

ANALIZA LOKALIZACJI BIOGAZOWNI METODAMI ANALITYC HIERARCHY PROCESS (AHP) I TAKSONOMII NUMERYCZNEJ –PORÓWNANIE METOD

Alicja STOLTMANN¹, Paweł BUĆKO²

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 12-54 e-mail: alicja.stoltmann@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 17-81 e-mail: pawel.bucko@pg.gda.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia porównanie wielokryterialnej metody Analytic Hierarchy Process (AHP) oraz taksonomii numerycznej na podstawie analizy wyboru lokalizacji biogazowni. Wykazano, że analiza lokalizacji biogazowni metodą AHP oraz metodą taksonomii numerycznej wskazuje jednakowe uporządkowanie rozpatrywanych lokalizacji, przy jednocześnie różnych wagach kryteriów wpływających na podjęcie decyzji. W artykule przedstawiono również badanie wrażliwości obu metod na zmianę liczby kryteriów i wariantów decyzyjnych. W metodzie AHP, po redukcji liczby kryteriów, wskazano to samo kryterium jako posiadające największy wpływ na wybór lokalizacji biogazowni. Metoda taksonomii numerycznej, po redukcji kryteriów, wskazała, że kryteria zmieniły swoje znaczenie względem analizowanej lokalizacji. Z tego względu metoda taksonomii numerycznej okazała się wrażliwą na zmianę liczby kryteriów.

Słowa kluczowe: Biogazownia, bioenergetyka, metody analizy wielokryterialnej.

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Polska zobowiązana jest do spełnienia wymagań polityki energetycznej (realizującej wymagania dyrektyw unijnych) mającej na celu redukcję emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. W związku z tym opracowano strategię rozwoju sektora energetycznego zawartą w dokumencie Polityka Energetyczna Polski do 2030 roku [1]. W dokumencie założono, że udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w całkowitej produkcji energii będzie wynosić 15% do 2020 roku. Inwestycje w OZE przynoszą korzyści zarówno gospodarcze, jak i środowiskowe [2]. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 roku Prawo energetyczne definiuje OZE jako takie, które wykorzystuje w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu [3]. Ze względu na szczególne uwarunkowania, Polska spośród państw UE może stać się liderem w produkcji energii pochodzącej z biogazowni, w szczególności z biogazowni produkującej energię z substratów rolniczych [4], [5]. Biogazownie zaliczane są do źródeł generacji rozproszonej energii elektrycznej i ciepła [6]. Obecnie, ośrodki badawcze w Polsce badają skuteczne sposoby uzyskiwania, wzbogacania i wykorzystywania biogazu [7]. Biogaz wykorzystywany jest do produkcji energii elektrycznej, ciepła, chłodu, do produkcji biometanu wprowadzanego do sieci gazowej lub do napędu pojazdów.

W wyniku wprowadzenia systemu wsparcia dla instalacji wykorzystujących odnawialne źródła energii, w tym biogaz, moc zainstalowana w instalacjach biogazowych w Polsce, wg danych URE [8], w latach 2006-2016 charakteryzuje się tendencją wzrostową.

Pomimo wzrostu zainteresowania wytwórców energią wytwarzaną w instalacjach wykorzystujących biogaz, stanowił on zaledwie 5% całkowitej produkcji energii elektrycznej pochodzącej z instalacji zaliczanych do odnawialnych źródeł energii w 2016 roku, według danych URE [10].

Charakter biogazowni ustalany jest na etapie inwestycyjnym ze względu na konieczność określenia docelowej lokalizacji obiektów, planowanej mocy i technologii instalacji oraz sposobów zagospodarowania wyprodukowanego ciepła. Wymagania dotyczące surowca do przetworzenia w procesie biofermentacji dotyczą ilości, rodzaju, kosztów oraz logistyki dostaw. Zakłada się, że ze względu na koszty transportu, źródło biomasy nie powinno być położone w większej odległości niż 20 km od biogazowni [9]. Zagrożeniem dla inwestycji w biogazownie może być brak akceptacji społecznej oraz problem z występowaniem ewentualnych, ponadnormatywnych uciążliwości. Dlatego też proces inwestycyjny biogazowni powinien być poprzedzony dokładną analizą warunków koniecznych do spełnienia w trakcie trwania fazy inwestycyjnej, fazy budowy oraz fazy eksploatacyjnej. Warunki te, inaczej określane jako kryteria, związane są z wymaganiami środowiskowymi, ekonomicznymi, technicznymi, prawnymi oraz społecznymi [10]. Narzędziem pozwalającym na uwzględnienie jednocześnie wielu, często sprzecznych lub wzajemnie wykluczających się, wymagań są metody analizy wielokryterialnej (z ang. Multi-criteria decision analysis – MCDA), wśród których należy wyróżnić metodę analizy hierarchicznej (z ang. Analytic hierarchy proces – AHP) oraz metodę taksonomii numerycznej. W niniejszym opracowaniu dokonano porównania obu metod na przykładzie lokalizacji biogazowni.

