

Jerzy Dudek, Piotr Klimek
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Energetyczne wykorzystanie gazu składowiskowego na przykładzie instalacji SEC-OUC/Orange County – Floryda, USA

Wprowadzenie

Na świecie stosuje się wiele technologii dotyczących wykorzystania gazu składowiskowego. Wybór technologii dla energetycznego wykorzystania gazu składowiskowego warunkowany jest m.in. rodzajem energii, na którą w danym rejonie występuje zapotrzebowanie.

W Polsce najczęściej wykorzystuje się technologię polegającą na wykorzystaniu gazu składowiskowego do wytwarzania energii elektrycznej – znaczący wpływ na istniejącą sytuację ma system finansowania odnawialnych źródeł energii, który przez kilka lat w znacznym stopniu faworyzował jej wytwarzanie. Wytwarzanie energii elektrycznej preferowane jest również ze względu na powszechną dostępność silników tłokowych, które znajdują zastosowanie w instalacjach energetycznego wykorzystania gazu składowiskowego. Coraz częściej silniki te wykorzystywane są również do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej, ponieważ instalacje wykorzystujące gaz składowiskowy w układach kogeneracyjnych charakteryzują się wysoką sprawnością energetyczną.

Istnieją również inne technologie wykorzystania energii zawartej w gazie składowiskowym. Jedną z nich jest produkcja gorącej wody lub pary, która uwarunkowana jest jednak w dużym stopniu zapotrzebowaniem na gorącą wodę lub parę przez odbiorców w bliskim sąsiedztwie składowiska. Przesyłanie gazu czy niedużych ilości pary lub gorącej wody na znaczne odległości czyni to przedsięwzięcie znacznie bardziej skomplikowanym technicznie i niejednokrotnie ekonomicznie nieuzasadnionym. Dlatego przy podjęciu decyzji o zastosowaniu efektywnej technologii do wykorzystania gazu ze składowiska należy uwzględnić lokalne uwarunkowania ekonomiczno-gospodarcze, w tym ceny energii elektrycznej lub gazu ziemnego, oraz możliwości wsparcia energetyki odnawialnej. W przypadku dużych składowisk, które charakteryzują się znaczną produktywnością gazową, bezpośrednie wykorzystanie gazu składowiskowego znajduje uzasadnienie, czego bardzo dobrym przykładem jest instalacja na składowisku w Orange County – Floryda, USA.

Charakterystyka składowiska Orange County

Składowisko Orange County Landfill, które jest własnością hrabstwa Orange, usytuowanego na południowy wschód od miasta Orlando w stanie Floryda, zostało utworzone w roku 1974. Instalacja bezpośredniego energetycznego wykorzystania gazu składowiskowego zbudowana została przy założeniu, że gaz odbierany będzie z najnowszej części składowiska, złożonego z 4 kwater (kwatery od 9–12) o całkowitej powierzchni 113 ha, oddanej do

użytkowania w 2003 roku. Obecnie deponowanie odpadów prowadzone jest w kwaterach 9 i 10 (fotografia 1), które w niedługim czasie poddane będą rekultywacji, a eksploatacja prowadzona będzie na kolejnych dwóch kwaterach: 11 i 12 (fotografia 2). Produktywność gazową kwater 9 i 10 oszacowano na 4250 m³/h, przy założeniu stężenia metanu w odbieranym gazie składowiskowym na poziomie 50÷55% [3]. Zakłada się również, że po zapelnieniu



Fot. 1. Widok na kwatery 9 i 10 składowiska Orange County Landfill

odpadami kwatery 11 i 12 produktywność gazowa całej nowej części składowiska (kwatery 9–12) wzrośnie do ponad 13600 m³/h [3]. Gaz składowiskowy odbierany jest obecnie za pośrednictwem studni odgazowujących, pokrywających cały obszar kwatery 9 i 10. Składowisko wyposażone jest również w instalację do odbioru odcieków oraz kondensatu powstającego podczas przyjęcia gazu ze składowiska. Odcieki zbierane są wstępnie w zbiornikach naziemnych, a następnie odprowadzane do oczyszczalni ścieków, oddalonej około 10 km od składowiska.



