

## Application of the life cycle assessment (LCA) method to the estimation of environmental impact of the engine biofuels generation for example of biogas fuel

The "Life Cycle Assessment" (LCA) is a process to evaluate the environmental burdens associated with a product, process or activity by identifying and quantifying energy and materials used and wastes released to the environment, and to assess the impact of those energy and materials used and releases to the environment. The assessment includes the entire life cycle of the product, process or activity, encompassing: extracting and processing raw materials; manufacturing, transportation and distribution; use, re-use, maintenance; recycling and final disposal. The LCA orients the assessment of environmental impact of a product system to the areas of ecosystem, human health and resources used. In the light of the obligations imposed by the European Union on its member states regarding the minimisation of environmental impact of the fuel industry, the LCA method helps to meet these requirements and is a useful tool to fulfil such obligations. It covers the whole life cycle of a fuel, from the raw material extraction, through the fuel production and use, to the procedures of management of the fuels that do not meet the applicable standard requirements.

The life cycle assessment (LCA) method has been described as one of the methods that make it possible to estimate the environmental impact of the process of manufacturing biogas as a fuel intended for internal combustion (IC) engines. Individual stages of the LCA process as well as the assessment preparation principles and requirements are governed by the ISO 14000 series of standards (from 14040 to 14049) and the corresponding Polish equivalents.

Key words: biogas, LCA, life cycle assessment, fuel, ISO

### Zastosowanie metody oceny cyklu istnienia LCA do oszacowania wpływu na środowisko wytwarzania biopaliw transportowych na przykładzie paliwa biogazowego

Ocena Cyklu Istnienia LCA (ang. Life Cycle Assessment) to technika mająca na celu ocenę zagrożeń środowiskowych związanych z systemem wyrobu lub działaniem, zarówno przez identyfikowanie oraz ocenę ilościową zużytych materiałów i energii, a także odpadów wprowadzanych do środowiska, jak i przez ocenę wpływu tych materiałów, energii i odpadów na środowisko. Ocena dotyczy całego okresu istnienia wyrobu lub działania, począwszy od wydobycia i przetwórstwa surowców mineralnych, procesu produkcji wyrobu, dystrybucji, stosowania, wtórnego wykorzystania, utrzymania, recyklingu aż do końcowego zagospodarowania oraz transportu. LCA ukierunkowuje badanie wpływu na środowisko systemu wyrobu w obszar ekosystemu, zdrowia ludzkiego oraz zużytych zasobów. W świetle zobowiązań, jakie nakłada na kraje członkowskie Unia Europejska, dotyczących minimalizacji wpływu na środowisko przemysłu paliwowego, metoda LCA wychodzi naprzeciw tym wymaganiom i jest użytecznym narzędziem w ich realizacji. Obejmuje ona cały cykl istnienia paliwa: pozyskanie surowców, jego wytworzenie, użytkowanie oraz procedury postępowania z paliwami niespełniającymi wymagań norm przedmiotowych.

W publikacji omówiono metodę oceny cyklu istnienia LCA jako jedną z metod pozwalających na oszacowanie wpływu na środowisko procesu wytwarzania biopaliw transportowych, na przykładzie paliwa biogazowego mającego zastosowanie do silników spalinowych. Omówiono również poszczególne etapy LCA oraz wymagania i zasady sporządzania oceny, które regulowane są przez normy serii ISO 14000 (od 14040 do 14049) oraz ich polskie odpowiedniki.

Słowa kluczowe: biogaz, LCA, ekologiczna ocena cyklu istnienia, paliwo, ISO

#### 1. Introduction

The "Life Cycle Assessment" (LCA) is a relatively new technique of environmental management. It makes it possible to identify the most important environmental aspects and to assess their environmental impacts at all the stages of a product life ("from-cradle-to-grave," i.e. from raw material extraction through production process, product use, and waste disposal or recycling).

In the light of the obligations imposed by the European Union on its member states regarding the minimisation of environmental impact of the fuel industry, the LCA method

#### 1. Wprowadzenie

Ocena Cyklu Istnienia LCA (*Life Cycle Assessment*) jest stosunkowo nową metodą zarządzania środowiskowego. Pozwala na identyfikację najważniejszych aspektów środowiskowych oraz ocenę ich wpływu na środowisko w całym cyklu istnienia danego wyrobu (tzn. „od kołyski do grobu”) począwszy od pozyskania surowców przez proces produkcyjny, użytkowanie oraz końcowe zagospodarowanie odpadów.

W świetle zobowiązań, jakie nakłada na kraje członkowskie Unia Europejska dotyczących minimalizacji wpływu na

helps to meet these requirements and is a useful tool to fulfil such obligations. It covers the whole life cycle of a fuel, from the raw material extraction, through the fuel production and use, to the procedures of management of the fuels that do not meet the applicable standard requirements.

The application of the LCA method to the fuel sector makes it possible to identify and, to become aware of, the interrelations between human activities and their impacts on the environment. This also provides an important source of information in the process of taking decisions aimed at minimisation of the harmful impact of fuel production on the environment and, in consequence, at environmental improvement.

