

PROCESY ROZKŁADU WĘGLA BRUNATNEGO

BROWN COAL DECOMPOSITION PROCESSES

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

W artykule scharakteryzowano paliwo naturalne jakim jest węgiel brunatny, biorąc pod uwagę budowę i właściwości oraz ocenę przydatności użytkowej w procesach rozkładu tego materiału. Przeprowadzono proces zgazowania węgla brunatnego z kopalni „Sieniawa” w reaktorze ze złożem stałym. Przedstawiono konwersję materii organicznej węgla brunatnego do gazu syntezowego, o znacznej wartości opałowej. Uwzględniono wpływ czynnika zgazowującego, temperatury i ciśnienia na skład otrzymany gazów.

Słowa kluczowe: węgiel brunatny, procesy rozkładu, zgazowanie

The paper characterizes the natural fuel, which is brown coal, taking into account its structure and properties as well as the assessment of its usability in the processes of decomposition of this material. The process of gasification of lignite from the „Sieniawa” mine in a fixed bed reactor was carried out. The paper presents conversion of brown coal organic matter into synthesis gas of significant calorific value. The influence of the gasifying agent, temperature and pressure on the composition of the obtained gases was taken into account.

Keywords: lignite, decomposition process, gasification

Wstęp

Paliwa naturalne, nazywane także paliwami kopalnymi, to paliwa wydobywane z ziemi. Praźródłem paliw kopalnych była energia słoneczna, która wynikiem złożonych przemian z udziałem chlorofilu, została zmagazynowana w postaci energii chemicznej, skupionej w substancji organicznej paliw. W procesie spalania energia ta uwalnia się w postaci ciepła. Do naturalnych paliw stałych zalicza się palne skały pochodzenia roślinnego, występujące w przyrodzie w postaci złóż torfu, węgla brunatnych, węgla kamiennych i antracytów. Powstawanie złóż węglowych zależało od wielu czynników, z których najważniejsze to: rodzaj materiału roślinnego, czas, temperatura, ciśnienie, wilgotność oraz rodzaj mikroorganizmów. Umownie proces uwęglenia materiału roślinnego dzieli się na dwa etapy: biochemiczny i geochemiczny. Pierwszy z nich prowadził do rozkładu substancji roślinnej wywołany przez mikroorganizmy, głównie bakterie i grzyby. W procesie tym butwieniu i gniciu (w zależności od dostępu tlenu) ulegały w kolejności: węglowodany, celuloza, lignina, kora, żywice i woski, po czym następowało usunięcie składników lotnych

oraz wzbogacenie materii w pierwiastek C. Następnie zalanie torfowiska wodą oraz pokrycie warstwą osadów (najczęściej łupków), powodowało zatrzymanie procesów biochemicznych. Wzrastająca w złożu sedymentacja, ciśnienie i temperatura zapoczątkowały drugi etap tj. geochemiczny proces przekształcania się torfu w węgiel kamienny, poprzez stadium węgla brunatnego. Zatem rodzaj substancji roślinnej, z której powstał węgiel brunatny, a także warunki jego tworzenia się w znacznym stopniu wpływają na jego charakterystykę i właściwości [1].

W Polsce najczęściej spotyka się węgiel brunatny z młodszych okresów geologicznych, głównie paleogenu i neogenu. Na świecie występują również złoża węgla brunatnego wieku jurajskiego oraz karbońskiego, natomiast rzadko kredowego i triasowego [2].

Największe zasoby węgla brunatnych na świecie występują w Ameryce Północnej, Europie, Australii i Azji. Z kolei największym producentem węgla brunatnego są Niemcy, zaś kraje liczące się w produkcji węgla brunatnego to: USA, Australia, Chiny, Turcja, a w Europie: Rosja, Grecja, Polska i Czechy [1, 3-4]. Geologiczne zasoby bilansowe węgla

brunatnych w Polsce wynoszą 23 261,83 mln Mg, z czego większość (ok. 99 %) stanowią węgle energetyczne, natomiast pozostałe 0,65 mln Mg to węgle bitumiczne (złoże Kaławsk – szyb główny). W przeszłości były jeszcze węgle brykietowe i wytłewne. Obecnie całość zasobów wymienionych rodzajów węgla (brykietowe i wytłewne) uznawana jest za węgle energetyczne. W Polsce węgiel brunatny ze złóż zagospodarowanych jest eksploatowany w 4 kopalniach: Bełchatów, Turów, Konin i Sieniawa [2].

