur w reaktorze w trakcie procesu zgazowania
Fig. 2. Temperature distribution in the reactor during the gasification process

Tab. 3. Wyniki analizy gazów z procesu zgazowania w zależności od etapu procesu
Tab. 3. The results of gas analysis from the gasification process depending on the process stage

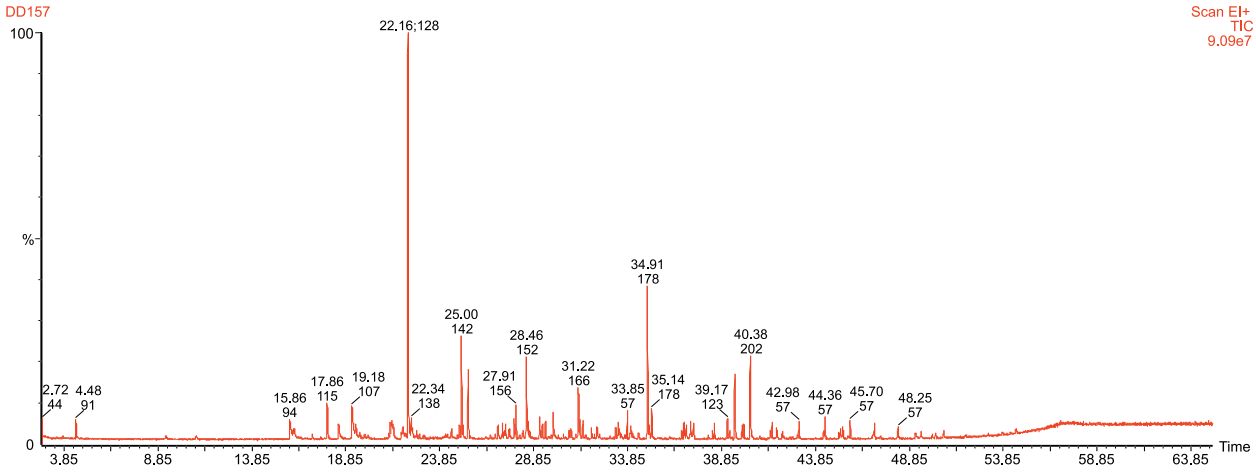
Etap	O_2 [Nm³]	CO [Nm³]	CO_2 [Nm³]	CH_4 [Nm³]	H_2 [Nm³]	Średnia wartość opałowa [MJ/Nm³]
Rozpalanie	0,8530	0,1297	0,2847	0,0499	0,0691	0,5411
Etap1	0,0858	2,8121	2,0499	1,0314	2,7734	6,2609
Etap2	0,0065	2,8032	3,5322	0,1374	1,7486	3,0583
Etap końcowy	0,0142	0,1632	2,6045	0,0055	0,0000	0,2293
Suma/średnia	0,9595	5,9082	8,4712	1,2241	4,5910	3,6905



Rys. 3. Skład procentowy uzyskanego gazu
Fig. 3. The percentage composition of the obtained gas

Tab. 4. Składy gazów mierzone analizatorami marki Siemens (kolor niebieski) i kontrolny pomiar chromatograficzny (kolor czarny)
Tab. 4. Gas compositions measured with Siemens analyzers (blue) and control chromatographic measurement (black)

Nr próbki	Czas	H_2 [% obj]		CO [% obj]		CO_2 [% obj]		CH_4 [% obj]	
1	10:21	11,25	15,07	18,04	18,78	16,04	16,04	5,24	4,94
2	10:35	15,12	15,15	17,13	18,70	17,02	18,20	6,91	6,98
3	11:21	19,03	15,93	20,08	23,86	16,59	17,12	9,21	10,19
4	11:44	25,36	19,22	21,46	25,71	15,37	15.75	9,70	10,69
5	12:02	29,49	20,23	22,62	28,09	13,04	14,38	10,23	10,67
6	13:33	22,35	9,75	28,71	15,30	8,14	20,96	2,85	0,045
7	15:01	0,00	0,396	0,409	0,066	33,15	33,41	0,00	0,008



Rys. 4. Chromatogram próbki kondensatu otrzymanego podczas zgazowania węgla brunatnego
Fig. 4. Chromatogram of the condensate sample obtained during brown coal gasification

Tab. 5. Wyniki analizy GC-MS kondensatu
Tab. 5. Condensate results of GC-MS analysis