An analysis of the possibilities of using the life cycle assessment to estimate the environmental impact of biogas as an engine fuel has been presented in this paper.

## 2. Description of the LCA process

The life cycle assessment (LCA) is governed by the ISO 14000 series of standards (from 14040 to 14049) and the corresponding Polish equivalents (Table 1). These standards provide requirements and guidelines for the preparation of evaluation reports as well as principles of interpretation of evaluation results and templates of the documents required.

According to the ISO standards concerning LCA, the LCA process consists of four phases as presented in Fig. 1:

- Goal and Scope Definition,
- Life Cycle Inventory (LCI),
- Life Cycle Impact Assessment (LCIA),
- Life Cycle Interpretation.

Goal and scope of the analysis this is the first phase of the LCA process, during which decisions determining the whole analysis are taken. The Polish Standard PN-EN ISO 14040:2006 regulates the notion of goal of evaluation, which should unequivocally define the intended application, reasons for undertaking the evaluation, and prospective

środowisko przemysłu paliwowego, metoda LCA wychodzi naprzeciw tym wymaganiom i jest użytecznym narzędziem w ich realizacji. Obejmuje ona cały cykl istnienia paliwa od momentu pozyskania surowców, poprzez jego wytworzenie, użytkowanie oraz procedury postępowania z paliwami niespełniającymi wymagań norm przedmiotowych.

Zastosowanie metody LCA w sektorze paliw pozwala na uświadomienie i wskazanie współzależności między działalnością człowieka a jej konsekwencjami dla środowiska naturalnego. Stanowi również ważne źródło informacji w procesie podejmowania decyzji mających na celu zminimalizowanie negatywnego wpływu wytwarzania paliw na środowisko przyrodnicze, a co za tym idzie poprawę jego stanu.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę możliwości zastosowania oceny cyklu istnienia do oszacowania wpływu na środowisko biogazu jako paliwa silnikowego.

## 2. Charakterystyka LCA

Wytyczne odnośnie do oceny cyklu istnienia LCA regulowane są przez normy serii ISO 14000 (od 14040 do 14049) oraz ich polskie odpowiedniki (tabela 1). Normy te zawierają wymagania i zasady sporządzania oceny, jak również zasady interpretacji jej wyników i wzory wymaganych dokumentów.

Zgodnie z normami ISO dotyczącymi LCA metodyka badań LCA składa się z czterech faz przedstawionych na rysunku 1 [5, 6]:

- określenie celu i zakresu (*Goal and Scope definition*),
- analiza zbioru wejść i wyjść (*Life Cycle Inventory Analysis – LCI*),
- ocena wpływu cyklu istnienia (*Life Cycle Impact Assessment – LCIA*),
- interpretacja (*Life Cycle Interpretation*).

Cel i zakres analizy to pierwsza faza oceny LCA, w której podejmowane są decyzje determinujące całość analizy. Norma PN-EN ISO 14040:2006 [5] reguluje pojęcie celu

Table 1. The ISO standards concerning the life cycle assessment

Tabela 1. Normy ISO dotyczące oceny cyklu istnienia

ISO standard	Equivalent Polish standard
<b>ISO 14040:2006</b> Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework	<b>PN-EN ISO 14040:2009</b> Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura
<b>ISO 14044:2006</b> Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines	<b>PN-EN ISO 14044:2009</b> Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne
<b>ISO/TR 14047:2003</b> Environmental management – Life cycle impact assessment – Examples of application of ISO 14042	<b>PKN-ISO/TR 14047:2006</b> Zarządzanie środowiskowe – Ocena wpływu cyklu życia – Przykłady stosowania ISO 14042
<b>ISO/TS 14048:2002</b> Environmental management – Life cycle assessment – Data documentation format	<b>Polish version of the specification</b> Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Format dokumentowania danych
<b>ISO/TR 14049:2000</b> Environmental management – Life cycle assessment - Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis	<b>Polish version of the report</b> Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Przykłady stosowania ISO 14041 do określania celu i zakresu oraz analizy zbioru
<b>ISO 14050:2009</b> Environmental management – Vocabulary	No Polish equivalent available

user of the evaluation report. The goal of this evaluation is to determine the environmental impact of the making and use of biogas as an engine fuel. The scope of the evaluation directly stems from the goal assumed and covers the energy production process.

According to Polish Standard PN-EN ISO 14041:2006, the formulation of the scope of evaluation should include the following information:

- function of the product system,
- functional unit,
- boundaries of the product system,
- impact types, methods of impact assessment, and interpretation of assessment results,
- data quality requirements,
- assumptions,
- exclusions.

The “functional unit” is a “measure of the effects produced by functional outputs of a product system.” For the life cycle assessment of biogas, the functional unit has been defined as the quantity of fuel necessary for covering a distance of 100 km in urban conditions. The reference flow should be defined here as the quantity of petrol necessary to cover the same distance in the same conditions.