Węgiel brunatny to skomplikowana mieszanina właściwej organicznej substancji węglowej (palnej) i substancji mineralnych oraz wilgoci. Naturalne paliwo w postaci węgla brunatnego zawiera w różnych proporcjach, trzy główne składniki analityczne: substancję organiczną, wilgoć i substancję mineralną. Udziały wymienionych składników analitycznych w węglach brunatnych mieszczą się w granicach: wilgoć: 10-70% (średnio dla polskich węgla 50%), substancja mineralna: 1-25% (średnio dla polskich węgla 10%), substancja organiczna: 25-89% (średnio dla polskich węgla 40%). Substancja organiczna ma największą wartość użytkową, jako źródło energii i surowca do przeróbki chemicznej. Wilgoć i substancja mineralna lub produkt jej rozkładu w procesie spalania, czyli popiół, stanowią balast mało użyteczny do przemysłowego wykorzystania paliw stałych. Substancję organiczną węgla brunatnych tworzą następujące składniki grupowe: kwasy huminowe 13-85%, huminy 7-81%, bituminy 3-37% (80%), lignina 0-1% (70%), celuloza 0-1% (40%) oraz resztkowe substancje roślinne 2-8%, fuzyt 2-80%.

Warto podkreślić fakt, iż klasyfikacja węgla brunatnych nie jest tak usystematyzowana jak węgla kamiennych. Według zastosowań technologicznych, jak wyżej wspomniano, węgiel brunatny dzielimy na: energetyczny i dawniej brykietowy, wytłewny i ekstrakcyjny. Rozróżnia się także następujące odmiany węgla brunatnego: ksylicowe (włókniste, kruche, zżelifikowane), miękkie (ziemiste, łupkowate), twarde: matowe, błyszczące. Zróżnicowanie odmian petrograficznych węgla brunatnego związane jest bezpośrednio z zawartością w nich składników grupowych: węgle ziemiste zawierają do ok. 80% kwasów huminowych, węgle ksylicowe są bogate w celulozę i ligninę, a węgle twarde zawierają głównie huminy [1].

W procesach rozkładu węgla brunatnego konieczne jest wykonanie badań dotyczących: budowy,

właściwości oraz przydatności użytkowej. Wymienione elementy określane są za pomocą analizy paliw, którą można podzielić na poszczególne działy: analizę techniczną, analizę elementarną (pierwiastkową) oraz badania właściwości koksowniczych. Do zadań analizy technicznej należy oznaczenie parametrów takich jak: wilgoć, popiół, części lotne oraz ciepło spalania i wartość opałowa.

Wyniki tych oznaczeń pozwalają na uzyskanie podstawowych informacji o budowie i właściwościach użytkowych węgla. Na podstawie sumarycznej zawartości wilgoci i popiołu określa się ilość balastu w próbce paliwa stałego. Zawartość części lotnych jest miarą stopnia uwęglenia, od którego zależy wartość użytkowa substancji organicznej. Oznaczenie ciepła spalania i wartości opałowej, stanowi podstawę oceny jakości węgla jako surowca energetycznego - przeważająca część wydobywanych obecnie paliw stałych, jest przeznaczana bezpośrednio na cele energetyczne. Ciepło spalania paliw silnie zależy od ich rodzaju oraz zawartości wilgoci. Ciepło spalania czystego pierwiastka C wynosi 33,2 MJ/kg,

a dla węgla brunatnych 5,9 - 23,0 MJ/kg dla porównania, dla biomasy wynosi 8 - 17 MJ/kg. Węgle brunatne charakteryzują się dużą niejednorodnością, dlatego dla poprawności i dokładności wykonywanych analiz, podstawowe znaczenie ma właściwe pobranie, pomniejszenie (np. poprzez kwartowanie) oraz przygotowanie prób do dalszych analiz.

