

## Identification analysis of dynamic changes in the composition of biogas and their impact on the operation of internal combustion engines

*Abstract: In the paper the results of analysis of the composition of the biogas from a municipal landfill have been presented. Biogas is formed naturally in the fermentation process that occurs in an organic part of landfill and may be realized during about 20 years. Collected biogas is used as a fuel for power generator sets equipped with spark-ignition engines adapted to be fuelled with biogas. Landfill biogas is characterized by considerable changes in its composition that changes during the whole period of fermentation process. Particularly important are changes in methane content, which defines the energetic value of fuel and significantly affect the work of biogas engines in generator sets. In this paper, based on the results of the biogas content investigation, are presented the scope and dynamics of the methane content in the biogas originated from a landfill. It is also discussed the impact of dynamic changes in the biogas methane content on the operation and the durability of landfill biogas fuelled engines. The results suggested criteria that should be taken into consideration during the selection of landfill biogas-fueled engines.*

Key words: internal combustion engines, alternative fuels, biogas, biogas power plants

### Badania identyfikacyjne dynamicznych zmian składu biogazu oraz ocena ich wpływu na pracę silników spalinowych

*Streszczenie: W pracy zamieszczono wyniki badań składu biogazu pozyskiwanego na komunalnym wysypisku śmieci. Pozyskiwany biogaz jest wykorzystywany do zasilania biogazowych zespołów prądotwórczych wyposażonych w silniki o zapłonie iskrowym dostosowanych do zasilania tym paliwem. Pozyskiwany biogaz powstaje w sposób naturalny w procesie beztlenowej fermentacji zachodzącej przez ok. 20 lat, w organicznej części przyzmy odpadów składowanych na wysypisku śmieci. Proces fermentacji charakteryzuje się tym, że w całym okresie eksploatacji wysypiska skład pozyskiwanego biogazu może się znacznie zmieniać. Szczególnie istotnymi są zmiany zawartości metanu, która definiuje wartość opałową paliwa oraz w istotny sposób wpływa na pracę silników w biogazowych agregatach prądotwórczych. W referacie, na podstawie wyników badań biogazu, przedstawiono zakres i dynamikę zmian zawartości metanu w biogazie pozyskiwanym z rozpatrywanego wysypiska śmieci. Omówiono również wpływ dynamicznych zmian zawartości metanu w biogazie na pracę i potencjalną trwałość silników zasilanych tym paliwem. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano kryteria, które należy brać pod uwagę podczas doboru silników zasilanych biogazem wysypiskowym.*

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, paliwa alternatywne, biogaz, projektowanie siłowni z silnikami spalinowymi

### 1. Wstęp

Zaostrzenie kryteriów ochrony środowiska naturalnego oraz wprowadzenie limitów emisji CO<sub>2</sub> spowodowały wzmożone zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii. Jednym z nich jest energia biomasy a w niej biogaz. Biogaz jest to gaz składający się głównie z metanu i dwutlenku węgla powstający w procesie fermentacji beztlenowej. W ostatnich latach w Polsce obserwowane jest wzmożone zainteresowanie produkcją biogazu i spalaniem go w lokalnych elektrociepłowniach wyposażonych najczęściej w tłokowe silniki spalinowe napędzające generatory prądu. Główne powody wzrostu zainteresowania biogazem jako paliwem są związane z bardziej restrykcyjnym

podejściem do ograniczeń swobodnej migracji metanu do atmosfery oraz z wprowadzonymi mechanizmami finansowymi mającymi zachęcać do korzystania z odnawialnych źródeł energii. Mechanizmy te to certyfikaty pochodzenia energii: zielone – przyznawane z wykorzystywaniem odnawialnych źródeł energii oraz czerwone – przyznawane za wysokosprawną produkcję energii w modułach kogeneracyjnych.