The system boundaries make it possible to define the unit processes that should be covered by the analysis. The defining of system boundaries is influenced by many factors, such as goal of the analysis, assumptions made, and exclusions adopted. According to the goal of this evaluation, the boundaries of the system under analysis encompass transport of raw material, biogas generation in a fermentation tank, purification of the gas generated, and use of the gas (Fig. 1). The system also includes the transportation of fermentation sludge to the field where the sludge is applied as a fertiliser; however, the fertiliser (sludge) application costs are outside of the system boundaries. The system boundaries do not encompass, either, the production of raw material handling trucks or components of process installations.

The substrate used in the methane fermentation process and consisting of animal excrements is simultaneously a waste material generated in result of cattle, pig, and poultry breeding; therefore, the acquisition of this material is also outside of the system boundaries.

The biogas production process wastes, except the fermentation sludge, chiefly consist of substances emitted to the atmosphere or water during the biogas purification process.

For biogas treatment, water scrubbers have been recognised as the best solution from economic and environmental protection point of view. This is the most popular biogas treatment technology and the necessary installations are widely available in the market. In the scrubber column, carbon dioxide is dissolved in water and the concentration of gaseous methane increases. Thus, the methane content of biogas at the scrubber outlet is significantly raised. The water leaving the absorption column flows to a storage tank. The waste gas containing some recoverable methane

badan, który powinien jednoznacznie określać zamierzone zastosowanie, powody podjęcia badań oraz potencjalnego odbiorcę. Celem opracowania jest określenie wpływu na środowisko wytwarzania i użytkowania biogazu jako paliwa silnikowego. Zakres badań wynika z założonego celu i obejmuje proces produkcji energii.

Zakres badań wynika bezpośrednio z założonego celu i zgodnie z normą PN-EN ISO 14040:2006 powinien zawierać między innymi następujące informacje [5]:

- funkcję systemu wyrobu,
- jednostkę funkcjonalną,
- system wyrobu poddany analizie,
- granice systemu wyrobu,
- procedury alokacji,
- rodzaje wpływów i metodykę oceny wpływu, a następnie jej interpretację,
- wymagania w stosunku do jakości danych,
- założenia,
- wyłączenia.

Jednostka funkcjonalna to „miara efektów spełnianych przez wyjścia funkcjonalne systemu wyrobu” [5]. W przypadku oceny cyklu istnienia biogazu jednostka funkcjonalna została zdefiniowana jako ilość paliwa niezbędną do pokonania dystansu 100 km w warunkach miejskich. System odniesienia zaś powinien stanowić ilość benzyny silnikowej niezbędnej do pokonania tego samego dystansu w tych samych warunkach.

Granice systemu pozwalają na określenie, które procesy jednostkowe powinny zostać objęte analizą. Na wyznaczenie granic systemu ma wpływ szereg czynników, między innymi cel badań, przyjęte założenia oraz wykluczenia. Zgodnie z celem opracowania granice analizowanego systemu obejmą transport surowca, wytwarzanie biogazu w komorze fermentacyjnej, oczyszczanie powstałego gazu oraz jego użytkowanie (rys. 1). Granicami systemu objęty zostanie również transport na pole osadu pofermentacyjnego, stosowanego jako nawóz jednak koszty jego aplikacji znajdują się poza granicami systemu. Poza granicami systemu znajdzie się również produkcja samochodów służących do transportu surowca oraz urządzeń wchodzących w skład instalacji. Substrat w postaci odchodów zwierzęcych stosowany w procesie fermentacji metanowej jest jednocześnie odpadem powstającym w wyniku chowu krów, trzody chlewnej oraz drobiu, w związku z tym jego pozyskanie również znajduje się poza granicami systemu. Odpady w procesie produkcji biogazu, oprócz osadu pofermentacyjnego, stanowią głównie emisje do powietrza oraz wody z procesu oczyszczania biogazu [7 – 10].

Jako najkorzystniejszą z ekonomicznego i środowiskowego punktu widzenia technologią oczyszczania biogazu uznano płuczki wodne. Są one najczęściej stosowaną techniką oczyszczania biogazu, zaś instalacje wykorzystujące tę metodę są powszechnie dostępne na rynku. W kolumnie płuczki ditlenek węgla jest rozpuszczany w wodzie, stężenie metanu zaś w fazie gazowej wzrasta. Gaz opuszczający płuczkę ma znacznie większe stężenie metanu. Woda opuszczająca kolumnę absorpcyjną trafia do zbiornika ma-