Czas retencji	Powierzchnia	% pow.	Nazwa związku chemicznego	M.cz.	Wzór chem.	CAS
17.86	6109085	3.43	Inden	116	C9H8	95-13-6
19.18	6223514	3.50	P-kresol	108	C7H8O	106-44-5
22.16	71483496	40.15	Naftalen	128	C10H8	91-20-3
25.00	17217382	9.67	2-metylonaftalen	142	C11H10	91-57-6
25.37	11606474	6.52	1-metylonaftalen	142	C11H10	90-12-0
28.46	13916678	7.82	Acenaftalen	152	C12H8	208-96-8
34.91	26256618	14.75	Antracen	178	C14H10	120-12-7
39.56	10937778	6.14	Piren	202	C16H10	129-00-0
40.38	14274158	8.02	Fluoranten	202	C16H10	206-44-0

conym tlenem jest cennym procesem, w którym możliwy jest odzysk energii. Stanowi doskonałą alternatywę dla tradycyjnego spalania, Zastosowanie procesu zgazowania pozwala na odpowiednią konwersję substancji smolistych. Warto zwrócić uwagę, iż obecnie proces ten jest szeroko dyskutowany i badany, nie tylko w odniesieniu do surowców węglowych, ale także odpadów: komunalnych, osadów ściekowych czy elektronicznych.

Literatura

[1] Tajduś A., Czaja P., Kasztelewicz Z., *Stan obecny i strategia rozwoju branży węgla brunatnego w i połowie XXI wieku w Polsce.* Górnictwo i Geologia, 2010, 5(3), s. 137-167
[2] Wilczyński M., *Węgiel. Już po zmierzchu…*, Warszawa 2015; s. 1-97
[3] Kasztelewicz, Z., Tajduś, A., Słomka, T., *Węgiel brunatny to paliwo przyszłości czy przeszłości?* Napędy i Sterowanie 2017, 7/8, s. 88-104
[4] Pietraszewski A., *Polskie górnictwo węgla brunatnego w pierwszym półroczu 2017 roku.* Węgiel Brunatny 2017, 3(100), s. 60-70
[5] Czaja P., Kwaśniewski K., *Polski węgiel, energia i środowisko – szanse i zagrożenia.* Rocznik Ochrona Środowiska 2016, Volume 18, s. 38-60
[6] Iciek J., Ziemiński K., Zawadzka A., Kowalska M., *Alternatywne metody pozyskiwania energii z węgla brunatnego,* Górnictwo i Geoinżynieria 2009, 33(2), s. 151-157.
[7] Wen L., Cen J., Fang M., *Pyrolysis Characteristics of Lignite in a Fluidized Bed: Influence of Pyrolysis Temperature.* 2009 International Conference on Energy and Environment echnology, DOI: 10.1109/ICEET.2009.68, s. 257-261
[8] Song-ping G., Jian-tao Z., Zhi-qing W., Jian-fei W., Yi-tian F., Jie-jie H., *Effect of CO_2 on pyrolysis behaviors of lignite.* Journal of Fuel Chemistry and Technology 2013, 41(3), s. 257-264
[9] Qian L., Qiu Y., Sun N., Xu M., Xu G., Xin F., Chen Y., P*yrolysis route of a novel flame retardant constructed by phosphaphenanthrene and triazine-trione groups and its flame-retardant effect on epoxy resin.* Polymer Degradation and Stability 2014, 107,s. 98-105
[10] Singan A., Ranade V. V., *Deployment of underground coal gasification in India.* Current Science 2027, 113(2), s. 218-227
[11] Fuelling ther Fire, FoEI_Fuelling_the_Fire_July2016_FinalReport_ISBN
[12] Taubman J., *Węgiel i alternatywne źródła energii. Prognozy na przyszłość.* PWN Warszawa 2011
[13] https://www.fiw.arp.pl/?q=czyste-technologie-weglowe
[14] Kasztelewicz Z., Polak K., Zajączkowski M., *Metody wydobycia i przetwórstwa węgla brunatnego w I połowie XXI wieku, Porozumienie Producentów Węgla Brunatnego,* „Węgiel Brunatny", nr 4(65), Bogatynia 2008
[15] Karcz A., Ściążko M., *Energochemiczne przetwórstwo węgla do paliw ciekłych.* Wiadomości górnicze 2007, nr 2
[16] Świądrowski J., Rejman-Burzyńska A., Jędrysik E., *Węgiel brunatny jako surowiec do produkcji paliw płynnych.* Górnictwo i Geoinżynieria 2007, 31(2), s. 595-602
[17] Tokarska A., *Problematyka uzyskiwania frakcji paliwowych z węgla i odpadowych poliolefin.* Rocznik Ochrona Środowiska 2008, 10, s. 533-543
[18] Szczepaniak W., *Frakcjonowanie metali w procesach termicznego przetwarzaia biomasy i stałych odpadów komunalnych,* Wrocław 2005, s 185-181
[19] Bigda J., Burchart-Korol D., Porada S., *Mapa rozwiązań technologicznych procesów zgazowania węgla,* Przegląd Górniczy 2014, T. 70, nr 11, s. 86-96
[20] Devi L., Ptasinski K. J., Janssen F.J.J.G., V.B. van Paasen S., Bergman P. C. A., Kiel J.H.A. *Catalytic decomposition of biomass tars: use of dolomite and untreated olivine,* Renewable Energy 2005, 30, s. 565–587