Naturalne paliwo stałe jakim jest węgiel brunatny charakteryzuje się rozwiniętym układem porowatym, dzięki czemu może sorbować mniejsze lub większe ilości wody. Zawartość wilgoci w węglu brunatnym wynosi 15-70%, dla porównania w biomacie wynosi 3-58%. Węgiel brunatny w zetknięciu z atmosferą o określonej wilgotności i temperaturze może zarówno tracić wilgotność własną jak i też pobrać część wody z atmosfery, w zależności od własnego stanu nasycenia wilgocią. W miarę upływu czasu, w określonych warunkach wilgotności i temperatury atmosfery, ustala się równowaga adsorpcyjno-desorpcyjna, czyli oddawania i pochłaniania wody - paliwo wówczas uzyskuje wilgoć higroskopijną odpowiadającą tzw. punktowi higroskopijnemu, wówczas węgiel jest w tzw. stanie powietrzno-suchym, charakteryzującym się niezmiennością masy próbki w czasie. W przypadku węgla brunatnego obserwuje się znaczne wahania wilgoci podczas zmiany wilgotności atmosfery, w związku z czym mówi się o zawartości wilgoci zbliżonej do stanu powietrzno suchego. W związku ze znacznym wpływem wilgotności względnej atmosfery, w analizie węgla brunatnego wyróżnia się wilgoć całkowitą tj. wilgoć zawartą w próbce dostarczonej do badań (w tzw. stanie roboczym) oraz wilgoć w próbce analitycznej, którą przeważnie oznacza się bezpośrednio przed użyciem próbki do innych badań analitycznych [1,5]. Oprócz oznaczenia wartości wilgotności, istotnym parametrem w procesach rozkładu materiału węglowego są części lotne. Ich ilość ma ogromne znaczenie w ocenie przydatności energetycznej paliwa. Węgiel brunatny należy do paliw o dużej zawartości części lotnych (45-65%) w porównaniu do węgla kamiennych (14-45%). W związku z czym podczas spalania daje długi płomień oraz wymaga dostarczenia dodatkowych ilości powietrza w celu pełnego bezdymnego spalania [1,3].

Proces spalania jest tradycyjnym podejściem do rozkładu węgla brunatnego. Celem procesu jest odzysk oraz wykorzystanie energii. W przypadku spalania paliwa węglowego do powietrza uwalniane są cząstki stałe (PM), dwutlenek siarki (SO₂), tlenki azotu (NO_x), metale ciężkie i inne zanieczyszczenia [6]. Takie zanieczyszczenia mogą być przenoszone na tysiące kilometrów ponad granicami krajów, a nawet oceanami [7]. Spalanie węgla na potrzeby produkcji energii elektrycznej stanowi również jedno z głównych przemysłowych źródeł emisji CO₂, co przyczynia się do zmiany klimatu.

Inną termiczną metodą rozkładu węgla jest piroliza, która zachodzi w układzie zamkniętym z dostarczeniem energii, bez udziału reagenta gazowego. W czasie pirolizy zachodzą procesy parowania substancji organicznych, tworzenia i uwalniania gazów, prowadzące do wytworzenia węgla pirolitycznego. Intensywne emisje z ogrzanego materiału (200-350°C), nie pozwalają na wnikanie do jego złoża gazów z otoczenia [8]. W przypadku, gdy do układu nie są doprowadzane czynniki utleniające zanika intensywny rozkład połączeń organicznych i proces zamiera (układ osiąga stan równowagi). Wówczas dostarczenie gazów reakcyjnych z zewnątrz pozwala na kontynuację rozpoczętego przekształcenia materiału w formy gazowe rozpoczyna się proces zgazowania. Gazami wprowadzonymi

do układu mogą być przede wszystkim: para wodna, gdy celem jest konwersja węgla do form gazowych, powietrze, bądź mieszanina powietrza z tlenem, gdy celem jest zgazowanie materiału z odzyskiem energii [8]. Etapy procesu zgazowania oraz możliwości wykorzystania produktów procesu rozkładu węgla brunatnego opisano w pracy „Zgazowanie węgla brunatnego w reaktorze ze złożem stałym” [9].

Część eksperymentalna

Próbkę węgla do badań pobrano z Kopalni Węgla Brunatnego „Sieniawa” Sp. z o. o. Złoże „Sieniawa” położone w okolicach Sieniawy na Ziemi Lubuskiej jest jednym z najdłuższych znanych i eksploatowanych złóż węgla brunatnego [10]. Następnie materiał węglowy pozostawiono w pomieszczeniu rozłożony na macie, w celu osiągnięcia stałej wilgotności. Ostatecznie wilgotność zmierzona za pomocą wagosuszarki MAX 50/1 firmy Radwag wynosiła 5 %.