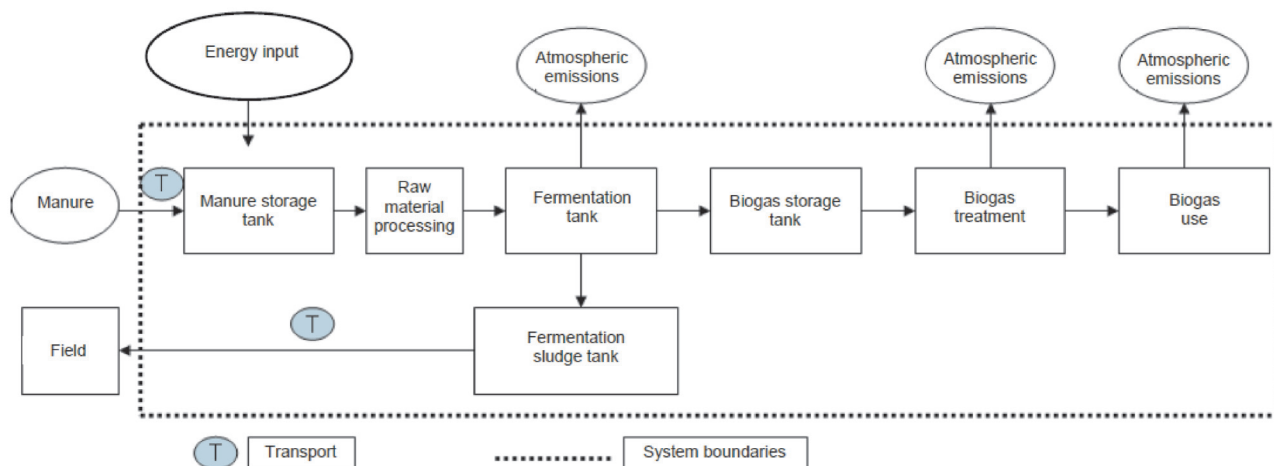


Fig. 1. Schematic diagram of the LCI model of the production chain under evaluation, showing all the stages taken into account in the analysis (source: author's study)

Rys. 1. Ogólny schemat modelu LCI badanego ciągu produkcyjnego z uwzględnieniem wszystkich etapów uwzględnionych w analizie (źródło: opracowanie autorskie)

quantities is returned to the raw gas inlet. If the water is to be subjected to a recycling process then it is directed to a desorption column filled with plastic packing. Before the water is recycled and returned to the absorption column, it is cooled to a temperature at which a significant difference between the solubility of carbon dioxide and methane may be achieved.

The geographic scope of the analysis ranges from local to national. Some of the data are specific for the locality (e.g. raw material acquisition), while others are of the national type. Table 2 shows the time, geographic, and technological scope of the analyses carried out for the main product as well as the width and depth of the system.

At the second stage of the life cycle analysis, the data related to inputs from, and outputs to, the environment are gathered and analysed (which is generally referred to as "life cycle inventory" or LCI). According to Polish Standard PN-EN ISO 14040:2006, the data for individual unit processes that take place within the product system boundaries may be classified in the following types:

- input data: energy input, raw material input, auxiliary data, and others,
- output data: products, intermediate products, and wastes,

gazynującego. Gaz, który zawiera jeszcze pewne, możliwe do odzyskania, ilości metanu jest zawracany ponownie do wlotu gazu surowego. Jeśli woda ma być poddana procesowi recyklingu, to jest ona przenoszona do kolumny desorpcyjnej wypełnionej uszczelnieniem wykonanym z tworzywa sztucznego. Woda schładzana jest do temperatury, w której możliwe będzie osiągnięcie znacznej różnicy rozpuszczalności pomiędzy ditlenkiem węgla, a metanem zanim zostanie ona poddana procesowi recyklingu i zwrócona do kolumny absorpcyjnej [11, 12].

Zakres geograficzny analizy kształtuje się od lokalnego do krajowego. Część danych ma charakter miejscowo specyficzny (np. pozyskanie surowca), natomiast inne dane mają charakter ogólnokrajowy. W tabeli 2 przedstawiono czasowy, geograficzny i technologiczny zakres prowadzonych analiz odnoszący się do wyrobu głównego oraz szerokość i głębokość systemu.

W drugim etapie analizy LCA gromadzone i analizowane są dane odnoszące się do wejść i wyjść do/ze środowiska (LCI). Dane do poszczególnych procesów jednostkowych będących w granicach systemu wyrobu można, zgodnie z normą PN-EN ISO 14040:2006, zaliczyć do następujących typów [5]:

- dane wejściowe: nakłady energetyczne, nakłady surowcowe, dane pomocnicze oraz inne,

Table 2. The time, geographic and technological scope of the analyses carried out as well as the width and depth of the system

Tabela 2. Czasowy, geograficzny i technologiczny zakres prowadzonych analiz oraz szerokość i głębokość systemu

Product/wyrób	Production and use of biogas as an engine fuel/produkcja oraz wykorzystanie biogazu jako paliwa silnikowego
System width/szerokość systemu	Cradle-to-grave/„od kołyski do grobu” – od etapu hodowli roślin do spalania paliwa w silniku spalinowym
System depth/głębokość systemu	Up to the 2 <sup>nd</sup> level/maksymalnie do 2 poziomu
Time scope of the product system/zakres czasowy (systemu wyrobu)	15 years/15 lat
Time scope of the data/zakres czasowy (danych)	Up to 5 years/do 5 lat
Geographic scope/zakres geograficzny	Local to national/lokalny do krajowego
Technological scope/zakres technologiczny	Modern technologies/nowoczesne technologie



- releases to air, water, and land,
- other environmental aspects.