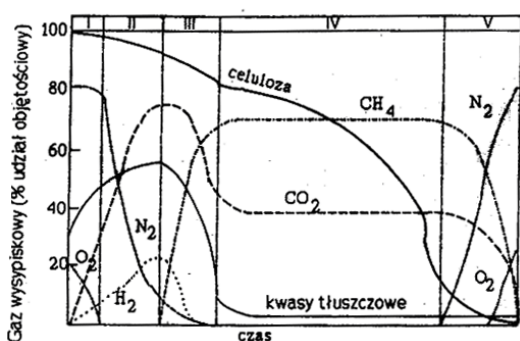
Jednym z potencjalnych źródeł produkcji biogazu są wysypiska śmieci, gdzie biogaz powstaje w sposób naturalny z odpadów pochodzenia organicznego. W związku ze wspomnianymi ograniczeniami swobodnej migracji metanu biogaz powstający na wysypiskach śmieci musi być zbierany i utylizowany. Wszystkie

nowobudowane wysypiska śmieci muszą być wyposażane w instalacje do odgazowywania przyzmy oraz do utylizowania pozyskanego biogazu. Utylizacja w najprostszej formie polega na spaleniu biogazu w pochodni. Ze względu na dużą zawartość metanu w biogazie (30-70%) możliwe jest wykorzystanie go jako paliwa do zasilania agregatów prądotwórczych z tłokowymi silnikami spalinowymi. Wprowadzenie dopłat do produkcji energii elektrycznej w takich zespołach oraz znaczące zwiększenie zapotrzebowania na energię elektryczną na terenie wysypiska związane z rozbudowanymi systemami sortowania śmieci spowodowały, iż budowa własnej elektrowni biogazowej zwraca się już po kilku latach eksploatacji. Istnieje jednak cały szereg trudności związanych z eksploatacją silników zasilanych biogazem wysypiskowym [4, 6].

## 2. Technologia wytwarzania i pozyskiwania biogazu wysypiskowego

Biogaz powstaje na skutek naturalnego procesu fermentacji beztlenowej substancji organicznych. Fermentacja przebiega w kilku etapach, podczas których dominującą rolę pełnią różne bakterie beztlenowe przetwarzające materiał organiczny do kolejnych postaci.

Głównymi składnikami biogazu wysypiskowego są metan oraz dwutlenek węgla. Skład biogazu wytwarzanego w kolejnych etapach procesu fermentacji jest różny i zależy od stopnia zaawansowania procesu, rodzaju substratów organicznych, zawartości odpadów nieorganicznych, konstrukcji przyzmy, długości okresu składowania, zawartości metali ciężkich oraz warunków klimatycznych, czyli temperatury, wilgotności i odczynu pH wewnątrz przyzmy. Na rys. 1 przedstawiono udział poszczególnych gazowych składników w biogazie w zależności od etapu procesu fermentacji.

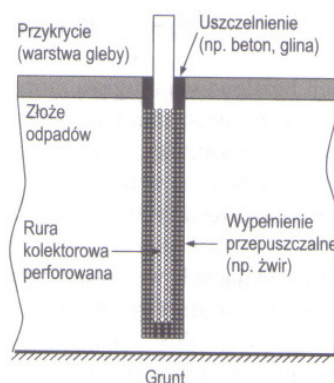


Rys. 1. Fazy wytwarzania biogazu w przyzmy odpadów I- faza tlenowa i przejściowa II- faza acetogenna III - faza metanogenna niestabilna IV- faza metanogenna stabilna V- faza metanogenna zanikająca [8]

W pierwszych dwóch fazach ze względu na dużą obecność tlenu i azotu w złożu zachodzi głównie fermentacja tlenowa, w wyniku której głównym składnikiem biogazu jest dwutlenek węgla. W trzeciej fazie fermentacja tlenowa zamienia się na beztlenową, prowadzoną w procesie metanogenezy, podczas której dochodzi do wytwarzania metanu. Czas realizacji pierwszych trzech faz to ok. 500 dni. Kolejna faza – metanogeneza stabilna – to okres wyrównania się proporcji pomiędzy metanem i dwutlenkiem węgla. Jest to faza normalnej eksploatacji przyzmy trwająca ok. 20 lat. Po niej następuje faza zaniku wytwarzania metanu i w przypadku utrzymania odpowiedniego składu przyzmy podczas jej formowania, możliwe jest jej rozkopanie i wysypanie jej jako nawóz na pola uprawne.

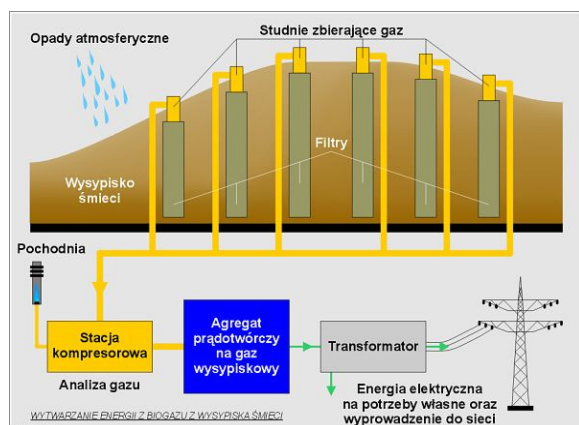
Wartość opałowa biogazu wysypiskowego zależy głównie od procentowej zawartości metanu i przeważnie mieści się w przedziale 12 – 22 MJ/m<sup>3</sup>. Ilość pozyskiwanego biogazu zależy od składu przyzmy. Przeciętnie przyjmuje się, że z 1 tony odpadów komunalnych, zawierającej ok. 200 kg materii organicznej, można uzyskać ok. 150 m<sup>3</sup> biogazu.

Technologia budowy systemów odgazowania składowisk śmieci polega na wykonaniu w złożu odwiertów o średnicy ok. 0,2 m na całą głębokość warstwy odpadów. Wewnątrz odwiertu instalowane są perforowane rury kolektorowe służące do zbierania biogazu wydzielającego się z odpadów. Przestrzeń wokół rury zasypywana jest płukanym żwirem o gramaturze ok. 30 mm. Przykładowe rozwiązanie takiej studni biogazowej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat budowy studni biogazowej [3]

Studnie biogazowe połączone są układem kolektorów zbierających biogaz, który jest zasysany przez stację kompresorową i kierowany do utylizacji w pochodni bądź w kotle lub silniku biogazowym. Schemat systemu odgazowania składowiska przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat budowy systemu odgazowania składowiska odpadów [7]

### 3. Badania składu biogazu na wysypisku odpadów komunalnych

Przedstawione poniżej wyniki badań dotyczą parametrów biogazu pozyskiwanego na komunalnym wysypisku śmieci zlokalizowanym w Gdańsku Szadółkach. Budowę systemu odgazowania zamkniętej przymy o powierzchni ok. 15 ha rozpoczęto w 1997 poprzez wykonanie 39 odwiertów. Pozyskiwanie metanu rozpoczęło się w 1998 r. Biogaz wykorzystywany jest głównie do zasilania dwóch agregatów kogeneracyjnych o mocy 200 kW każdy. Szerszy opis danych wysypiska zamieszczono w pracy [5]. Dane wykorzystane do poniższych analiz pochodzą ze stacji monitoringu składu biogazu dostarczanego do lokalnej elektrociepłowni i zostały zebrane w okresie od początku eksploatacji elektrowni do końca 2008 r. Zestawienie ilości pozyskanego w tym okresie biogazu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Produkcja biogazu w kolejnych latach

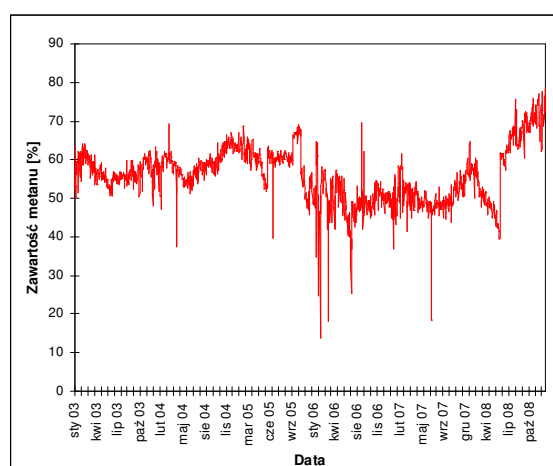
Rok	Ilość pozyskanego biogazu [m <sup>3</sup> ]
1998	717 268
1999	1 446 059
2000	1 224 519
2001	1 517 121
2002	1 653 488
2003	1 700 830
2004	1 588 660
2005	1 727 732
2006	705 167
2007	822 938
2008	1 228 894

Wartości przedstawione w tabeli 1 wskazują, że przez pierwsze trzy lata eksploatacji złoza następował wzrost ilości pozyskiwanego biogazu. Następnie od roku 2001 ilość pozyskiwanego biogazu stabilizuje się. Wyraźny spadek wartości ilości zebranego biogazu zaobserwowany w roku

2006 i jest związany z zamuleniem części studni biogazowych, co spowodowało wyłączenie ich z eksploatacji.

Celem przeprowadzonych badań było określenie zakresu i dynamiki zmienności zawartości metanu w pozyskiwanym biogazie oraz w miarę możliwości ustalenie czynników zewnętrznych mających wpływ na zmiany składu biogazu. Prezentowane poniżej wyniki (rys. 4÷9) dotyczą sześciu lat eksploatacji przymy odpadów tj. od początku roku 2003 do końca 2008.

Na rys. 4 zaprezentowano przebieg zmienności zawartości metanu w całym okresie objętym badaniem.



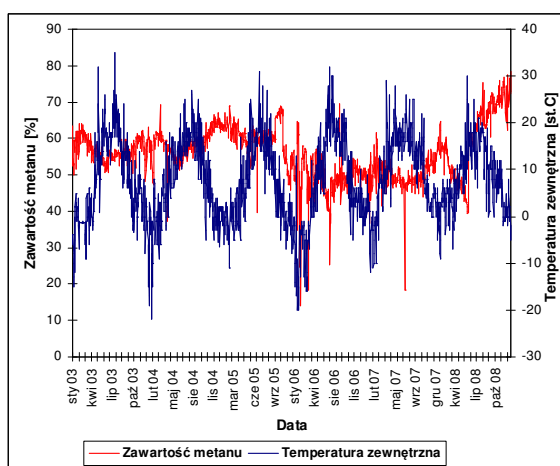
Rys. 4. Zmiany zawartości metanu w pozyskiwanym biogazie w okresie 6. lat eksploatacji przymy

Uwagę zwraca okresowa zmienność zawartości biogazu, ściśle związana z porami roku. W okresie zimowym następuje wzrost zawartości metanu a w okresie letnim spadek. Taki charakter zmian prawdopodobnie związany jest z wilgotnością wewnątrz przymy, która w okresie zimowym jest większa, co wspomaga proces metanogenezy. Warto zwrócić uwagę również na to, że w latach 2003-2006 średnia zawartość metanu w biogazie jest zbliżona. W 2006 r. następuje wyraźny spadek średniej zawarości metanu w biogazie a w połowie 2008 r. ponowny wzrost nawet powyżej wartości rejestrowanych przed rokiem 2006. Ogólny spadek zawartości metanu rejestrowany po roku 2006 związany jest ze wspomnianym wcześniej zamuleniem części studni biogazowych, co wskazuje na niejednorodność składu biogazu pozyskiwanego z poszczególnych studni. Przyczyną niejednorodności składu biogazu jest najczęściej zróżnicowany skład przymy w okolicy poszczególnych studni. Taka sytuacja występuje na większości „starych” wysypisk, na których składowanie odbywało się bez segregacji i

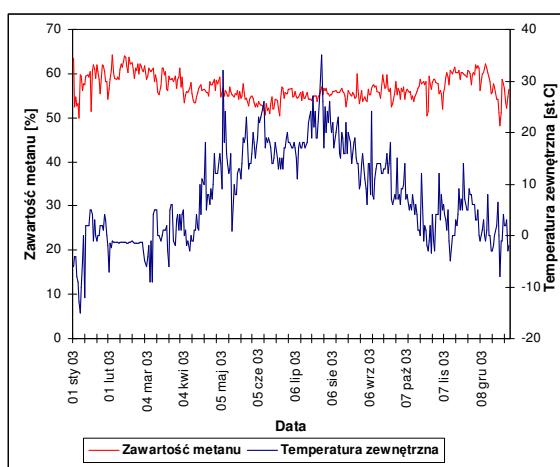
wewnątrz pryzmy znajdują się obszary o większej i mniejszej zawartości materiału organicznego.

Szczególną uwagę zwraca ponowny wzrost zawartości metanu w biogazie zarejestrowany w połowie 2008r. Wzrost ten nie był związany ze zmianą ilości czynnych studni. Prawdopodobnie, poprzez wypłukanie warstwy nieprzepuszczalnej, doszło do uaktywnienia warstw odpadów o dużej zawartości materiału organicznego. Ponownie przyczyną takiej sytuacji jest niejednorodność składu pryzmy, która zwiera duże ilości odpadów nieorganicznych mogących ograniczać dostęp wody do materiału organicznego i okresowo wygaszać proces fermentacji.

Kolejnym etapem badań było poszukiwanie czynników zewnętrznych, które mogłyby mieć wpływ na zmiany składu biogazu. Ze względu na ograniczoną liczbę rejestrowanych parametrów pod uwagę wzięto wpływ temperatury otoczenia i ciśnienia atmosferycznego.



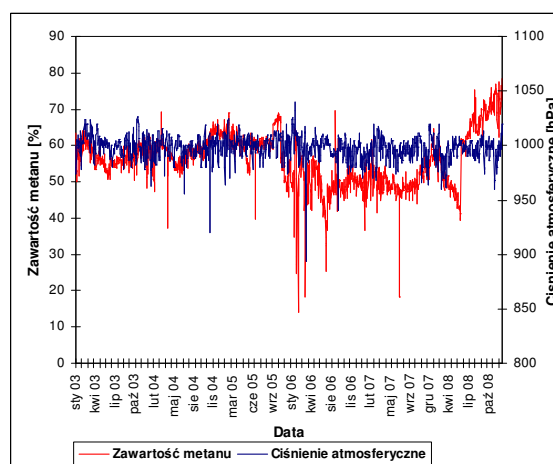
Rys. 5. Zależność zmian zawartości metanu od temperatury otoczenia (lata 2003÷2008)



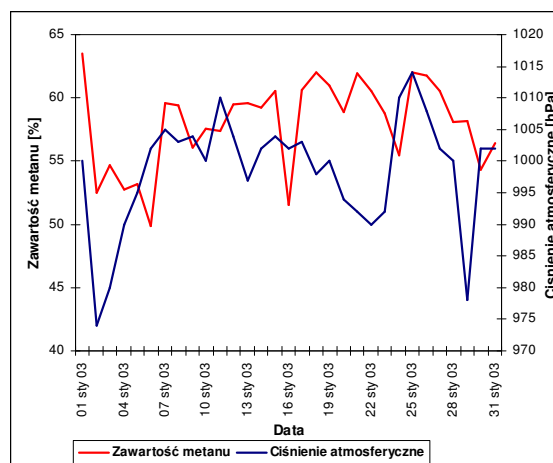
Rys. 6. Zależność zmian zawartości metanu od temperatury otoczenia (rok 2003 szczegółowo)

Związek zmian temperatury otoczenia ze zmianami zawartości metanu w pozyskiwanym biogazie przedstawiono na rys. 5 i 6. Zauważalna jest pewna prawidłowość, że ze wzrostem temperatury otoczenia spada zawartość metanu. Zaobserwowana zależność jest prawdopodobnie wynikiem zmian wilgotności składowiska, na którą temperatura otoczenia ma również wpływ.

Ogólna analiza zależności składu biogazu od ciśnienia atmosferycznego, obserwowana dla całego okresu badawczego (rys.7) nie pozwala zaobserwować istnienia ścisłej korelacji między tymi parametrami.



Rys. 7. Zależność zmian zawartości metanu od ciśnienia atmosferycznego (lata 2003÷2008)

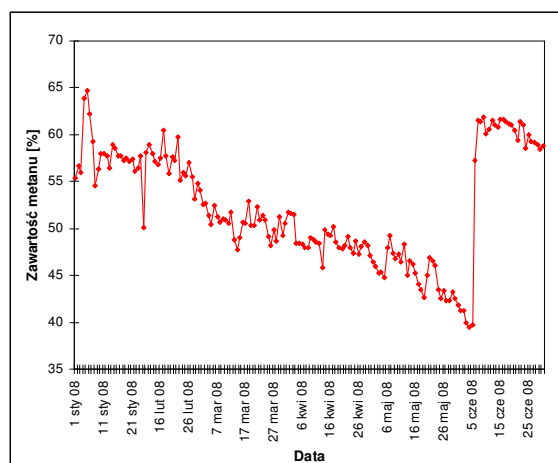


Rys. 8. Zależność zmian zawartości metanu od ciśnienia atmosferycznego (rok 2003 szczegółowo)

Bardziej szczegółowa analiza (rys. 8) wykazała jednak istnienie pewnej zależności polegającej na tym, że zmiany zawartości metanu w biogazie podążają za zmianami ciśnienia atmosferycznego. Potwierdzają to również obserwacje załogi elektrowni na wysypisku, którzy zauważyli wpływ

warunków atmosferycznych na skład biogazu. Analizowane zmiany ciśnienia atmosferycznego są przesunięte względem zmian zawartości metanu w biogazie o ok. 2 ÷ 3 doby. Sytuacja ta może być związana z lotnością mieszaniny metan-dwutlenek węgla. Metan jest lżejszy od powietrza natomiast dwutlenek węgla jest cięższy od powietrza. Prawdopodobnie w okresach wyższego ciśnienia atmosferycznego część dwutlenku węgla nie jest wyciągana ze studni (pryzmy) przez system odsysania biogazu, co powoduje uzyskiwanie biogazu o większej zawartości metanu. Gdy ciśnienie atmosferyczne spada, wzrasta ilość odsysanego dwutlenku węgla co powoduje zmniejszony udział metanu.

Kolejnym badanym parametrem była dynamika zmian zawartości metanu w biogazie. Rejestracja danych odbywała się raz w ciągu doby. Okazało się że większość zmian zawartości metanu w biogazie mieści się w granicach od kilku do kilkunastu %. Skoki rzędu 30-40% rzadko występują w ciągu doby, jednakże w okresie miesięcznym, czy kwartalnym nie są niczym nadzwyczajnym. Na rys. 9 przedstawiono przykład dobowych zmian składu metanu w biogazie obserwowanych w ciągu ½ roku.



Rys. 9. Przykład dynamiki zmian zawartości metanu w biogazie

#### 4. Wpływ zmian składu biogazu na pracę silników gazowych

Większość silników zasilanych biogazem to silniki o zapłonie iskrowym wyposażone w prosty układ sterowania, w którym wielkość dawki paliwa i skład mieszanki paliwowo-powietrznej są regulowane głównie na podstawie sygnału z sondy lambda, przetwornika podciśnienia w kolektorze dolotowym. Kat wyprzedzenia zapłonu najczęściej jest stały. Szerszy opis rozwiązań tego typu zamieszczono m.in. w pracach [1, 2, 6]. Tego typu układy sterowania dobrze sprawdzają się podczas

zasilania silników gazem ziemnym lub biogazem o stałym składzie. Są one w stanie częściowo kompensować zmiany wartości opałowej związanej ze zmianami zawartości metanu w biogazie. W przypadku zubożenia mieszanki wywołanego zmniejszeniem zawartości metanu w biogazie, prędkość obrotowa silnika spada i układ sterowania podaje zwiększoną dawkę paliwa (biogazu) celem skompensowania jego zmniejszonej wartości energetycznej. W przeciwnym przypadku, gdy zawartość metanu w biogazie rośnie, prędkość obrotowa silnika rośnie i układ sterowania zmniejsza dawkę paliwa celem utrzymania założonej prędkości obrotowej. Jedną z wad takiego układu sterowania jest niewielki zakres tolerancji na zmiany składu biogazu. Zazwyczaj jest to od kilkunastu do dwudziestu procent zmiany zawartości metanu w biogazie, co jest zbyt małym zakresem w stosunku do prezentowanych wcześniej zmian w składzie biogazu wysypiskowego dochodzącymi do 30-40%. Powoduje to, że układ sterowania nie jest w stanie skompensować dużych zmian składu biogazu. W przypadku zmniejszenia zawartości metanu, w zakresie przekraczającym limit przewidziany w charakterystyce sterowania silnika, układ sterowania automatycznie zmniejsza obciążenie silnika aż do jego odstawienia, po przekroczeniu wartości minimalnego dopuszczalnego obciążenia. Większe niebezpieczeństwo niesie zwiększenie zawartości metanu w biogazie. Mianowicie po przekroczeniu maksimum zawartości metanu na charakterystyce sterowania silnika układ sterowania nie jest w stanie w dalszym ciągu zmniejszać dawki paliwa. Na skutek zwiększonej zawartości metanu w biogazie mieszanka paliwowo-powietrzna ulega wzbogaceniu do tego stopnia, że może pojawić się spalanie stukowe, skutkujące uszkodzeniem silnika. Omawiane silniki, ze względu na oszczędności inwestycyjne, nie są najczęściej wyposażone w czujniki spalania stukowego.

Serwisy obsługujące silniki zazwyczaj odpierają zarzut niewystarczającego dopuszczalnego zakresu składu biogazu tym, że mogą dostosowywać silnik do aktualnych warunków. Takie dostosowanie silnika w kierunku wyższych bądź niższych zawartości metanu może przynieść zamierzony skutek wtedy, gdy zmiany średniej zawartości metanu w biogazie są bardzo powolne lub mają miejsce okresowo, przy czym są to przewidywalne i długotrwałe okresy. Przedstawione wyniki badań dynamiki zmian zawartości metanu biogazie (rys.4 i 9) wskazują na brak możliwości stosowania takiego rozwiązania w praktyce. Skutkuje to tym, że w celu zabezpieczenia silników przed występowaniem spalania stukowego mają one sztucznie (zawczasu) ograniczoną maksymalną moc. Wpływa to istotnie na ilość wyprodukowanej energii elektrycznej i rentowność całej inwestycji.

---

## 4. Podsumowanie

Procedury dobru silników zasilanych biogazem wysypiskowym stosowane przez producentów wykazują pewne braki. Silniki mają kalibrowany układ sterowania przy użyciu informacji o uśrednionych wartościach składu biogazu, bez uwzględniania informacji o zakresie zmienności tego składu. Opisywane proste układy sterowania i standardowe procedury doboru silników sprawdzają się w przypadku zasilania gazem ziemnym (stały skład) lub biogazem z biogazowni, gdzie skład biogazu może być sterowany i utrzymywany w zakresie niewielkiej zmienności. W przypadku gazu wysypiskowego, którego proces wytwarzania jest niesterowalny i zależy od wielu czynników, powyższe rozwiązania się nie sprawdzają. Oznacza to, że silnik zasilany biogazem z biogazowni nie musi się sprawdzić na wysypisku śmieci, co więcej silnik bezproblemowo eksploatowany na jednym wysypisku może przysparzać wielu kłopotów na wysypisku o zupełnie innej charakterystyce zmian składu biogazu.

Kolejnym aspektem wpływającym na problemy eksploatacyjne z silnikami na wysypiskach jest formalny sposób prowadzenia przetargu na zakup silników. Ponieważ są to inwestycje ze środków gminnych, to podlegają Ustawie o zamówieniach publicznych. Niestety ze względu na brak właściwego nadzoru inżynierskiego w zakresie doboru odpowiednich silników najczęściej jedynym kryterium jest cena zakupu. Dlatego też na wysypiskach montowane są silniki wyposażone w układy sterowania nie dostosowane do eksploatacji przy silnie zmiennym składzie biogazu oraz niewyposażone w odpowiednie zabezpieczenia przed uszkodzeniem na skutek wystąpienia spalania stukowego. Skutkuje to brakiem możliwości eksploatacji tych silników z nominalnym obciążeniem, zwiększoną awaryjnością i krótszymi okresami pomiędzy kolejnymi przeglądami. Czynniki te mają wpływ na zmniejszenie wpływu ze sprzedaży energii elektrycznej i zwiększenie ponoszonych kosztów, co negatywnie wpływa na rentowność inwestycji.

---

## Literatura

- [1] Cupiał K., Grzelka J., Pyrc M.: Sterownie dwupaliwowego agregatorowego silnika spalinowego. Proceedings of the VIIIth International Scientific Conference Gas engines 2010, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2010, Polska.
- [2] Klimstra, J.: Optimum Load Step Response of Fuel-Injected Reciprocating Gas Engines. Paper number 215, CIMAC 2004 Congress, June 6-10, 2004, Kyoto, Japan.
- [3] Skorek J., Kalina J.: Gazowe układy kogeneracyjne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2005.
- [4] Ziółkowski M. Balcerski A.: Wybrane zagadnienia wykorzystania biogazu jako paliwa silników spalinowych w skojarzonych układach energetycznych. Materiały konf. XXVIII Sympozjum Siłowni Okrętowych SYMSO 2007, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2007, Polska
- [5] Ziółkowski M.: Wstępne badania identyfikacyjne elektrociepłowni kogeneracyjnej z silnikami spalinowymi zasilanymi paliwem gazowym. Materiały konf. XXX Sympozjum Siłowni Okrętowych SYMSO 2009. Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2009, Polska.
- [6] Ziółkowski M.: Some problems with operation of engines fuelled with landfill biogas. Journal of KONES Powertrain and Transport. - Vol. 17, iss. 4 (2010).
- [7] Strona internetowa [www.biogazownie.ferox.pl](http://www.biogazownie.ferox.pl)
- [8] Strona internetowa [www.ekowat.pl](http://www.ekowat.pl)

Mr Ziółkowski Maciej, DEng. – assistant professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Gdańsk University of Technology.

*Dr inż. Maciej Ziółkowski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.*



Mr Kropiwnicki Jacek, DEng. – assistant professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Gdańsk University of Technology.

*Dr inż. Jacek Kropiwnicki – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.*