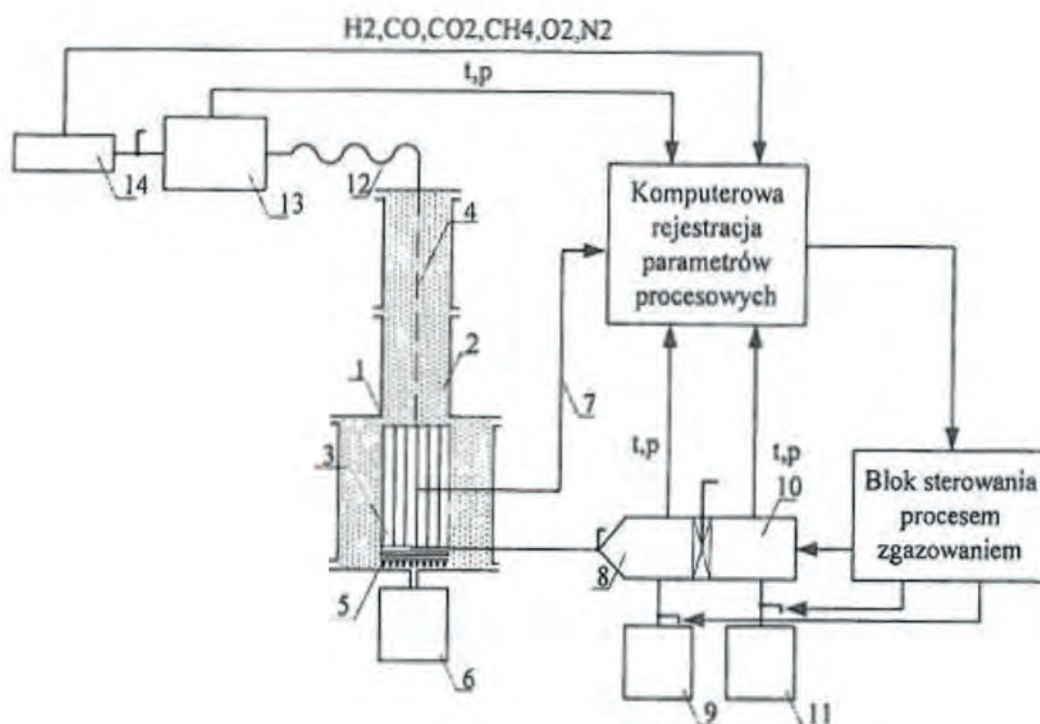
Stanowisko badawcze instalacji do zgazowania węgla brunatnego przedstawiono na rysunku 1. Głównym aparatem instalacji jest modułowy reaktor ze stali, do prowadzenia ciśnieniowego zgazowania o średnicy wewnętrznej (segment 1) - 428 mm, (segment 2) – 185 mm i całkowitej wysokości 1580 mm. Reaktor jest izolowany, od wewnątrz przed znacznymi stratami ciepła, elementami szamotowymi oraz w dolnej części (segment 1) dodatkowo wełną mineralną. W skład instalacji wchodzi 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 zapłonikiem pochodni, zawory. Próbkę powstających gazów analizowano i rejestrowano w sposób ciągły analizatorami składu gazów firmy Siemens.

Przebieg procesu

Rozdrobnioną do wielkości 5-8 cm próbkę węgla brunatnego o całkowitej masie 20 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, przesuwają się od dolnej do górnej części zgazowywanego węgla. Wnętrze reaktora ogrzewano przez okres 30 minut wprowadzając od dołu powietrze wzbogacone w tlen oraz azot (gaz obojętny), który nie uczestniczył w przebiegu reakcji. Ilości użytych czynników zgazowujących w procesie przedstawiono w tabeli 1.