In the LCI, the input data, i.e. those concerning materials and energy, and the output data, i.e. those concerning the main products and by-products, wastes, and environmental releases (see Table 3) are gathered in the form of inventory tables where the consumption of natural raw materials and intermediate products and the output of wastes generated are presented in quantitative form. An important part of the data gathering process is the verification of completeness and quality of the data acquired.

- dane wyjściowe: produkty, półprodukty oraz odpady,
- emisje zanieczyszczeń do powietrza, wody i gleby,
- inne aspekty środowiskowe.

Dane wejściowe (LCI), czyli materiały i energia, oraz wyjściowe, czyli produkty główne, produkty uboczne, odpady i emisje zanieczyszczeń (tabela 3) są gromadzone w postaci tabel inwentarzowych prezentujących ilościowe ujęcie zużywanych surowców naturalnych, półproduktów oraz generowanych odpadów. Ważnym etapem gromadzenia danych jest sprawdzenie ich kompletności oraz jakości pozyskiwanych danych.

Table 3. Input and output data for the process of generation of biogas of 98% methane content  
Tabela 3. Dane wejściowe i wyjściowe w procesie wytwarzania biogazu o 98% zawartości metanu

Input data "from nature"/dane wejściowe z „natury”	
Water/woda	For the gas treatment process/do procesu oczyszczania
Input data "from technosphere" (materials, fuels, electricity, and heat)/dane wejściowe z „technosfery” (materiały, paliwa, energia elektryczna i ciepło)	
Main substrate/substrat główny	Liquid manure/gnojowica
Fuel consumption/zużycie paliw	Consumption of fuels at raw material handling/zużycie paliw podczas transportu surowca
Electricity consumption/zużycie energii elektrycznej	Consumption of electricity by process installations (at biogas generation and treatment processes)/zużycie energii elektrycznej w instalacji (wytwarzanie biogazu oraz proces oczyszczania)
Heat consumption/zużycie energii cieplnej	Consumption of heat used to maintain appropriate temperature in the fermentation tank/zużycie energii cieplnej do utrzymania odpowiedniej temperatury w komorze fermentacyjnej
Output data/dane wyjściowe	
Main product/produkt główny	Biogas of 98% methane content/biogaz o 98% zawartości metanu
Wastes and environmental releases/odpady i emisje	
Solid waste/odpady stałe	Fermentation sludge, used as a fertiliser (avoided production of ammonium nitrate and nitrogenous fertilisers)/osad pofermentacyjny - stosowany jako nawóz (tzw. avoided products czyli uniknięta produkcja saletry amonowej i nawozów azotowych)
Releases to air (atmospheric emissions)/emisje do powietrza	CH <sub>4</sub>
	CO <sub>2</sub>
	NO <sub>x</sub>
Releases to water/emisje do wody	Wastewater generated at the biogas generation process/woda odpadowa z procesu oczyszczania biogazu

Pursuant to provisions of Polish Standard PN-EN ISO 14044:2006, the data selection process should be carried out with maximum care and diligence. The most valuable and desirable data are those obtained from analyst's own research work. If such data are unavailable, data found in literature or in the existing databases may be allowed, according to the Standard.

### 3. Life Cycle Impact Assessment

The goal of the life cycle impact assessment (LCIA) stage is to determine the environmental interrelations between all the inputs and outputs covered by the LCA scope and to estimate their environmental impact in quantitative terms.

At this stage, the LCI results are classified in appropriate impact categories, based on the environmental priorities adopted, with the local and regional constraints being taken into account. The impact categories are given specific weights depending on the degree of environmental impact of a given environmental factor. The LCIA consists of two groups of elements (PN-EN ISO 14044:2006):

### 3. Ocena wpływu cyklu istnienia

Celem etapu oceny wpływu cyklu istnienia jest określenie zależności środowiskowych wszystkich wejść i wyjść objętych zakresem badań LCA oraz oszacowania wielkości ich wpływu na środowisko.

Na tym etapie dokonuje się klasyfikacji wyników LCI do odpowiednich kategorii wpływu opierając się na przyjętych priorytetach środowiskowych, z uwzględnieniem uwarunkowań lokalnych i regionalnych. Kategoriom wpływu przypisuje się określone wagi w zależności od stopnia wpływu na środowisko danego aspektu środowiskowego. LCIA składa się z dwu grup elementów [6]:

- obowiązkowych, do których zalicza się:
  - wybór kategorii wpływu, wskaźników kategorii i modeli charakteryzowania,
  - przypisanie wyników LCI do poszczególnych kategorii wpływu (klasyfikacja),
  - obliczenie wartości wskaźnika kategorii (charakteryzowanie),

- obligatory, which include:
  - selection of impact categories, category indicators, and characterisation models,
  - assignment of LCI results to specific impact categories (classification),
  - calculation of category indicator values (characterisation),
- optional, which include:
  - normalisation,
  - grouping,
  - weighting,
  - analysing of data quality.