Fot. 2. Widok na kwatery 11 i 12 składowiska Orange County Landfill

Metody bezpośredniego energetycznego wykorzystania gazu składowiskowego

Gaz składowiskowy do produkcji energii cieplnej może być wykorzystywany bezpośrednio w różnych urządzeniach, m.in.: kotłach, suszarniach, piecach itp. W Stanach Zjednoczonych gaz składowiskowy wykorzystywany jest w branżach: motoryzacyjnej, chemicznej, budowlanej (do produkcji cementu i cegieł), farmaceutycznej, elektroniki użytkowej, papierniczej, przetwórstwa żywności, hutniczej, a także w technologiach związanych z oczyszczaniem ścieków, odparowaniem odcieków na składowiskach oraz do ogrzewania pomieszczeń szpitali i więzień [2]. W około 30% funkcjonujących w USA instalacjach gaz składowiskowy wykorzystywany jest w sposób bezpośredni. Innowacyjnymi sposobami bezpośredniego wykorzystania gazu są: opalenie pieców ceramicznych, hutniczych (do wytopu szkła), zasilanie i ogrzewanie szklarni, a także podgrzewanie wody na potrzeby upraw hydroponicznych.

Według danych literaturowych, bezpośrednie wykorzystanie gazu składowiskowego jest ekonomicznie uzasadnione, gdy zakład, który ma możliwość jego wykorzystania do zasilania urządzeń spalinowych lub grzewczych, znajduje

się w odległości do 8 km od składowiska. W niektórych przypadkach bezpośrednie wykorzystanie gazu składowiskowego może być również opłacalne w obiektach położonych w odległości 16 km i więcej od składowiska. Z uwagi na możliwość wykorzystania gazu składowiskowego, który jest paliwem tańszym niż gaz ziemny, niektóre zakłady produkcyjne w USA celowo umieszczono na terenach w pobliżu składowisk [1].

Liczba technologii umożliwiających bezpośrednie wykorzystanie gazu składowiskowego stale rośnie. Przykładowe rodzaje zastosowań to:

- zasilanie kotłów – najczęściej stosowany sposób bezpośredniego wykorzystania gazu składowiskowego; kotły można łatwo zmodyfikować, aby spalały wyłącznie gaz składowiskowy lub zmieszany z paliwami kopalnymi,
- wytwarzanie energii cieplnej, w tym m.in. w piecach (np. do wypalania cementu, ceramiki i cegieł), suszarniach osadu, promiennikach podczerwieni, komorach spalania pieców wykorzystywanych w lakierniach, piecach tunelowych, grzejnikach technologicznych, a także ogniskach kowalskich,

- odparowanie odcieków, przy wykorzystaniu technologii bezpośredniej lub pośredniej wymiany ciepła; odparowywanie odcieków może obniżyć koszt ich oczyszczania [1].

Najczęściej gaz produkowany w składowisku wykorzystywany jest jako paliwo zamienne lub uzupełniające w nowych lub dotychczas stosowanych urządzeniach grzewczych (fotografie 3 i 4). Należy zwrócić uwagę, że wiele zastosowań gazu składowiskowego wymaga przeprowadzenia modyfikacji dotychczas stosowanych urządzeń grzewczych oraz oczyszczenia gazu i usunięcia kondensatu.

Zapotrzebowanie odbiorcy na energię „z gazu” jest istotnym czynnikiem, który należy uwzględnić, oceniając możliwość bezpośredniego wykorzystania gazu składowiskowego. Magazynowanie gazu składowiskowego



Fot. 3. Kocioł opalany gazem składowiskowym [2]



Fot. 4. Piec do wypalania cementu [5]

jest nieopłacalne, dlatego gaz dostarczony do instalacji powinien być w całości wykorzystany. Zapotrzebowanie potencjalnego odbiorcy gazu powinno utrzymywać się na

stałym poziomie i odpowiadać ilości gazu odzyskiwanego ze składowiska. Jeżeli ilość wytwarzanego przez składowisko gazu nie zaspokaja całkowitego zapotrzebowania na energię danego odbiorcy, wówczas jego niedobory należy uzupełnić innymi paliwami. Instalacje do zasilania gazem składowiskowym palników kotłów lub innych urządzeń przemysłowych muszą być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby były przystosowane do spalania zarówno gazu składowiskowego, jak i innych paliw [5].