Porównywane metody (AHP i taksonomii numerycznej) są metodami rankingu, tzn. takimi które wynik analizy przedstawiają za pomocą rankingu rozpatrywanych wariantów decyzyjnych. Metoda AHP bazuje na porównaniu parami kryteriów według dziewięciostopniowej skali porównań, zaś metoda taksonomii numerycznej wykorzystuje odległość od rozwiązania idealnego, tzw. wzorca. Poniżej streszczono główne założenia obu metod.

1.2. Przegląd literatury

Wybór parametrów oraz lokalizacji biogazowni jest tematem podejmowanym w literaturze. W [11] scharakteryzowano modelowy tok postępowania inwestorskiego podczas budowy biogazowni rolniczej. Zauważono, że w Polsce nie występuje ujednolicony tok postępowania inwestorskiego i zależy on indywidualnie od danego projektu. W [12] dokonano porównania różnych typów oraz rozmiarów biogazowni rolniczych pod względem opłacalności wytwarzania biogazu. Zwrócono uwagę na konieczność skorzystania z dofinansowania, z zewnętrznego źródła finansowania na poziomie 60-70% w celu poprawy opłacalności inwestycji. Ze względu na złożony charakter zagadnienia lokalizacyjnego źródeł wytwórczych energii elektrycznej i ciepła analitycy wspomagają się metodami analizy wielokryterialnej w poszukiwaniu najlepszego rozwiązania danego problemu. Dla przykładu, wielokryterialne metody PROMETHEE [13] i VIKOR [14] wykorzystano do wyznaczenia najlepszego scenariusza rozwoju OZE. Efektem analizy jest wybór scenariuszy zakładających znaczny udział energii pochodzącej z biogazu i biomasy. W [15] wykorzystano metodę ELECTRE TRI do porównania wydajności 41 biogazowni rolniczych. W [16] za pomocą metod MAGBETH i rozmytej postaci metody AHP stworzono hierarchię 15 kryteriów wpływających na lokalizację odnawialnych źródeł energii, w tym biomasy, oraz wytypowano ranking źródeł energii elektrycznej, wskazując że dla obszaru Turcji, w przypadku obu metod ranking źródeł był taki sam. Z powyższego przeglądu literatury można wywnioskować, że metody analiz wielokryterialnych są wykorzystywane do analiz związanych z wykorzystaniem biogazu, w sektorze wytwórczym.

2. OPIS METOD

2.1. Metoda AHP

W celu rozwiązania problemu natury wielokryterialnej, w wielu dziedzinach analitycy najczęściej korzystają z metody AHP, która została opracowana przez T. L. Saaty'ego w 1980 roku [17]. Głównym założeniem metody jest porównanie parami kryteriów i wariantów decyzyjnych na podstawie dziewięciostopniowej skali porównań, w której preferencje decydenta odpowiadają konkretnym wartościom liczbowym [17].

Porównania zostają umieszczone w macierzy porównań parami (**A**). Porównania dokonuje się poprzez wskazanie wpływu elementów z lewej strony macierzy (*i*) na elementy znajdujące się na górze macierzy (*j*) otrzymując wynik porównania a_{ij} . Poniżej głównej diagonalnej znajdują się odwrotności porównań parami. Wzór na macierz **A** zamieszczono poniżej:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Składowe wektora własnego macierzy **A** wyznaczają wektor priorytetów (**w**) kryteriów:

$$\mathbf{w} = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} \quad (2)$$

Zaletą metody AHP jest możliwość wyznaczenia konsekwencji i spójności porównań parami, poprzez wyznaczenie współczynnika zgodności CR. W celu uznania wyników za zgodne współczynnik CR nie może przekroczyć

0,10, w przeciwnym wypadku porównania należy uznać za niezgodne.

2.2. Metoda taksonomii numerycznej

Taksonomia numeryczna wywodzi się z nauk biologicznych, gdzie była wykorzystywana do klasyfikacji organizmów żywych na podstawie ich cech. Jest stosowana do opisu zjawisk ekonomiczno-przyrodniczych oraz pozwala ustalić relacje między badanymi obiektami redukując nadmiar informacji oraz porządkując je. Zadania taksonomiczne mogą prowadzić do porządkowania, grupowania lub wyboru np. obiektów. Podstawa metody jest utworzenie macierzy danych **X**, która zawiera zbiór obiektów $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ (lokalizacje) oraz zbiór cech $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ (kryteria). Macierz **X** przedstawiono poniżej:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \dots & X_m & o_1 \\ x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,m} & o_2 \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,m} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,m} & o_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie: x_{ij} -elementy macierzy danych **X**, wartość X_j -tej cechy dla o_i -tego obiektu ($i = 1, \dots, n$ oraz $j = 1, \dots, m$).

W celu dokonania rankingu obiektów, należy dokonać normowania cech, tak aby były one ze sobą porównywalne oraz nadać im wagi aby uzyskać hierarchię ważności cech. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie macierzy odległości obiektów od tzw. obiektu wzorcowego za pomocą rzutu ortogonalnego punktu na prostą wyznaczoną przez współrzędne wzorca.

3. UWARUNKOWANIA LOKALIZACYJNE BIOGAZOWNI

Dobór lokalizacji biogazowni decyduje o powodzeniu realizacji inwestycji oraz jej opłacalności ekonomicznej. Na potrzeby niniejszej analizy przyjęto 8 kryteriów decydujących o ocenie danej lokalizacji. Kryterium K1 związane jest z dostępnością i koniecznością zakupu surowców pierwotnych, z których produkowany jest biogaz. Kryteria K2 i K3 związane są kolejno z dostępem do sieci elektroenergetycznej średniego napięcia oraz dostępnością do sieci ciepłowniczej. Kryterium K4 określa kompletność dokumentów planistycznych związanych z obszarem biogazowni, dotyczy umieszczenia biogazowni w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego oraz możliwość nabycia praw do dysponowania terenem na cele inwestycyjne. Odległość biogazowni od terenów narażonych na hałas, zagrożenie uciążliwym zapachem oraz tereny ochrony wód są określone w kryterium K5. Odległość od terenów do zagospodarowania resztek pofermentacyjnych określono w kryterium K6. Ostatnie dwa kryteria, K7 i K8, dotyczą mocy instalacji kolejno dla energii elektrycznej i ciepła. Analizie poddano 3 potencjalne lokalizacje biogazowni rolniczych, których charakterystykę względem kryteriów przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Charakterystyka lokalizacji względem kryteriów

Numer kryterium	Lokalizacja 1	Lokalizacja 2	Lokalizacja 3
K1	pełny dostęp	konieczność dokupu 30% substratu	konieczność substratu 100%
K2	do 5 km	5-10 km	do 2 km
K3	powyżej 5 km	brak	powyżej 10 km
K4	komplet dokumentów	komplet dokumentów	podpisano wstępną umowę z właścicielem działki ewidencyjnej
K5	0,5 km	powyżej 1 km	100 m
K6	do 1km	powyżej 1km	powyżej 5km
K7	10000 kW	7876,116 kW	9000 kW
K8	9600 kW	8199,36 kW	9300 kW

4. WYNIKI ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ

Pierwszym krokiem w celu uszeregowania lokalizacji jest dobór kryteriów oraz wskazanie ich hierarchii. Uszeregowanie kryteriów determinujących lokalizację biogazowni nie jest takie same w przypadku zastosowania metody AHP oraz taksonomii numerycznej. Metodą AHP wykazano, że przeważającym kryterium jest jak najmniejsza odległość biogazowni od terenów narażonych na hałas, zagrożenie uciążliwym zapachem oraz tereny ochrony wód, zaś metoda taksonomii numerycznej wykazała, że najważniejszym kryterium jest dostęp do sieci ciepłowniczej. W rzeczywistości, bliska odległość do sieci ciepłowniczej nie jest kryterium decydującym o powodzeniu realizacji inwestycji w biogazownię. W przypadku kryteriów charakteryzujących się najmniejszym wpływem na decyzję o lokalizacji biogazowni metody także wskazały różne kryteria. Dla metody AHP najmniej wpływowe okazało się kryterium dotyczące odległości od terenów do zagospodarowania resztek pofermentacyjnych, zaś dla metody taksonomii numerycznej najmniej wpływowe okazały się wysokości mocy instalacji. Omówione różnice przedstawiono na rysunku 1.

Jak wspomniano, metoda AHP umożliwia wyznaczenie współczynnika zgodności CR, który w analizowanym przypadku wyniósł 0,093 (poniżej 0,1), oznaczając że porównanie parami jest konsekwentne i spójne. W przypadku taksonomii numerycznej nie ma możliwości obiektywnego sprawdzenia czy wyniki, które otrzymano są spójne. Bez względu na różnicę w wyznaczonych wagach kryteriów obie metody wskazały, że preferowaną lokalizacją jest lokalizacja 1. W przypadku metody AHP różnica w ocenie między lokalizacją L1 a drugą w rankingu lokalizacją L2 jest większa niż w metodzie taksonomii numerycznej. Kolejność wariantów jest taka sama.

5. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI

W celu porównania metody AHP oraz taksonomii numerycznej analizowano wrażliwość metod na zmianę liczby wariantów decyzyjnych i kryteriów. Analiza wrażliwości umożliwia sprawdzenie wpływu zmiany liczby kryteriów na wybór kryteriów o szczególnym znaczeniu oraz zmiany liczby wariantów decyzyjnych na ranking lokalizacji. W celu zbadania wrażliwości obu metod na zmianę liczby kryteriów dokonano powtórnie analizy wskazania rankingu lokalizacji biogazowni przy założeniach:

- kryteria K2 i K3 zostaje zastąpione kryterium K2* i oznacza zarówno dostęp do sieci elektroenergetycznej średniego napięcia oraz sieci ciepłowniczej
- kryteria K7 i K8 zostaje zastąpione kryterium K7* oznaczające moc instalacji, obejmującą łącznie produkcję energii elektrycznej i ciepła.

Wykazano, że w przypadku metody AHP, redukcja liczby kryteriów (obejmujących zbliżone cechy) nie ma wpływu na ostateczny ranking kryteriów. Zmianie ulegają jednak wartości wag poszczególnych kryteriów. W przypadku taksonomii numerycznej redukcja tych samych kryteriów spowodowała znaczącą zmianę w ich rankingu, wskazując kryterium K6 (odległość od terenów do zagospodarowania resztek pofermentacyjnych) jako najistotniejsze, rysunek 1.

W przypadku obu metod, zmiana liczby oraz wag kryteriów nie wpłynęła na uszeregowanie lokalizacji.

W celu zbadania wrażliwości metod na zmianę liczby wariantów dodano dodatkową, czwartą, lokalizację biogazowni. Proponowana biogazownia znajduje się w odległości powyżej 10 km od sieci elektroenergetycznej średniego napięcia oraz w odległości do 5 km od sieci ciepłowniczej. W procesie produkcyjnym należy dokupić 60% kiszonki. Powyżej 1 km znajdują się tereny wrażliwe ze względu na hałas, zasady higieny lub ochronę wód. Moc biogazowni przewidywana jest na poziomie ok. 8500 kW e oraz 8750 kW t.

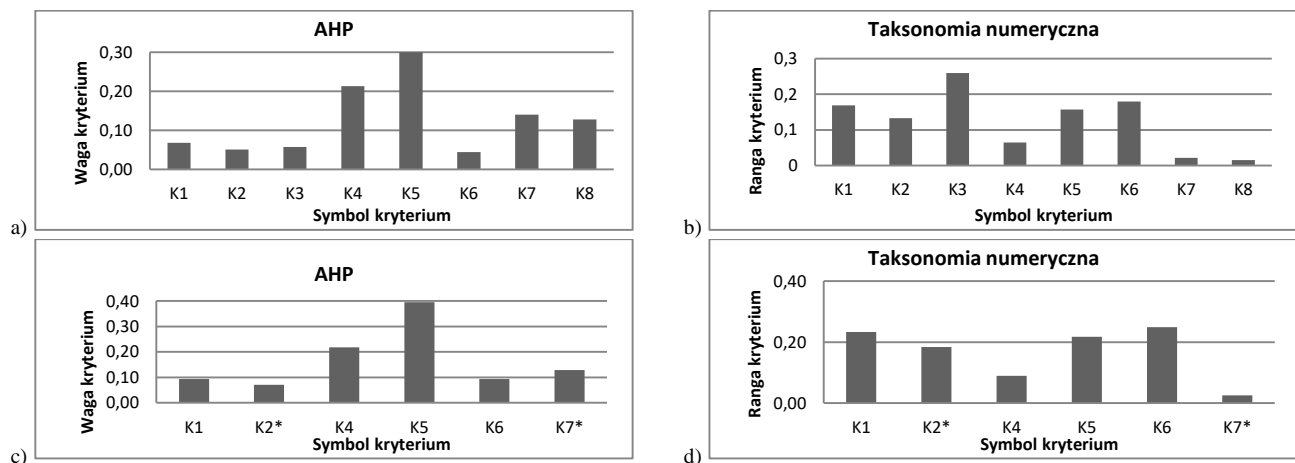
W wyniku powtórnie przeprowadzonej analizy wykazano, że obie metody nie są wrażliwe na dodanie dodatkowego wariantu decyzyjnego w postaci czwartej lokalizacji biogazowni. Oznacza to, że uszeregowanie pierwszych trzech lokalizacji pozostało bez zmian. Wyniki przedstawiono w tablicy 2. Warto zwrócić uwagę, że w metodzie AHP dodany wariant L4 został wyżej oceniony od wariantu L2 (inaczej niż w przypadku taksonomii numerycznej).

Tablica 2. Wynik badania wrażliwości metody AHP i taksonomii numerycznej na zmianę liczby wariantów decyzyjnych.

Nazwa metody	AHP	Taksonomia numeryczna
Uszeregowanie lokalizacji biogazowni	L1 -> L4 -> L2 -> L3	L1 -> L2 -> L4 -> L3

6. PODSUMOWANIE

W artykule wykazano, że przeprowadzenie analizy lokalizacji biogazowni metodą AHP oraz metodą taksonomii numerycznej wskazuje jednakowe uporządkowanie rozpatrywanych lokalizacji, przy jednocześnie różnych wagach kryteriów wpływających na podjęcie decyzji. Dzięki możliwości wyznaczenia wskaźnika CR, metoda AHP wskazała ranking kryteriów odpowiadający przewidywaniom wynikającym z doświadczenia autorów. Metoda taksonomii numerycznej wskazała kryterium związane z odległością biogazowni od sieci ciepłowniczej jako strategiczne dla realizacji inwestycji, co zdaniem autorów nie jest zgodne z rzeczywistością. W artykule przedstawiono badanie wrażliwości obu metod na zmianę liczby kryteriów i wariantów decyzyjnych. Wykazano, że obie metody nie są wrażliwe na dodanie dodatkowego wariantu decyzyjnego. W metodzie AHP, po redukcji liczby kryteriów, wskazano to samo kryterium jako posiadające największy wpływ na wybór lokalizacji biogazowni.



Rys. 1. A) i b) Wagi kryteriów wpływających na decyzję o lokalizacji biogazowni wyznaczone metodą AHP i taksonomii numerycznej c) i d) Wyniki wyznaczenia wag kryteriów dla badania wrażliwości metod na zmianę liczby kryteriów

Metoda taksonomii numerycznej, po redukcji kryteriów, wskazała, że kryterium, które wcześniej miało niewielki wpływ na realizację inwestycji, okazało się mieć największy wpływ. Z tego względu metoda taksonomii numerycznej okazała się wrażliwą na zmianę liczby kryteriów. Podsumowując, autorzy skłaniają się ku metodzie AHP jako tej, która daje lepsze rezultaty analizy decyzyjnej.

7. BIBLIOGRAFIA

- Ministerstwo Gospodarki: Polityka energetyczna Polski do 2030 roku, Załącznik do uchwały nr 202/2009 Rady Ministrów Z dnia 10 listopada 2009 r., 2009.
- Woźniak E.: Występowanie elektrowni biogazowych w Polsce i czynniki ich lokalizacji, 2015.
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne, Dz.U. 1997 Nr 54 poz. 348, 2006
- Jasiulewicz M., Janiszewska D.: Potencjał biomasy województwa zachodniopomorskiego w aspekcie wykorzystania do celów energetycznych, Zesz. Nauk. SGGGW w Warszawie Probl. Rol. Światowego, Nr 1, s. 83–93, 2012.
- Piwoń A.: Biogazownie rolnicze w Polsce - lokalizacja i parametry, Tech. Rol. Ogród. Leśna, Nr 6, s. 7–9, 2014.
- Paska J.: Distributed generation and renewable energy sources in Poland, 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation, 2007, s. 1–6.
- Igliński B., Iglińska A., Kujawski W., Buczkowski R., Cichosz M.: Bioenergy in Poland, Renew. Sustain. Energy Rev., Nr 6, 2011, s. 2999–3007.
- Urząd Regulacji Energetyki: Moc zainstalowana OZE 2016, 2016.
- Zarębski P.: Uwarunkowania przestrzenne lokalizacji biogazowni w Polsce, Stow. Ekon. Rol. i Agrobiznesu, Nr 16, s. 331–336, 2012.
- Franc-Dąbrowska J., Jarka S.: Specyficzne uwarunkowania inwestycji w biogazownie rolnicze w Polsce, Roczn. Nauk. Ekon. Rol. i Rozw. Obsz. Wiej., Nr 4, s. 19–28, 2014.
- Maj G., Piekarski W.: Modelowy tok postępowania inwestycyjnego jako element prawidłowego zarządzania projektem budowy biogazowni rolniczej, Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji., Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, 2014, s. 867–878.
- Kosewska K., Kamiński J. R.: Analiza ekonomiczna budowy i eksploatacji biogazowni rolniczych w Polsce, Inżynieria Rol., Nr 99, s. 189–194, 2008.
- Madlener R., Kowalski K., Stagl S.: New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: The case of renewable energy use in Austria, Energy Policy, Nr 12, s. 6060–6074, 2007.
- San Cristobal J. R.: Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method, Renew. Energy, Nr 36, s. 498–502, 2011.
- Madlener R., Antunes C. H., Dias L. C.: Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis, Eur. J. Oper. Res., Nr 197, s. 1084–1094, 2009.
- Ertay T., Kahraman C., Kaya I.: Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey, Technol. Econ. Dev. Econ., Nr 19, s. 38–62, 2013.
- Saaty T. L., Vargas L. G., Dellmann K.L.: The allocation of intangible resources: The analytic hierarchy process and linear programming, Socioecon. Plann. Sci., Nr 37, s. 169–184, 2003.

ANALYSIS OF THE BIOGAS PLANT LOCATION USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) AND NUMERICAL TAXONOMY METHODS - METHODS COMPARISON

The article presents a comparison of the multicriteria Analytic Hierarchy Process method and numerical taxonomy based on the location of the biogas power plant. Biogas power plants were included in the group of energy sources which will contribute to the implementation of the energy-climate package for Poland until 2030. Energy security can be greatly enhanced by increasing the production of energy from renewable sources, eg. biogas power plants, which acquire energy from biogas of various origins. Therefore, the location of the biogas power plants is influenced by multiple factors, such as an environmental impact, availability and origin of biogas, technological aspects, and the possibility of utilization of produced energy. The problem of locating biogas power plants, due to a multitude of factors, is multicriteria. The AHP method is a mathematical method with a high level of advancement. The result of the analysis is to determine the rank vector of the considered options. The numerical taxonomy method is much less complex. It consists in determining the distance between the considered solutions and the hypothetically ideal solution, thus forming ranking solutions. The methods were compared in terms of sensitivity to changing options and decision-making criteria.

Keywords: Biogas power plant, bioenergy, multi-criteria decision analysis