When impact categories are selected, the goal and scope of the analysis should be considered. Some analysis methods make it possible to present the results in the form of a single point represented by a numerical value; for others, the results are presented in the form of indicators separately characterised for each category. Pursuant to standards of the ISO 14040 series, however, the presentation of results in the form of a single value should be avoided and the use of methods providing a broader spectrum of possibilities to carry out the analysis is suggested. One of such methods is that named Eco-Indicator 99. In this method, 11 impact categories are distinguished [13]:

- Carcinogens,
- Respiratory organics,
- Respiratory inorganics,
- Climate change,
- Radiation,
- Ozone layer depletion,
- Ecotoxicity,
- Acidification/eutrophication,
- Minerals,
- Fossil fuels,
- Land use.

At the life cycle assessment of the generation and use of biogas as an engine fuel, the category related to the impact on climate changes will be of the greatest importance (Table 4). The significance of the above categories is chiefly related to the emission of greenhouse gases and other harmful substances during both biogas generation and combustion of the biogas in an engine.

The factors that have the highest impact on the climate change category are the methane loss during the transport of raw material to process installations and during the biogas generation process (about 3% in total) as well as the carbon dioxide generated during biomethane combustion. Methane is one of the “greenhouse gases,” which cause climate changes generally named “greenhouse effect.” The influence of methane on enhancement of the greenhouse effect is estimated as being 21 times as high as that of carbon dioxide, according to various experts’ opinions.

For other impact categories, such as acidification or eutrophication, the environmental impact of biogas is compensated to a significant extent by the use of fermentation sludge as a fertiliser and, in consequence, by avoiding the production of ammonium nitrate and other nitrogenous fer-

- opcjonalnych, do których zalicza się:
  - normalizowanie,
  - grupowanie,
  - ważenie,
  - analiza jakości danych.

Przy wyborze kategorii wpływu należy wziąć pod uwagę cel i zakres analizy. Jedne metody analizy pozwalają na zaprezentowanie wyników w postaci jednego punktu wyrażonego wartością liczbową, inne zaś umożliwiają prezentację wyników w postaci wskaźników scharakteryzowanych dla każdej kategorii z osobna. Jednak normy ISO serii 14040 nakazują unikanie prezentacji wyników w postaci tylko jednej wartości oraz sugerują zastosowanie metod dających szersze spektrum możliwości analizy. Jedną z takich metod jest metoda Eco-Indicator 99. W metodzie tej wyróżniamy 11 kategorii wpływu [13]:

- czynniki rakotwórcze,
- wpływ na układ oddechowy – związki organiczne,
- wpływ na układ oddechowy – związki nieorganiczne,
- zmiany klimatu,
- promieniowanie,
- zubożenie warstwy ozonowej,
- ekotoksyczność,
- zakwaszenie/eutrofizacja,
- surowce mineralne,
- wydobycie paliw kopalnych,
- zużycie terenu.

W przypadku oceny cyklu istnienia wytwarzania i użytkowania biogazu jako paliwa silnikowego największe znaczenie będzie miała kategoria wpływ na zmiany klimatu (tabela 4) [14]. Znaczenie powyższych kategorii jest głównie związane z emisją gazów cieplarnianych i innych substancji szkodliwych zarówno podczas wytwarzania biogazu, jak również podczas jego spalania w silniku.

Czynnikiem, które mają największy wpływ na kategorię zmian klimatu są straty metanu podczas transportu surowca do instalacji oraz wytwarzania biogazu (około 3%) jak również ditlenek węgla powstający podczas spalania biometanu. Metan należy do grupy tzw. gazów cieplarnianych, które wpływają na zmiany klimatu, określane mianem efektu cieplarnianego. Według różnych ocen, wpływ metanu na pogłębianie efektu cieplarnianego jest 21-krotnie wyższy w porównaniu z ditlenkiem węgla.

W przypadku innych kategorii wpływu, takich, jak np. zakwaszenie czy eutrofizacja wpływ biogazu na środowisko jest w znacznym stopniu rekompensowany dzięki zastosowaniu osadu pofermentacyjnego jako nawozu i uniknięcie w ten sposób produkcji saletry amonowej i nawozów azotowych. Produkcja nawozów mineralnych wymaga dużych nakładów energii pochodzącej z paliw kopalnych, a ich stosowanie powoduje znaczne emisje związków azotu wpływając tym samym na proces eutrofizacji, zakwaszenia oraz na uszkodzenie warstwy ozonowej.

#### 4. Interpretacja wyników LCA

Interpretacja jest ostatnią fazą analizy LCA i towarzyszy wszystkim omówionym etapom począwszy od określenia celu i zakresu, aż po interpretację wyników oceny cyklu istnienia.