Gaz składowiskowy zaliczany jest do grupy gazów o średniej wartości opałowej. Wartość opałowa gazu przeznaczonego do energetycznego wykorzystania jest niższa od wartości opałowej gazu ziemnego; zależy ona od zawartości procentowej metanu i najczęściej mieści się w granicach 13,0÷18,3 MJ/Nm³. Dlatego rurociągi oraz palniki muszą być przystosowane do przesyłu i spalania dwukrotnie większej ilości gazu składowiskowego niż miałyby to miejsce w przypadku gazu ziemnego. W większości instalacji konieczna jest modyfikacja rurociągów oraz palnika w celu ich przystosowania do wyższego natężenia przepływu. Zwiększony przepływ gazu nie ma jednak istotnego wpływu na konstrukcję i funkcjonowanie elementów kotła znajdujących się za palnikiem [4].

Koncepcja dotycząca wykorzystania gazu ze składowiska musi uwzględniać najlepsze rozwiązania pod względem technicznym i ekonomicznym. W przypadku projektowania nowych instalacji do odgazowania składowiska i energetycznego wykorzystania gazu stosuje się sprawdzone i dostępne na rynku palniki do spalania gazu składowiskowego. W przypadku modyfikacji istniejących instalacji wykorzystuje się istniejące palniki, dostosowując je do spalania gazu składowiskowego (np. poprzez instalację dodatkowych dysz i odrębnego doprowadzenia gazu). Urządzenia regulujące przepływ paliwa do palnika oraz ilość powietrza wspomagającego spalanie są dostosowane do zmiennej entalpii gazu składowiskowego. Układ sterujący palnikiem musi zapewnić jego działanie w sposób ciągły lub okresowy oraz umożliwić spalanie wyłącznie gazu składowiskowego i/lub mieszaniny z innymi paliwami, takimi jak: gaz ziemny, olej czy pył węglowy. Instalacja wyposażona jest w aparaturę kontrolno-pomiarową, w skład której wchodzi analizatory do ciągłego monitorowania składu gazu oraz czujniki do wykrywania płomienia [4].

Ostateczną decyzję o wyborze technologii energetycznego wykorzystania podejmuje zarządzający składowiskiem po wykonaniu analizy techniczno-ekonomicznej planowanej inwestycji.

W przypadku kotłów opalanych gazem składowiskowym może występować zjawisko odkładania się krze-

mionki (ditienu krzemu, SiO_2) pochodzącej ze spalania siloksanów. Miejsce odkładania się krzemionki i jej ilość uzależnione są od prędkości przepływu gazu w kotle, a także zawartości siloksanów w gazie składowiskowym. Jak wynika z doświadczeń operatorów, coroczne czyszczenie instalacji pozwala podczas eksploatacji uniknąć problemów spowodowanych osadzaniem się krzemionki. Obniżenie zawartości siloksanów w gazie składowiskowym, zasilającym kocioł, następuje w wyniku zainstalowania systemu uzdatniania gazu.

Gaz składowiskowy zawiera znaczne ilości pary wodnej oraz związki chemiczne powodujące korozję elementów instalacji, dlatego do jego transportu i spalania należy stosować materiały niepodlegające korozji, np.: rurociągi z PEHD, elementy armatury i palniki ze stali nierdzewnej lub kwasoodpornej.

Podczas opracowywania projektów wykorzystania gazu składowiskowego w kotłach oraz do oceny opłacalności takich projektów trzeba wziąć pod uwagę szereg czynników. Należy przeanalizować ilość dostępnego gazu składowiskowego w porównaniu z zapotrzebowaniem danego obiektu na ciepło oraz wydajnością kotła. Ze względu na dużą wilgotność względną gazu składowiskowego, przed wprowadzeniem go do rurociągu i dostarczeniem do kotła należy gaz uzdatnić, aby uniknąć wytrącania się kondensatu, a w konsekwencji powstawania korozji. Ponadto, niezbędne jest zastosowanie odwadniaczy i wychwytywanie w nich kondensatu na całej długości rurociągu, gdyż jego obecność może powodować utrudniające przepływ zatory. Co ważne:

kocioł może być zasilany gazem składowiskowym oczyszczonym w niewielkim stopniu, wymagane jest jedynie usunięcie dużych cząstek stałych i pary wodnej. Inne związki zawarte w gazie składowiskowym, takie jak siloksany, nie powodują uszkodzenia kotłów ani nie wpływają niekorzystnie na ich pracę. Stopień sprężenia gazu na składowisku musi być wystarczający, aby zrównoważyć straty ciśnienia w rurociągu i zapewnić odpowiednie ciśnienie w kotle, co umożliwi prawidłową pracę palnika i urządzeń do regulacji przepływu paliwa. Koszty sprężania gazu składowiskowego można obniżyć poprzez wybór odpowiedniego palnika bądź modyfikację palnika w celu jego przystosowania do pracy przy niskim ciśnieniu gazu [5].

Praktycznie każdy kocioł dostępny na rynku (bądź kocioł przemysłowy) można przystosować do spalania gazu składowiskowego lub gazu składowiskowego w połączeniu z gazem ziemnym lub olejem opałowym. Bez względu na rodzaj kotła, kluczowym czynnikiem jest profil spalania, ponieważ oszczędności uzyskane w związku z wykorzystaniem gazu składowiskowego jako paliwa muszą uzasadniać poniesienie kosztu wykonania instalacji do odzysku gazu (jeżeli w danej lokalizacji nie ma gotowej instalacji), zakupu urządzeń do jego uzdatniania oraz wykonania rurociągu. Czynnikiem warunkującym opłacalność instalacji jest jej praca przy znacznym obciążeniu, w cyklu 24-godzinny, bądź praca w trybie zbliżonym do trybu ciągłego. Wysokość kosztów związanych z modyfikacją kotła jest uzależniona od jego typu, rodzaju stosowanego paliwa i stanu technicznego urządzenia.

Charakterystyka instalacji bezpośredniego wykorzystania gazu składowiskowego przez SEC-OUC/Orange County

Gaz ze składowiska Orange County Landfill przesyłany jest rurociągami do stacji gazowej wyposażonej w sprężarki i dmuchawy oraz aparaturę kontrolno-pomiarową. Operatorem instalacji jest Zakład Komunalny Miasta Orlando (OUC), który odpowiedzialny jest za wytwarzanie, przesył i dystrybucję energii elektrycznej, wody oraz wody chłodniczej dla odbiorców z hrabstw Orange oraz Osceola. Dostawy energii elektrycznej zapewniane są przez OUC, dzięki Curtis H. Stanton Energy Center (SEC) – zlokalizowanym w hrabstwie Orange. W skład SEC wchodzi dwa bloki energetyczne o mocy 450 MW, opalane węglem, oraz jeden blok gazowo-parowy o mocy 300 MW. Gaz odebrany ze składowiska kierowany jest do stacji uzdatniania, a następnie tłoczony do SEC i wykorzystywany jako paliwo w blokach energetycznych (rysunek 1).

Stacja odbioru gazu ze składowiska oraz jego uzdatniania przedstawiona jest schematycznie na rysunku 2 i składa się z:

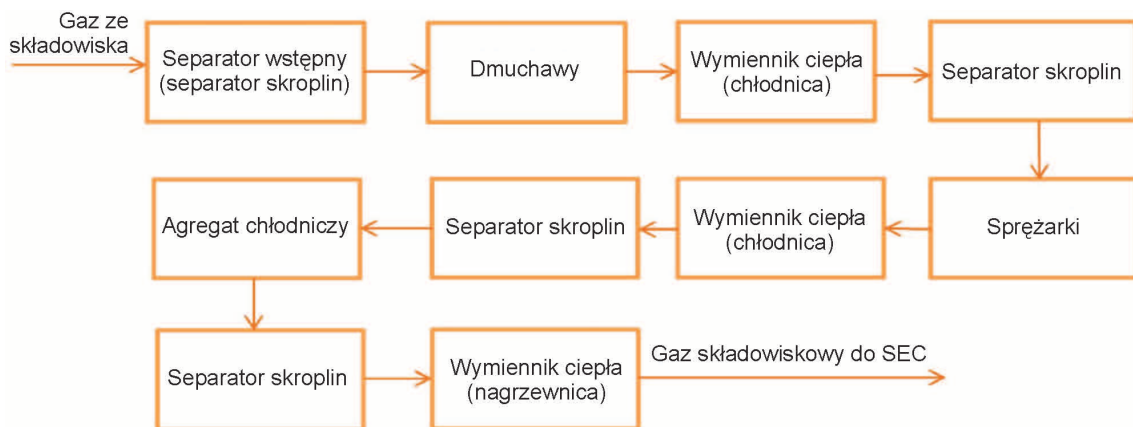
- dwóch dmuchaw o wydajności $6800 \text{ m}^3/\text{h}$ każda,
- pochodni do spalania gazu,
- systemu usuwania kondensatu oraz pary wodnej z gazu (wymyennik ciepła oraz separatory),
- dwóch kompresorów śrubowych o wydajności $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ każdy,
- agregatu chłodniczego umożliwiającego obniżenie temperatury do 4°C .

Gaz odbierany ze składowiska przepływa najpierw przez pierwszy separator wilgoci oraz filtr cząstek stałych (tj. separator wstępny). Następnie tłoczony jest przez dwie dmuchawy (fotografia 5), które stanowią jednocześnie pierwszy stopień sprężania. W kolejnym etapie uzdatniania, w celu obniżenia temperatury, gaz przepływa do pierwszego wymiennika ciepła (chłodnica wentylatorowa – fotografia 6), za którym umieszczony jest drugi separator wilgoci. Następnie gaz kierowany jest do dwóch sprężarek

podnoszących ciśnienie do wartości 3 bar, zapewniającej transport gazu do SEC. Po sprężeniu, w celu obniżenia temperatury, gaz kierowany jest do drugiego wymiennika ciepła, za którym znajduje się trzeci separator wilgoci. W celu usunięcia wilgoci do poziomu uniemożliwiającego kondensację pary wodnej w rurociągu tłocznym, gaz kierowany jest do agregatu chłodniczego obniżającego jego temperaturę do 4°C. Wykroplony kondensat odbierany jest w separatorze skroplin. Ostatnim etapem jest ogrzanie gazu do temperatury 18°C i skierowanie go do ru-



Rys. 1. Lokalizacja składowiska Orange County Landfill oraz stacji uzdatniania gazu wraz z rurociągiem doprowadzającym gaz do SEC [źródło: <http://maps.google.pl>]



Rys. 2. Schemat blokowy stacji uzdatniania gazu

rociągu tłocznego. Przed zatłoczeniem gazu do rurociągu mierzony jest przepływ i analizowany skład gazu (stężenie metanu, ditlenku węgla oraz tlenu).

Rurociąg tłoczny, doprowadzający gaz do elektrociepłowni SEC, ma długość ponad 8 km. Wykonany jest on z PEHD o średnicy 18 cali (45,72 cm). Jego średnica obliczona została na maksymalny przepływ 20390 m³/h. Rurociąg poprowadzono przez teren należący do Orange County w sposób umożliwiający ominięcie terenów podmokłych oraz niepowodujący kolizji przestrzennych. Mimo iż transportowany gaz pozbawiony jest znacznej ilości pary wodnej, ze względów bezpieczeństwa w najniższych punktach rurociągu zamontowano odwadniacze umożliwiające usunięcie powstającego kondensatu.



Fot. 5. Dmuchawy odbierające gaz ze składowiska oraz separator wstępny

Rurociąg został ułożony w wykopie o głębokości 1,2 m, niemniej jednak, ze względu na konieczność prowadzenia

rurociągu pod drogami oraz kanałami, w niektórych miejscach został on ułożony głębiej. Wzdłuż rurociągu tłocznego poprowadzono dodatkowy rurociąg z PCV o średnicy 3 cali (7,6 cm), w którym umieszczono światłowód łączący SEC ze stacją uzdatniania gazu składowiskowego.

Gaz składowiskowy doprowadzony do SEC wykorzystywany jest jako paliwo alternatywne do opalania dwóch kotłów parowych, dla których podstawowym paliwem jest węgiel kamienny spalany w postaci pyłu. Gaz składowiskowy spalany jest za pośrednictwem palników, które ze względu na swą budowę nazywane są „pistoletami gazowymi”. Każdy kocioł wyposażony jest w cztery palniki, które mogą pracować tylko wtedy, gdy kocioł zasilany jest paliwem podstawowym. Palniki gazowe, w razie konieczności, można wymontować z kotła.

Stacja uzdatniania gazu zaprojektowana jest do pracy ciągłej, co wymusza na SEC odbiór odpowiedniej ilości gazu składowiskowego. Istot-

nym elementem całego systemu doprowadzania gazu jest automatyczny system kontroli pracy stacji uzdatniania, która może bardzo elastycznie reagować na zmiany w odbiorze paliwa przez SEC. W przypadku zmniejszenia ilości gazu odbieranego przez SEC jego nadmiar jest spalany w pochodni, stanowiącej jeden z elementów instalacji.



Fot. 6. Chłodnica wentylatorowa

Podsumowanie

Instalacja SEC-OUC/Orange County stanowi jeden z wielu sposobów bezpośredniego wykorzystania gazu składowiskowego do celów energetycznych. Dostosowanie kotłów w SEC umożliwiło spalanie gazu składowiskowego w ilościach pozwalających na widoczne obniżenie ilości spalanego węgla kamiennego, co ma pozytywny wpływ

na ekonomię procesu wytwarzania energii. Dodatkowym atutem odzysku gazu ze składowiska jest efekt środowiskowy, polegający na zmniejszeniu emisji gazów cieplarnianych w procesie konwersji metanu do dwutlenku węgla oraz redukcja pyłów i innych zanieczyszczeń gazowych powstających w trakcie spalania węgla kamiennego.

Literatura

- [1] Dudek J., Klimek P. i in.: *Technologie energetycznego wykorzystania gazu składowiskowego*. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu Nr 174. Kraków 2010.
- [2] Goldstein R.: *Update: the State of U.S. Landfill Gas Utilization Projects*, 2006, <http://www.energyvortex.com/files/landfillgasupdate11-06.pdf>
- [3] Griffin S., Hilton E.: *OUC/Orange County Landfill Gas to Energy Project Utility Purchase of Landfill Gas from a Publicly Owned Landfill*. SWANA's 16th Annual Landfill Symposium. Orlando 2011.
- [4] United States Environmental Protection Agency; *Adapting boilers to utilize landfill gas: an environmentally and economically beneficial opportunity*, 2009, <http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/boilers.pdf>
- [5] United States Environmental Protection Agency; *LFG Energy Project Development, Handbook*, 2006, <http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html>



Mgr inż. Jerzy DUDEK – absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Wydział Wiertniczo-Naftowy. Kierownik Zakładu Technologii Energii Odnawialnych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Obecnie zajmuje się realizacją prac badawczych związanych z produkcją energii ze źródeł odnawialnych.



Mgr inż. Piotr KLIMEK – asystent w Zakładzie Technologii Energii Odnawialnych INiG. Absolwent Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej oraz Wydziału Zarządzania AGH w Krakowie. Zajmuje się problematyką energetycznego wykorzystania biogazu, w tym aspektami ekonomicznymi. Od 2004 roku bierze czynny udział w realizacji międzynarodowych projektów badawczych.