W początkowej fazie procesu, gdy do reaktora dostarczana była energia w postaci ciepła, temperatura układu wzrastała, następowało usunięcie wilgoci przemijającej wsadu węglowego (suszenie). W miarę dostarczania energii do układu zachodził pierwszy etap zgazowania tj. piroliza, w czasie którego następowało wydzielenie części lotnych (CO , CH_4 , H_2 , CO_2 , produkty smoliste i oleje). Kolejno zachodziły reakcje



Rys. 1. Schemat układu eksperymentalnego zgazowania węgla brunatnego:

1. Reaktor; 2. Możliwość wypełnienia reaktora kształtkami ceramicznymi lub utworami geologicznymi (nadkład); 3. Wsad, złożo 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 węzownicza; 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

składników lotnych w fazie gazowej. Zaobserwowano powstanie mieszaniny gazów, gdzie dominującym składnikiem był wodór i w kolejności dwutlenek węgla, tlenek węgla oraz niewielkie ilości metanu (gazy wyrażono w % objętościowych). W związku z dostarczaniem do układu azotu, w końcowym etapie procesu staje się składnikiem dominującym, nie uwzględnionym na wykresach, jego obecność przyczynia się do obniżenia wartości opałowej gazu.

Zapoczątkowanie wydzielania gazów w procesie rozpoczęło pomiar kluczowych parametrów. Część gazów, wytworzonych podczas procesu, przepuszczono przez układ kondensacyjny, który wykraplał wysokowrzące składniki, a następnie kolumnę hybrydową oczyszczania i kondycjonowania gazu, gdzie następowało dalsze usuwanie zanieczyszczeń, by możliwe było przedostanie się czystego gazu do analizatorów.

Parametry procesu

Procesowi zgazowania w laboratoryjnej instalacji poddano próbkę o masie 20,0 kg. Proces zgazowania prowadzono w przedziale temperatur 300-430 °C przez 300 minut pod ciśnieniem 5 atm. Kontrolowano parametry procesu takie jak: temperatura w komorze spalania/zgazowania i temperatura spalin/powstałych gazów. Pomiary wykonano za pomocą termopar odpowiednio rozmieszczonych w dolnej części komory i w drugim przypadku termopary wyposażono w przetworniki prądowe. Kolejnym parametrem mierzonym było ciśnienie, w tym celu zastosowano manometr przemysłowy i przetwornik ciśnienia. Poza tym regulowano zaworami kulowymi z napędem pneumatycznym dozowanie czynników zgazowujących (powietrze, tlen), a pomiaru dokonano za pomocą przepływomierzy pływakowych. Natomiast skład gazów otrzymanych w poszczególnych etapach procesu, mierzono za pomocą analizatorów Colomat 6, Ultramat 23 i Oxymat 61 firmy Siemens).

Wyniki i dyskusja

W tabeli 2 przedstawiono wyniki rejestracji ilości i składu mieszaniny gazowej z poszczególnych etapów procesu

zgaszowania. Skład procentowy gazu z procesu przedstawiono na rysunku 2.

W początkowym etapie procesu (rozpalanie) następował ubytek masy materiału podczas suszenia, etap ten ma istotne znaczenie, gdyż suszenie materiału pozwala na podwyższenie jego wartości energetycznej. Po wysuszeniu materiału następował proces pirolizy, który określane jest jako pierwszy etap zgazowania. W procesie tym, pod wpływem temperatury następuje intensywny wyrzut substancji organicznych z materiału węglowego uniemożliwiając wnikanie czynnika utleniającego. W tym czasie powstający CO₂, jest wykorzystywany w reakcji Boudouarda (2 CO ⇌ CO₂ + C) do tworzenia CO. Równowaga zachodzącej reakcji przesunięta jest w lewo, dzięki temu zwiększa się znacznie ilość CO (2,98 % obj.). Gdy ustają intensywne produkcje związków lotnych, po procesie pirolizy pozostaje karbonizat. W ten sposób wytworzona faza stała (karbonizat) uczestniczy w heterogenicznych reakcjach ze składnikami fazy gazowej tj. czynnikami zgazowującymi. Poza tym podwyższone ciśnienie do 1,5 bara zapewnia wyższy stopień konwersji karbonizatu z akceptowalnym – z punktu wymagań technologicznych – czasie reakcji [11]. Wprowadzenie tlenu do układu powietrza (21% obj. O₂ i 79% obj. N₂) przyczynia się zatem do konwersji węgla pirolitycznego i przebiegu intensywnych procesów zgazowania (zgaszowanie etap 2). Czynniki zgazowujący, w postaci powietrza wzbogaconego tlenem ma możliwość penetracji pozostałości pirolitycznej. Obserwuje się wówczas powstawanie mieszaniny gazów, gdzie dominującym składnikiem jest wodór (2,42 %) i kolejno dwutlenek węgla (2,44 % obj.), tlenek węgla (2,11 % obj.) i znikome ilości metanu (0,37 % obj.) (tab. 2). Ubytek węgla zmienia proporcje udziału wodoru i metanu. Ich udział w końcowej fazie wynosi 1,02 i 0,06 % obj. Dominującym składnikiem staje się azot (nie uwzględniony na wykresach), gdyż jest gazem inertnym. Jego obecność przyczynia się do obniżenia wartości opałowej gazu.

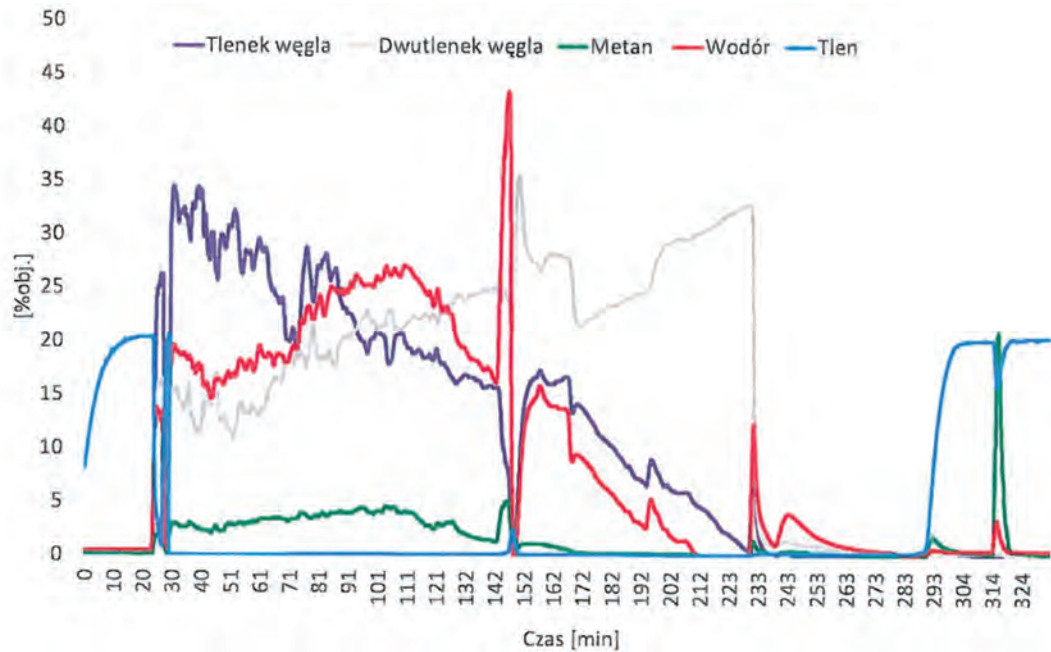
W ten sposób surowy gaz, powstający w procesie zgazowania, może być poddany obróbce polegającej na ochłodzeniu, wstępnemu oczyszczaniu oraz usunięciu zanieczyszczeń do

Tab. 1. Zestawienie ilości gazów podanych do procesu
Tab. 1. Summary of the amounts of gases fed to the process

Media podane w ramach etapów	Powietrze [Nm ³]	O ₂ [Nm ³]	N ₂ [Nm ³]
Rozpalanie	1,54	0,65	1,22
Zgazowanie etap 1	8,21	3,19	6,49
Zgazowanie etap 2	8,23	3,55	6,50
Etap końcowy	15,03	5,51	11,87
Suma	33,01	12,90	26,08

Tab. 2. Wyniki analizy gazów z poszczególnych etapów procesu zgazowania
Tab. 2. The results of the analysis of gases obtained in the various stages of the gasification process

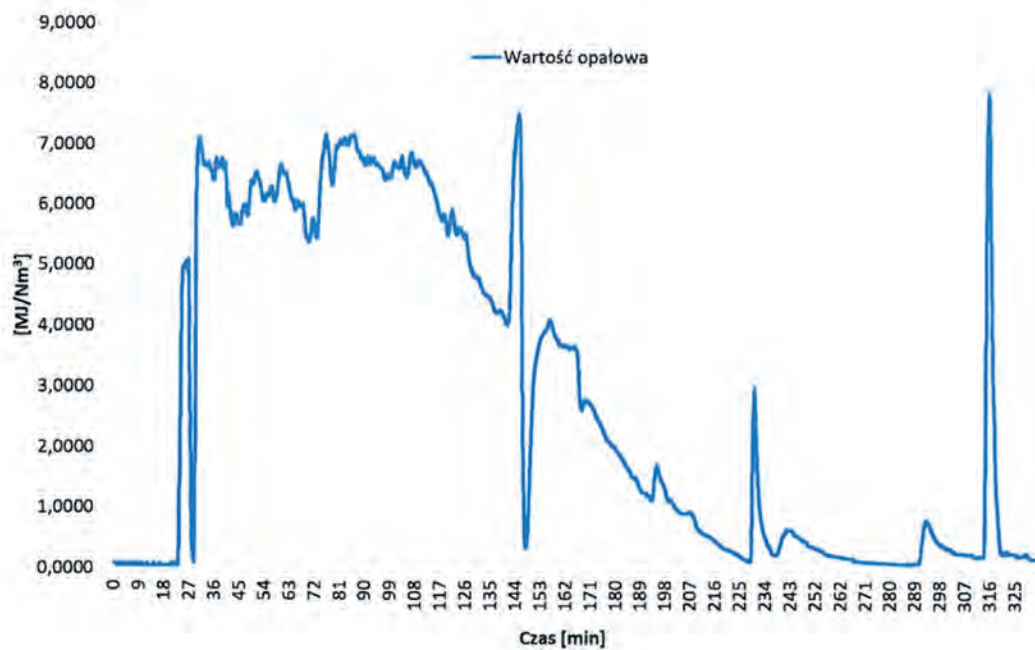
Gazy uzyskane w procesie zgazowania	O ₂ [Nm ³]	CO [Nm ³]	CO ₂ [Nm ³]	CH ₄ [Nm ³]	H ₂ [Nm ³]
Rozpalanie	0,31	0,16	0,10	0,01	0,09
Zgazowanie etap 1	0,00	2,98	1,55	0,31	1,90
Zgazowanie etap 2	0,02	2,11	2,44	0,37	2,62
Etap końcowy	0,02	1,71	5,21	0,06	1,02
Suma	0,35	6,96	9,30	0,75	5,63



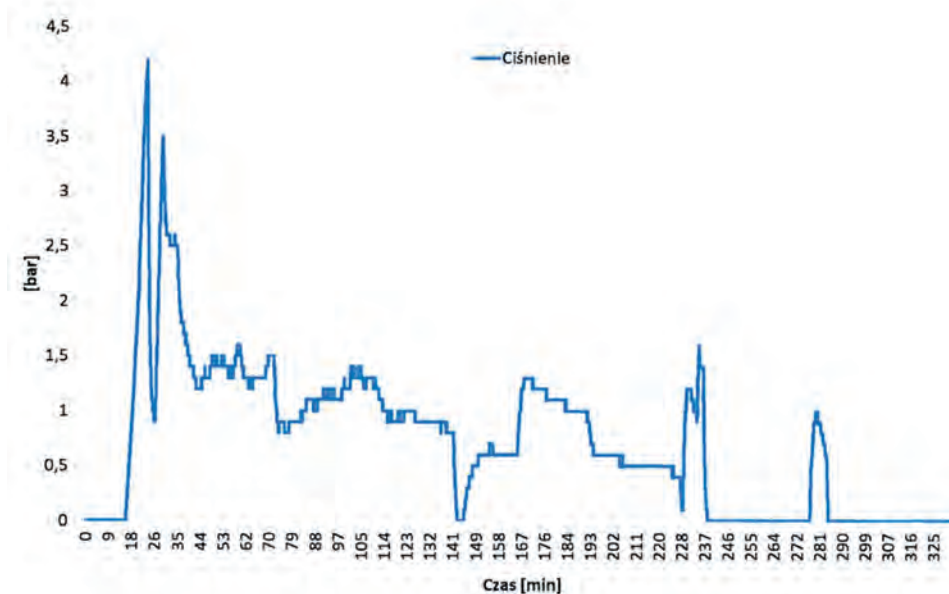
Rys. 2. Skład procentowy otrzymanego gazu
Fig. 2. The percentage composition of the obtained gas

Tab. 3. Średnie i maksymalne wartości opałowe dla poszczególnych etapów
Tab. 3. Average and maximum calorific values for the individual stages

Media podane w ramach etapów	Średnia wartość z etapu	Maksymalna wartość z etapu	Czas procesu [min]
Rozpalanie	1,43	6,16	30
Zgazowanie etap 1	6,23	7,16	76
Zgazowanie etap 2	5,92	7,49	146
Etap końcowy	1,74	4,09	156
Suma	3,83	-	-



Rys. 3. Wartości opałowe gazów wytwarzanych w trakcie procesu
Fig. 3. The calorific values of the gases produced during the process



Rys. 4. Zmiany ciśnienia podczas procesu zgazowania
 Fig. 4. Pressure changes during the gasification process

poziomów wymaganych technologią docelową [12] prowadząc do uzyskania gazu syntezowego tzw. syngazu. Biorąc pod uwagę wartości opałowe otrzymanego gazu (tab. 2 i rys. 3) z drugiego etapu zgazowania można stwierdzić, iż jest to gaz niskokaloryczny tzw. powietrzny, ze względu na czynnik zgazowujący. Zgazowanie węgla jest doskonałym procesem rozkładu węgla brunatnego, alternatywą dla tradycyjnego spalania. Przyczynia się do zmniejszenia zawartości dwutlenku węgla wydzielanego do atmosfery. Poza tym otrzymuje się w procesie wartościowy karbonizat, który może być stosowany jako nawóz do celów rolniczych (badania takie prowadzone są obecnie w „Poltegor-Instytut”). Ponadto otrzymany w procesie syngaz jest wartościowym produktem, który może znaleźć różnorakie

zastosowanie, takie jak: wydajne wytwarzanie ciepła i energii, produkcja wodoru, produkcja syntetycznego gazu naturalnego (SNG), produkcja chemikaliów – metanolu lub eteru dimetylowego (DME) oraz produkcja biopaliwa transportowego (BtL) w wyniku syntezy Fischera-Tropscha (F-T) [13].

W kolejnych eksperymentach zgazowania węgla brunatnego istotne byłoby przeprowadzenie procesów z różnymi czynnikami zgazowującymi, by móc otrzymać mieszaniny gazowe o wyższej wartości opałowej tj. gaz średniokaloryczny czyli tzw. wodny (proces z udziałem pary wodnej) lub wodno-tlenowy ciśnieniowy (para wodna z tlenem) lub wysokokaloryczny - wodorowy z udziałem wodoru jako czynnika zgazowującego.

Literatura

- [1] Kaczmarczyk J., Technologia Chemiczna. Surowce i nośniki energii. Laboratorium http://www.polymercarbon.ch.pwr.edu.pl/instrukcje/SNE_techniczna.pdf?fbclid=IwAR1Fd0aT_5JgadB-GZ7tGq0wHBI-HPLOaRvbTA1_0Z9aDgA7FpVuEQBp3rSU
- [2] http://geoportal.pgi.gov.pl/surowce/energetyczne/wegiel_brunatny
- [3] 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;
- [4] Wilczyński M., *Węgiel. Już po zmierzchu...*, Warszawa 2015; s. 1-97
- [5] Roga B., Tomków K., *Chemiczna technologia węgla*, Warszawa, WNT, 1971
- [6] HEAL, *The Unpaid Health Bill*, 2013 https://www.env-health.org/IMG/pdf/heal_report_the_unpaid_health_bill_how_coal_power_plants_make_us_sick_final.pdf
- [7] <https://www.teraz-srodowisko.pl/media/pdf/aktualnosci/8389-HEAL-wegiel-brunatny.pdf>
- [8] Szczepaniak W., *Fracjonowanie metali w procesach termicznego przetwarzania biomasy i stałych odpadów komunalnych*, Wrocław 2005, s 185-181
- [9] Zielińska A., Grabas K., Zgazowanie węgla brunatnego w reaktorze ze złożem stałym, *Górnictwo Odkrywkowe* 2020, 3, s. 39-44
- [10] <http://www.sieniawa.com/>
- [11] Irfan M.F., Usman M.R., Kusakabe K., 2011 – Coal gasification in CO₂ atmosphere and its kinetics since 1948: A brief review. *Energy*, 36, s. 12-40.
- [12] Bigda J., Burchart-Korol D., Porada S., *Mapa rozwiązań technologicznych procesów zgazowania węgla*, Przegląd Górniczy 2014, T. 70, nr 11, s. 86-96
- [13] Ścieżko M., Zieliński H. (red.), *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*, Wyd. IChPW i IGSMiE PAN, Zabrze-Kraków 2003