Table 4. LCIA impact categories

Tabela 4. Kategorie wpływu LCIA

Impact category/kategoria wpływu	LCI data/dane LCI	Indicator/wskaźnik
Climate change/zmiany klimatu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)</li> <li>- Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>)</li> <li>- Methane (CH<sub>4</sub>)</li> </ul>	Conversion of LCI data into carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) equivalent/ przeliczenie danych LCI na ekwiwalent ditlenku węgla (CO <sub>2</sub> )
Acidification/zakwaszenie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sulphur oxides (SO<sub>x</sub>)</li> <li>- Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>)</li> <li>- Hydrochloric acid (HCl)</li> <li>- Ammonia (NH<sub>3</sub>)</li> </ul>	Conversion of LCI data into hydrogen ion (H <sup>+</sup> ) equivalent/ przeliczenie danych LCI na ekwiwalent jonów wodorowych H <sup>+</sup>
Eutrophication/eutrofizacja	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Phosphates (PO<sub>4</sub>)</li> <li>- Nitrogen monoxide (NO)</li> <li>- Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>)</li> <li>- Nitrates</li> <li>- Ammonia (NH<sub>3</sub>)</li> </ul>	Conversion of LCI data into phosphate (PO <sub>4</sub> ) equivalent/ przeliczenie danych LCI na ekwiwalent fosforanów (PO <sub>4</sub> )

tilisers. The production of mineral fertilisers requires high energy input derived from fossil fuels and the use of such fertilisers causes significant release of nitrogen compounds and thus enhances the acidification and eutrophication processes and the ozone layer depletion.

#### 4. Interpretation of the LCA results

The interpretation is the last phase of the LCA process; it accompanies all the process stages discussed above, from the goal and scope definition right to the life cycle interpretation. The basic objective of the interpretation phase is to review and examine the results and to check their completeness, coherence, and usability from the point of view of the assumed goals and scope of the analysis. The last phase of the LCA process helps to formulate final conclusions, to clarify the constraints, and to formulate guidelines aimed at a reduction of environmental impacts.

The LCA is an iteration technique; therefore, the interpretation of the analysis results obtained at the current life cycle assessment stage may have an influence on changing the analysis conditions originally assumed. The results are presented in the form of a report. Based on the information provided in the report, decisions are taken to minimise the harmful impact of the activities conducted and to choose the best engineering solutions aimed at improvement of the environmental quality of the product.

#### 5. Conclusions

The fuel industry is one of the greatest emitters of greenhouse gases and other substances that are environmentally harmful. It has a huge environmental impact. A chance to reduce this negative impact is the searching for new energy carriers that would be more environmentally sound than fossil fuels. The agricultural biogas used as an engine fuel becomes now an energy carrier of this kind.

The rising level of social consciousness and increasingly stringent environmental protection requirements result in growing interest in the technologies that might reduce negative environmental impacts. A useful aid in the selection and modification of the technologies is the life cycle assessment (LCA) method; thanks to its comprehensive nature, it enables full-scope assessment of the environmental impact of the entire production process starting from raw material acquisi-

Podstawowym celem interpretacji jest przegląd i rozważanie wyników oraz sprawdzenie ich kompletności, spójności i przydatności z punktu widzenia założonego celu i zakresu. Ostatnia faza LCA służy sformułowaniu ostatecznych wniosków, wyjaśnieniu ograniczeń oraz przedstawieniu wytycznych służących zmniejszaniu skutków środowiskowych [5].

LCA jako technika iteracyjna powoduje, że od interpretacji rezultatów prowadzonych badań, uzyskanych w tej fazie oceny cyklu istnienia, zależy ewentualna zmiana wstępnych warunków. Wyniki są przedstawiane w formie raportu. Na podstawie zamieszczonych w raporcie informacji podejmowane są decyzje mające na celu minimalizację negatywnego oddziaływania działalności, a także rozstrzygnięcia odnośnie rozwiązań technologicznych mających na celu poprawę jakości środowiskowej wyrobu.

#### 5. Wnioski

Z wytwarzaniem i wykorzystaniem paliw jest związana duża emisja gazów cieplarnianych i substancji szkodliwych do środowiska. Szansą na ograniczenie tego negatywnego wpływu jest poszukiwanie nowych, bardziej przyjaznych środowisku niż paliwa kopalne, nośników energii. Takim nośnikiem staje się biogaz rolniczy wykorzystywany jako paliwo silnikowe.

Rosnąca świadomość społeczna oraz zaostrzenie wymagań prawnych w kwestiach ochrony środowiska powodują wzrost zainteresowania metodami mogącymi spowodować zmniejszenie niekorzystnego oddziaływania na środowisko. Pomocną przy wyborze i modyfikacji metody jest ocena cyklu istnienia LCA, która, ze względu na swój kompleksowy charakter, pozwala na pełną ocenę wpływu na środowisko całego procesu wytwórczego poczynając od pozyskania surowców, aż do końcowego zagospodarowania odpadów powstałych w wyniku użytkowania wyrobu. W przypadku wytwarzania biogazu rolniczego stosowanego jako paliwo silnikowe ocenie LCA poddano wytwarzanie biogazu, jego oczyszczanie oraz użytkowanie jako paliwo silnikowe. Założono również, iż osad pofermentacyjny stanowiący odpad poprodukcyjny może być wykorzystany jako nawóz stosowany do celów rolniczych.

Zastosowanie metody LCA niesie ze sobą szereg korzyści nie tylko środowiskowych, ale także ekonomicznych.

tion, right to the final management of the wastes generated in result of the product use. When analysing the generation of agricultural biogas used as an engine fuel, a decision was taken that the LCA should cover the biogas generation, purification, and use as an engine fuel. An assumption was also made that the fermentation sludge being process waste may be utilised as a fertiliser for agricultural purposes.

The application of the LCA method brings numerous advantages, which include not only environmental but also economic benefits. This method may prove to be useful for the taking of investment decisions aimed at minimising the environmental impact of a process system. The LCA results may provide good grounds for the development of technologies that would satisfy all environmental protection requirements.

Metoda ta może okazać się użyteczna przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnych pozwalających na zminimalizowanie wpływu działalności instalacji na środowisko. Na podstawie wyników oceny możliwe jest opracowanie technologii, które będą spełniały wszelkie wymogi ochrony środowiska.

## Bibliography/Literatura

- [1] Biernat K.: Bilans energetyczny biogazu w Polsce – metody wykorzystania nagromadzonej w surowcach energii, sporządzanie bilansu energetycznego, planowanie inwestycji pod kątem odbiorców energii, efektywne wykorzystanie zgromadzonego potencjału (Biogas energy balance in Poland. Methods of utilisation of the energy accumulated in raw materials, compiling of energy balance, planning of investment projects in respect of the needs of energy consumers, effective use of the potential accumulated). Conference Proceedings.
- [2] Cebula J., Latoch L.: Biogazownie w gospodarstwach rolnohodowlanych; trendy i kierunki rozwoju (Biogas plants in plant-growing and stock-raising farms; development directions and trends). Institute of Water and Wastewater Engineering at the Silesian University of Technology.
- [3] Goedkoop M., Spriensma R.: The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Assessment. Methodology report. PRÉ Consultants B.V., Netherlands, 2000.
- [4] Fava J.: A Technical Framework for Life-Cycle Assessment, 1991 SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education, Washington.
- [5] Kozmana M.: Biogaz – polska żyła złota? (Biogas: a Polish goldmine?). "Rzeczpospolita".
- [6] Lewandowski W.: Proekologiczne odnawialne źródła energii (Environmentally sound renewable energy sources). WNT, Warszawa, 2006.
- [7] Kulczycka, J.: Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (Ecological life cycle assessment of production processes). PWN, Warszawa, 2001.
- [8] Lewandowska, A.: LCA Środowiskowa ocena cyklu życia produktu na przykładzie typów pomp przemysłowych (LCA: Life cycle assessment of a product, with taking industrial pumps as an example). The Academy of Economics in Poznań, Poznań, 2006.
- [9] Lindfors, L. G.: Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment. Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 1995.
- [10] Oniszk-Popławska, A., Owsik, M., Wiśniewski, G.: Produkcja i wykorzystanie biogazu rolniczego (Production and use of agricultural biogas). ECbrec, 2003.
- [11] Skorek J., Kalina J.: Gazowe układy kogeneracyjne (Gas-fired heat and power cogeneration systems). WNT, Warszawa, 2005.
- [12] Institut für Energetik und Umwelt gGmbH: Biogas: production and use.
- [13] Programme entitled Innowacyjna energetyka. Rolnictwo ekologiczne (Innovative power industry. Ecological farming). Stowarzyszenie Energii Odnawialnej (Renewable Energy Association), Polska Izba Biomasy (Polish Chamber of Biomass), Polska Izba Gospodarcza Energii Odnawialnej (Polish Chamber of Commerce for Renewable Energy), Stowarzyszenie Niezależnych Wytwórców Energii Skojarzonej (Association of Independent Suppliers of Cogenerated Heat and Power).
- [14] LCA 101: Introduction to LCA. U.S. Environmental Protection Agency and Science.
- [15] Applications International Corporation. LCAccess – LCA 101, 2001. Scientific Applications International Corporation (SAIC): Life Cycle Assessment – Principles and Practice. 2006.
- [16] Polish Standard PN-EN ISO 14040:2006. Zarządzanie Środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura (Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework). PKN, Warszawa, 2006.
- [17] Polish Standard PN-EN ISO 14044:2006. Zarządzanie Środowiskowe. Ocena cyklu życia. Wymagania i wytyczne (Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines). PKN, Warszawa, 2006.
- [18] <http://www.e-biopaliwa.pl/bioinformacje/technologie.html>.
- [19] <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.htm>.
- [20] <http://www.biogaz.com.pl/index.php/home/66-substraty>.

Dr inż. Krzysztof Biernat – Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego

Mgr Izabela Samson-Bręk – Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Warszawa.

Dr inż. Wojciech Gis – Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa.