

*The mathematical model for the biogas production value chain optimization***Model matematyczny do optymalizacji łańcucha wartości produkcji biogazu**

DOI: 10.15199/62.2025.8.5

An anal. of the developed math. model optimizing the value chain of biogas prodn. based on such parameters as substrate costs, their transportation costs, distance from the biogas plant, investment and operating costs of the biogas plant, as well as profits from the sale of biogas/biomethane was presented. A scheme of raw materials and products flows for the proposed model, basic substrates used and essential parameters of the biogas prodn. process were presented. Operating costs (KOp_x) and investment costs (KCap) were estimated based on available literature data. Mixed-Integer Linear Programming (MILP) procedures will be used for calcns. according to the proposed math. model, which allow to obtain the lowest biogas prodn. costs for the considered biogas plants.

Keywords: biogas, biomethan, feedstock

Przedstawiono analizę opracowanego modelu matematycznego optymalizującego łańcuch wartości produkcji biogazu na podstawie takich parametrów, jak koszty substratów, koszty ich transportu, odległość od biogazowni, koszty inwestycyjne i operacyjne biogazowni, a także zyski ze sprzedaży biogazu/biometanu. Przedstawiono schemat przepływu surowców i produktów dla proponowanego modelu, omówiono podstawowe substraty oraz główne parametry procesu produkcji biogazu. Oszacowano koszty operacyjne (KOp_x) i koszty inwestycyjne (KCap) na podstawie dostępnych danych literaturowych. Do obliczeń wg zaproponowanego modelu matematycznego można wykorzystać procedury programowania liniowego Mixed-Integer Linear Programming (MILP). Otrzymane wyniki pozwolą uzyskać najniższe koszty produkcji biogazu dla rozważanych biogazowni.

Słowa kluczowe: biogaz, biometan, odpady organiczne

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na energię i rosnącą emisję spalin pochodzących z konwencjonalnych źródeł energii podejmowane są badania nad odnawialnymi źródłami energii i nowymi technologiami¹⁾. Biogaz jest uważany za atrakcyjne źródło energii odnawialnej, które może zmniejszyć emisję ditlenku węgla i zastąpić pewną ilość paliw kopalnych²⁾. Biogaz to niekonwencjonalne paliwo produkowane z materii organicznej w warunkach beztlenowych w procesie fermentacji metanowej. Powstający w tym procesie biogaz zawiera głównie metan (50–76% obj.), ditlenek węgla (25–45% obj.), parę wodną (2–7% obj.) oraz niewielkie ilości siarkowodoru, azotu, tlenu i wodoru³⁾.



Dr hab. inż. Zenon ZIOBROWSKI (ORCID: 0000-0002-5100-6686) w roku 1985 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. W 1996 r. uzyskał stopień doktora, a w 2014 r. stopień doktora habilitowanego na tym samym wydziale. Jest profesorem w Instytucie Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach. Specjalność – inżynieria chemiczna i procesowa.

*** Adres do korespondencji:**

Instytut Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice, tel.: (32) 231-08-11, fax: (32) 231-03-18, e-mail: zenz@iich.gliwice.pl

W pierwszym etapie procesu następuje hydroliza, rozkład złożonych związków organicznych (węglowodany, białka, tłuszcze) na proste związki organiczne (aminokwasy, cukier, kwasy tłuszczowe). Na etapie zakwaszania powstające produkty pośrednie rozkładają się na kwasy tłuszczowe, które zamieniają się w kwas octowy, wodór i ditlenek węgla na etapie acetogenezy. W ostatnim etapie procesu, zwanym metanogenezą, z produktów acetogenezy powstaje metan⁴⁾.

Biometan to uzdatniony, oczyszczony biogaz, który zawiera 98–99% metanu. Biometan może być wykorzystany w celach energetycznych bezpośrednio w sieci gazowej lub jako paliwo do samochodów po odpowiednim sprężeniu. Biogaz można także wykorzystać do produkcji energii elektrycznej, energii cieplnej, a także w różnych procesach technologicznych.

Konwencjonalny gaz ziemny zawiera 90% metanu. Wartość opałowa metanu to 39,7 MJ/m³, w przypadku rozkładu biomasy wartość opałowa biogazu jest zależna od składu biogazu i może wynosić 20–30 MJ/m³. W przypadku procesu fermentacji metanowej wydajność otrzymywania metanu zależy od ilości wody w mieszaninie fermentacyjnej, temperatury, w której jest prowadzony proces fermentacji, od składu i sposobu przygotowania mieszaniny

fermentacyjnej, w tym od zawartości tłuszczów, białek i węglowodanów^{3, 5)}.

Obecnie zaleca się fermentację beztlenową (AD) w celu zwiększenia produkcji biogazu, a następnie biometanu, umożliwiając w ten sposób dywersyfikację dostaw energii, przejście na czystą energię i zarządzanie rosnącą liczbą strumieni odpadów⁶⁾. Stabilność procesu AD, a także wydajność biogazu zależą od charakterystyki dostępnych surowców, stosunku C/N, biodegradowalności, zawartości składników odżywczych lub pojemności buforowej. Zasadniczo proces ten zależy od kilku istotnych parametrów, takich jak rodzaj surowca i jego skład, szybkość ładowania organicznego, temperatura fermentacji, pH, czas retencji hydraulicznej i stosunek węgla do azotu w wykorzystanej biomase⁶⁾. Zbadano różne aspekty tego procesu, takie jak wybór rodzaju biomasy^{7, 8)}, projektowanie i budowa bioreaktorów⁹⁾, parametry operacyjne, ocena różnych procesów i technologii wzbogacania biogazu^{10, 11)}, analiza emisji gazów cieplarnianych (GHG)^{12, 13)}.

Zgłoszona globalna produkcja biogazu wzrosła w latach 2000–2017 r. do łącznej rocznej objętości 61 mld m³¹⁴⁾. Produkcja ta jest zlokalizowana głównie w Europie (54%), Azji (31%) i obu Amerykach (14%). Istnieją znaczne różnice w sposobach produkcji i wykorzystania biogazu, szczególnie między krajami rozwijającymi się i rozwiniętymi (duże przemysłowe instalacje biogazu i małe jednostki domowe)^{1, 14)}. Można wyróżnić różne typy instalacji, w tym rolnicze/gospodarskie biogazownie, które otrzymują głównie pozostałości rolnicze, obornik/gnojowicę, które są przewożone przez jednego lub więcej rolników. Zbiorowe i scentralizowane biogazownie to jednostki wielkoskalo-

we. Rolnicze scentralizowane biogazownie reprezentują grupę rolników przetwarzających głównie pozostałości z gospodarstw (obornik, resztki upraw) i mogą integrować pewne odpady z danego terytorium. Zbiorowe biogazownie przyjmują i współfermentują dostępne lokalne odpady, takie jak odpady rolnicze (obornik, gnojowica, resztki poźniwne), ale także odpady z przemysłu rolno-spożywczego (serwatka, ścieki z przemysłu cukrowniczego, odpady z rzeźni), bioodpady oraz osady i tłuszcze z przemysłu spożywczego.

Celem pracy było omówienie i przeanalizowanie numerycznego modelu łańcucha wartości biogazu, opartego na regionalnej dostępności biomasy i zapotrzebowaniu na biogaz. W analizie uwzględniono różne kwestie, takie jak duża różnorodność i dostępność wykorzystywanych surowców, technologie i procesy stosowane do ich przekształcania w produkty o wartości dodanej, dystrybucja logistyczna i rynkowa, zapotrzebowanie na biogaz, niepewność i zmienność źródeł biomasy, a także wahania ich cen i zmiany na rynkach energii^{15, 16)}.

Odpowiednie sformułowanie, badanie i analiza łańcucha wartości biogazu wraz z dokładną strategią optymalizacji są wymagane i niezbędne do rozwiązania najważniejszych ryzyk ekonomicznych, środowiskowych i społecznych związanych z systemami energetycznymi¹⁷⁾.

Substraty do produkcji biogazu

Substrat do produkcji biogazu to dowolny materiał organiczny, który może zostać strawiony przez bakterie. Odpowiednio dobrane substraty tworzą mieszaninę fermentacyjną, która powinna zawierać 12–15% suchej masy,

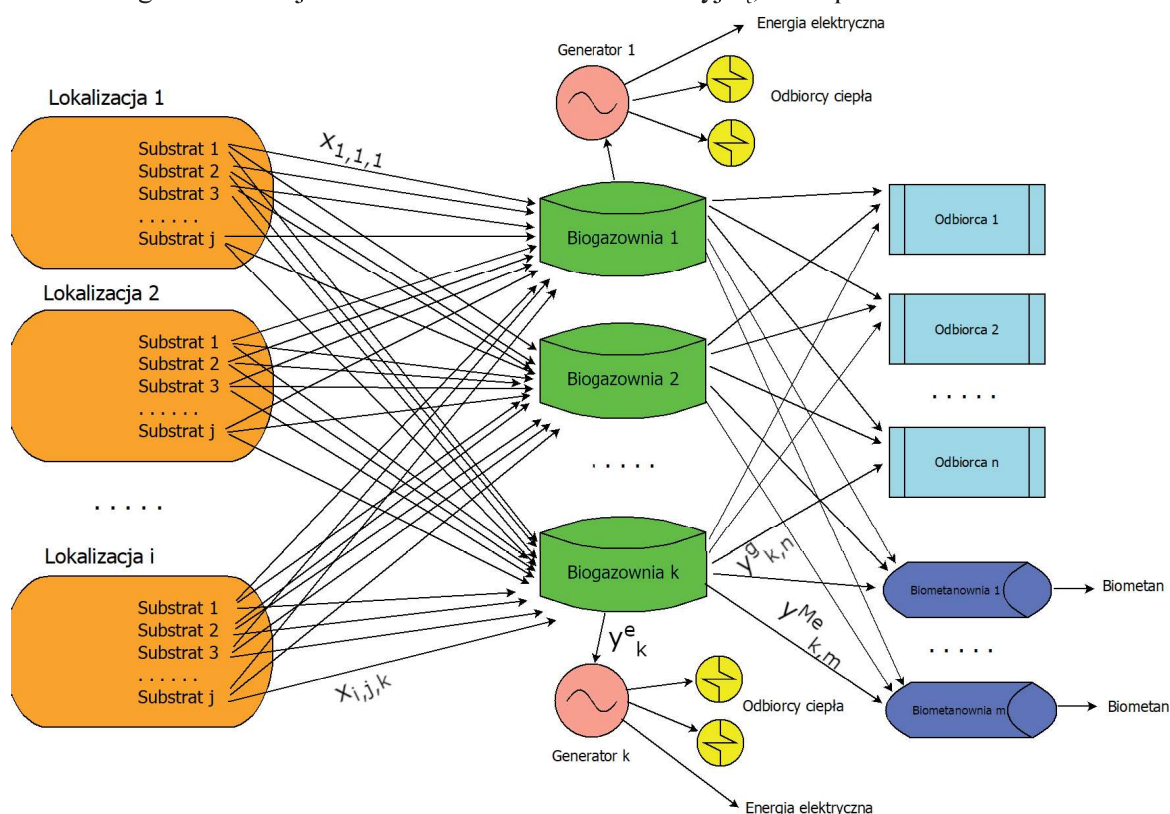


Fig. 1. Scheme of substrates and products flows for the mathematical model optimizing the biogas production value chain

Rys. 1. Schemat ideowy przepływu surowców i produktów w modelu matematycznym łańcucha wartości produkcji biogazu

mieć temp. 35–40°C, pH 6,8–7,5 i odpowiednie proporcje C:N:P:S, wynoszące 600:15:5:1. Mieszanina fermentacyjna powinna zawierać odpowiednie stężenie substancji niezbędnych do wzrostu mikroorganizmów, które są wrażliwe na substancje toksyczne, antybiotyki i pestycydy.

Substraty do otrzymywania biogazu najczęściej dzieli się wg źródeł ich pochodzenia na: rolnicze, odpady przemysłu spożywczego, osady ściekowe i odpady komunalne. W rolnictwie wykorzystuje się przede wszystkim gnojowicę i obornik¹⁸⁾, które charakteryzują się zmienną zawartością substancji organicznych. Do procesu fermentacji wykorzystuje się także celowe uprawy roślinne¹⁹⁾, najczęściej kukurydzą z powodu wysokiej wydajności w produkcji biogazu, niskich kosztów produkcji, zbioru oraz magazynowania.

W przemyśle spożywczym jest wiele odpadów i produktów ubocznych, które można wykorzystać w procesie produkcji biogazu. Są to odpady z przetwórstwa owocowo-warzywnego i mleczarskiego, pozostałości z gorzelnii, browarów i rzeźni²⁰⁾.

Bardzo ważnym odpadem w przetwórstwie mleczarskim jest serwatka, będąca mieszaniną wielu wartościowych składników, zwłaszcza laktozy. Ogólnie szacowana zdolność wytwarzania biogazu z odpadów w przemyśle rolnospożywczym w Polsce to ok. 60 mln m³/r.

Podczas oczyszczania ścieków powstają osady ściekowe, które wstępnie poddaje się fermentacji w obecności tlenu²¹⁾, aby unieszkodliwić niebezpieczne mikroorganizmy i związki organiczne. Potem proces fermentacji osadów prowadzi się w warunkach beztlenowych. Wielkość oczyszczalni ścieków ma wpływ na ilość wytwarzanego biogazu oraz sposób jego wykorzystania.

Do produkcji biogazu mogą być wykorzystane odpady komunalne, takie jak segregowane odpady żywności i odpady zielone²²⁾. Po procesie produkcji biogazu otrzymuje się tzw. poferment^{23, 24)}. Są to pozostałości po fermentacji metanowej, wykorzystywane jako cenny nawóz o właściwościach zbliżonych do nawozów naturalnych.

Część doświadczalna

Model matematyczny

Do opracowania modelu matematycznego służącego do optymalizacji łańcucha wartości produkcji biogazu konieczna jest znajomość takich parametrów, jak koszty substratów i koszty ich transportu, magazynowania, zarządzania zapasami, odległości między lokalizacją substratów i biogazownią, optymalizacja łańcucha dostaw biomasy, koszty inwestycyjne i operacyjne biogazowi, zyski ze sprzedaży biogazu lub biometanu, koszty oczyszczania biogazu do biometanu oraz zyski ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła powstałego przy jego produkcji. Należy także uwzględnić subwencje i dotacje wspierające produkcję paliw zeroemisyjnych.

Schemat ideowy przepływu surowców $x_{i,j,k}$ i produktów $y_{k,n}$ w opracowanym modelu matematycznym przedstawio-

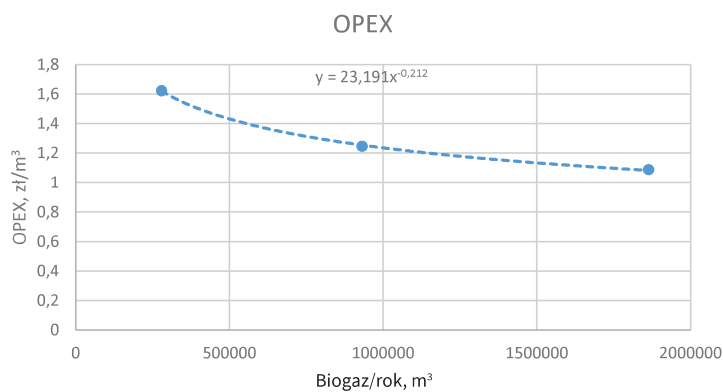


Fig. 2. Estimated unit operating costs for a biogas plant

Rys. 2. Szacowane jednostkowe koszty operacyjne dla biogazowni

no na rys. 1. Na schemacie symbole $x_{i,j,k}$ oraz $y_{k,n}$ oznaczają odpowiednio strumień substratu i do produkcji biogazu z lokalizacji j trafiający do biogazowni k oraz strumień biogazu (produktu) z biogazowni k trafiający do odbiorcy n .

Analiza modelu matematycznego

Na obecnym etapie główne zadanie modelu to wyznaczenie optymalnych parametrów produkcji gazu w powiązanych z sobą biogazowniach w celu osiągnięcia maksymalnego zysku przy minimalnych kosztach produkcji biogazu. Wartość tę przedstawiono równaniem (1):

$$W_A = W_{Pr} + W_{Dot} - K_{Su} - K_{Tr} - K_{OPX} - K_{CAPX} \quad (1)$$

w którym W_A oznacza zysk (w przypadku straty jest on ujemny), W_{Pr} wartość uzyskaną ze sprzedaży i przerobu wyprodukowanego biogazu oraz produktów ubocznych, W_{Dot} wartość udzielonych dotacji, K_{Su} koszty surowców, K_{Tr} koszty transportu, K_{OPX} koszty ruchowe, a K_{CAPX} zwrot kosztów inwestycyjnych.

Koszty surowców oraz koszt ich transportu do k -tej biogazowni przedstawia równanie (2):

$$K_{Su,k} = \sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nj} x_{i,j,k} C^s(i, j) \quad (2)$$

w którym koszt surowców do produkcji w k -tej biogazowni wyznaczany jest jako suma iloczynów strumieni substratów i dostarczanych z lokalizacji j do biogazowni k ($x_{i,j,k}$) oraz kosztów jednostkowych otrzymania surowca i w lokalizacji j ($C^s(i, j)$).

Koszty transportu surowców dla k -tej biogazowni ($K_{Tr,k}$) są wyznaczane za pomocą równania (3) jako iloczyn strumienia substratu $x_{i,j,k}$, jednostkowych kosztów transportu surowca ($T^s(i)$) oraz odległości między lokalizacją j a biogazownią k ($A^s(j, k)$).

$$K_{Tr,k} = \sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nj} x_{i,j,k} T^s(i) A^s(j, k) \quad (3)$$

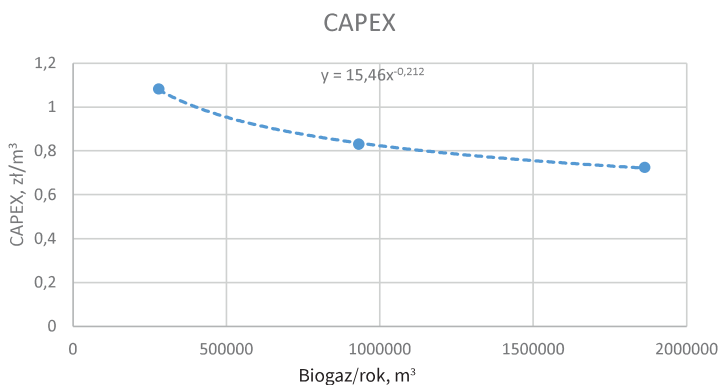


Fig. 3. Estimated unit investment costs for a biogas plant

Rys. 3. Szacowane jednostkowe koszty inwestycyjne dla biogazowni

Dla każdego przypadku obowiązuje zasada, że strumień surowców jest nieujemny (4):

$$\bigwedge_{i,j,k} x_{i,j,k} \geq 0 \quad (4)$$

oraz spełniony jest warunek mówiący, że w danej lokalizacji suma strumieni danego surowca nie przewyższa jego zasobów (5):

$$\bigwedge_{i,j} \sum_{k=1}^{nk} x_{i,j,k} \geq L^s(i, j) \quad (5)$$

Ilość wyprodukowanego biogazu w k -tej biogazowni przedstawia równanie (6):

$$G_{Pr,k} = \sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nj} x_{i,j,k} U^b(i) \quad (6)$$

w którym $U^b(i)$ oznacza wydajność produkcji biogazu liczoną na jednostkę masy surowca i . Dodatkowo spełniony musi być warunek dotyczący maksymalnej ilości produkowanego biogazu, która nie może być większa niż dopuszczalna, projektowa wartość wydajności biogazowni L^b (7):

$$\bigwedge_k G_{Pr,k} \leq L^b(k) \quad (7)$$

Z wyprodukowanego w k -tej biogazowni biogazu część przeznaczona jest do produkcji energii elektrycznej i ciepłej, która następnie sprzedawana jest odbiorcom. Część biogazu może być przekazywana do jednej z biogazowni, w której z biogazu pozyskuje się biometan i organiczny CO_2 . Biometan można włączyć do istniejącej sieci gazociągowej, a bioCO_2 można sprzedać do wykorzystania w przemyśle spożywczym. Wreszcie część biogazu może być sprzedana do odbiorców (rys. 1).

W zależności (8) $y_{k,n}^g$ oznacza strumień biogazu wyprodukowany w k -tej biogazowni zakupiony przez n -tego odbiorcę, $y_{k,m}^{Me}$ to strumień biogazu z k -tej biogazowni kierowany do m -tej biometanowni, a y_k^e to strumień bioga-

zu z k -tej biogazowni przeznaczony do produkcji energii elektrycznej i ciepła:

$$\bigwedge_k G_{Pr,k} = \sum_{n=1}^{nn} y_{k,n}^g + \sum_{m=1}^{nm} y_{k,m}^{Me} + y_k^e \quad (8)$$

W każdym przypadku strumień biogazu musi być nieujemny (9)–(11):

$$\bigwedge_{k,m} y_{k,m}^{Me} \geq 0 \quad (9)$$

$$\bigwedge_{k,n} y_{k,n}^g \geq 0 \quad (10)$$

$$\bigwedge_k y_k^e \geq 0 \quad (11)$$

Przychody ze sprzedaży biogazu w k -tej biogazowni są równe wartości sprzedanego biogazu przedstawionej zależnością (12):

$$W_k^g = C_k^g \sum_{n=1}^{nn} y_{k,n}^g \quad (12)$$

w której C_k^g oznacza cenę jednostkową sprzedaży biogazu w k -tej biogazowni.

Jednocześnie do poszczególnych odbiorców nie można dostarczać więcej biogazu niż ich możliwości przerobowe, wyznaczone z zależności (13):

$$\bigwedge_n \sum_{k=1}^{nk} y_{k,n}^g \leq L^g(n) \quad (13)$$

w której L^g oznacza możliwości przerobowe odbiorców biogazu.

W każdej biogazowni można zainstalować kogenerator prądu elektrycznego i ciepła, który zużywa y_k^e biogazu (8). Przy założeniu, że sieć energetyczna odbierze całą wyprodukowaną energię elektryczną, wartość prądu wyprodukowana przez k -tą biogazownię wynosi (14):

$$W_k^e = C_k^e y_k^e \eta_k^e \quad (14)$$

gdzie W_k^e oznacza wartość wyprodukowanej energii elektrycznej, C_k^e cenę, jaką k -ta biogazownia uzyskuje za sprzedaż jednostki energii elektrycznej, a η_k^e to wydajność produkcji energii elektrycznej z jednostki biogazu.

Wartość wygenerowanego ciepła przy produkcji energii elektrycznej w k -tej biogazowni (W_k^H) wynosi (15):

$$W_k^H = \sum_{n=1}^{nn} [z_{k,n} (C_k^H - T^H(k, n))] \quad (15)$$

gdzie $z_{k,n}$ oznacza strumień ciepła kierowany z biogazowni k -tej do n -tego odbiorcy, C_k^H cenę jednostkową ciepła w k -tej biogazowni, a $T^H(k, n)$ koszty przesłania jednostki ciepła z k -tej biogazowni do n -tego odbiorcy.

Żaden z n -odbiorców nie przyjmie więcej ciepła niż wynosi jego zapotrzebowanie $L^H(n)$ wyznaczone z zależności (16):

$$\bigwedge_n \sum_{k=1}^{nk} z_{k,n} \leq L^H(n) \quad (16)$$

oraz dla każdej biogazowni musi być spełniony warunek zachowania masy (17):

$$\bigwedge_k \sum_{n=1}^{nn} z_{k,n} \leq y_k^e \eta_k^H \quad (17)$$

gdzie η_k^H oznacza wydajność produkcji ciepła z jednostki biogazu w k -tej biogazowni.

Każda biogazownia może przekazać część swojej produkcji biogazu do biometanowni, gdzie biogaz rozdziela się na biometan i organiczny CO_2 . Wartość tak otrzymanego biometanu (W_k^{Me}) wynosi (18):

$$W_k^{Me} = \sum_{m=1}^{nm} y_{k,m}^{Me} (C^{Me} \eta_k^{Me} - T^{Me}(k, m)) \quad (18)$$

gdzie C^{Me} oznacza cenę jednostkową biometanu, $y_{k,m}^{Me}$ strumień biogazu z k -tej biogazowni do m -tej biometanowni, η_k^{Me} stężenie biometanu w biogazie, a $T^{Me}(k, m)$ koszt jednostkowy transportu biogazu z k -tej biogazowni do m -tej biometanowni.

Jednocześnie musi być spełniony warunek, że żadna z biometanowni nie przyjmie więcej biogazu, niż jest w stanie przerobić na biometan (19):

$$\bigwedge_m \sum_{k=1}^{nk} y_{k,m}^{Me} \leq L^{Me}(m) \quad (19)$$

Cennym produktem ubocznym w biogazowni jest poferment, który jest wykorzystywany w rolnictwie jako nawóz. Zakładając, że strumień masowy pofermentu jest proporcjonalny do masy substratów użytych w k -tej biogazowni, to jego wartość wynosi (20):

$$W_k^p = \sum_{i=1}^{ni} \sum_{j=1}^{nj} x_{i,j,k} U^p(k) C^p(k) \quad (20)$$

gdzie W_k^p oznacza wartość pofermentu w k -tej biogazowni, $U^p(k)$ wektor uzysku pofermentu z jednostki masy surowca w k -tej biogazowni, a $C^p(k)$ koszt jednostkowy pofermentu w k -tej biogazowni.

Całkowita wartość uzyskana ze sprzedaży i przerobu wyprodukowanego biogazu oraz produktów ubocznych w k -tej biogazowni ($W_{pr,k}$) wynosi (21):

$$W_{pr,k} = W_k^g + W_k^e + W_k^H + W_k^{Me} + W_k^p \quad (21)$$

Koszty ruchowe i koszty inwestycyjne

Koszty ruchowe ($K_{OPX,k}$) i zwrot kosztów inwestycyjnych ($K_{CAP,k}$) dla k -tej biogazowni wyestymowano na podstawie danych zamieszczonych w pracy⁴⁾. Z przedstawionych na rys. 2 i 3 wykresów wynika, że koszty inwestycyjne i koszty ruchowe liczone na jednostkę produkcji biogazu maleją wraz ze wzrostem produkcji biogazu, a tym samym z wielkością biogazowni. Koszty ruchowe wyznaczano dla rzeczywistej wydajności biogazowni, a koszty inwestycyjne dla nominalnej.

Metodą najmniejszych kwadratów oszacowano zależność kosztów operacyjnych OPX i inwestycyjnych CAPX od wielkości produkcji biogazu (22) i (23):

$$f_{OPX} = 23,19 x^{-0.212} \quad (22)$$

$$f_{CAPX} = 15,46 x^{-0.212} \quad (23)$$

Koszty operacyjne dla k -tej biogazowni przedstawiono równaniem (24), a inwestycyjne równaniem (25):

$$K_{OPX,k} = \sum_{k=1}^{nk} f_{OPX}(K_{Pr,k}) \quad (24)$$

$$K_{CAPX,k} = \sum_{k=1}^{nk} f_{CAPX}(L_k^b) \quad (25)$$

Dla k -tej biogazowni wartość zysku liczonego jak w równaniu (1) wynosi (26):

$$W_{A,k} = W_{Pr,k} + W_{Dot,k} - K_{Su,k} - K_{Tr,k} - K_{OPX,k} - K_{CAPX,k} \quad (26)$$

Wartość dotacji W_{Dot} jest wielkością trudno policzalną, gdyż wiąże się raczej z czynnikami politycznymi niż fizycznymi i na tym etapie będzie ona pominięta. W rzeczywistych obliczeniach optymalizacyjnych dla konkretnego regionu i czasu należy ją jednak uwzględnić.

Całkowita wielkość zysku liczona dla całego regionu wynosi (27):

$$W_A = \sum_{k=1}^{nk} W_{A,k} \quad (27)$$

Podsumowanie

Opracowano model matematyczny służący do optymalizacji łańcucha wartości produkcji biogazu przy uwzględnieniu takich parametrów, jak lokalizacja i cena surowców, koszty transportu surowców i odległość biogazowni od lokalizacji surowców. Omówiono stosowane substraty oraz parametry procesu produkcji biogazu.

Wynikiem obliczeń optymalizacyjnych, gdzie funkcją celu jest maksymalizacja wartości równania (27), jest macierz strumieni $x_{i,j,k}$, czyli wielkości strumieni poszczególnych surowców (i) pozyskanych z danych lokalizacji (j)

dostarczanych do biogazowni (k), oraz macierze strumieni biogazu kierowanego z biogazowni k -tej do n -tego odbiorcy $y^g(k,n)$, macierz $y^{Me}(k,m)$, czyli strumień biogazu kierowany z k -tej biogazowni do m -tej biometanowni, oraz wektor $y^e(k)$, czyli strumienie biogazu kierowane do obecnego w każdej biogazowni kogeneratora energii elektrycznej i ciepła.

Otrzymane wyniki zapewnią optymalną pracę wszystkich biogazowni, co prowadzi do uzyskania najniższych kosztów produkcji biogazu dla analizowanego zespołu biogazowni.

Przedstawione koszty inwestycyjne i operacyjne biogazowni oszacowano na podstawie danych literaturowych. Koszty inwestycyjne, jak i operacyjne w przeliczeniu na jednostkę produkcji biogazu maleją wraz ze wzrostem produkcji biogazu (wielkością biogazowni).

W obliczeniach wykorzystano procedury Mixed-Integer Linear Programing (MILP)⁽²⁵⁾.

Oznaczenia

$A^s(j,k)$ – odległość między lokalizacją j a biogazownią k
 C_k^e – cena jaką k -ta biogazownia uzyskała za sprzedaż jednostki energii elektrycznej, zł/kWh
 C_k^g – cena jednostkowa sprzedaży biogazu w k -tej biogazowni, zł/kg
 C_k^H – cena jednostkowa ciepła w k -tej biogazowni, zł/kJ
 C_k^{Me} – cena jednostkowa biometanu, zł/kg
 C_k^p – cena jednostkowa pofermentu w k -tej biogazowni, zł/kg
 $C^s(i,j)$ – koszty jednostkowe pozyskania surowca i w lokalizacji j , zł/kg
 $G_{Pr,k}$ – ilość biogazu wyprodukowana w biogazowni k , kg/r
 K_{CAPX} – zwrot kosztów inwestycyjnych, zł/r
 K_{OPX} – koszty ruchowe, zł/r
 K_{Su} – koszty surowców, zł/r
 K_{Tr} – koszty transportu surowców, zł/r
 $L^b(k)$ – maksymalna (projektowa) wydajność biogazowni, kg/r
 L^g – możliwości przerobowe odbiorców biogazu, kg/r
 $L^H(n)$ – roczne zapotrzebowanie na ciepło n -tego odbiorcy, kJ/r
 $L^{Me}(m)$ – możliwości przerobowe biogazu w m -tej biometanowni, kg/r
 $L^s(i,j)$ – zasoby surowca i w lokalizacji j , kg/r
 $T^H(n,k)$ – koszt przesłania jednostki ciepła z k -tej biogazowni do n -tego odbiorcy, zł/kJ
 $T^{Me}(k,m)$ – koszt jednostkowy transportu biogazu z k -tej biogazowni do m -tej biometanowni, zł/kg
 $T^s(i)$ – koszt jednostkowy transportu surowca, zł/(kg·km)
 $U^b(i)$ – wydajność produkcji biogazu z jednostki masy surowca i , kg/kg
 $U^p(k)$ – uzysku pofermentu z jednostki masy surowca w k -tej biogazowni, kg/kg
 W_A – zysk całkowity, zł/r
 W_{Dot} – wartość udzielonych dotacji, zł/r

W_k^e – wartość wyprodukowanej energii elektrycznej, zł/r
 W_k^g – przychody ze sprzedaży biogazu w k -tej biogazowni, zł/r
 W_k^H – wartość wygenerowanego ciepła przy produkcji energii elektrycznej w k -tej biogazowni, zł/r
 W_k^{Me} – wartość otrzymanego biometanu, zł/r
 W_k^p – wartość pofermentu w k -tej biogazowni, zł/r
 W_{Pr} – wartość uzyskana ze sprzedaży i przerobu wyprodukowanego biogazu oraz produktów ubocznych, zł/r
 $W_{Pr,k}$ – całkowita wartość uzyskana ze sprzedaży i przerobu wyprodukowanego biogazu oraz produktów ubocznych w k -tej biogazowni, zł/r
 $x_{i,j,k}$ – strumień substratów i dostarczanych z lokalizacji j do biogazowni k , kg/r
 y_k^e – strumień biogazu z k -tej biogazowni przeznaczony do produkcji energii elektrycznej i ciepła, kg/r
 $y_{k,n}^g$ – strumień biogazu wyprodukowany w k -tej biogazowni zakupiony przez n -tego odbiorcę, kg/r
 $y_{k,m}^{Me}$ – strumień biogazu z k -tej biogazowni do m -tej biometanowni, kg/r
 $z_{k,n}$ – strumień ciepła kierowany z biogazowni k -tej do odbiorcy n -tego, kJ/r
 η_k^e – wydajność produkcji energii elektrycznej z jednostki biogazu, kWh/kg
 η_k^H – wydajność produkcji ciepła z jednostki biogazu w k -tej biogazowni, kJ/kg
 η_k^{Me} – stężenie biometanu w biogazie, kg/kg

Otrzymano: 10-07-2025

Zrecenzowano: 15-07-2025

Zaakceptowano: 16-07-2025

Opublikowano: 11-08-2025

LITERATURA

- [1] C. Bumharther, D. Bolonio, I. Amez, M.J. García Martínez, M.F. Ortega, *J. Cleaner Prod.* 2023, **388**, 135867, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135867>.
- [2] L.A. Díaz-Trujillo, L.F. Fuentes-Cortés, F. Nápoles-Rivera, *Comput. Chem. Eng.* 2020, **141**, 107018, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107018>.
- [3] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer (red.), *Energie aus Biomasse*, Springer, Berlin, Heidelberg 2009, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85095-3>.
- [4] Y. Gital Durmaz, B. Bilgen, *Appl. Energy* 2020, **272**, 115259, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115259>.
- [5] DWA, Merkblatt DWA-M 363 Herkunft und Verwertung von Biogas, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 2022, <https://www.lehmanns.de/shop/naturwissenschaften/58762550-9783968621630-merkblatt-dwa-m-363-herkunft-und-verwertung-von-biogas>, dostęp 9.11.2023 r.
- [6] E. Leca, B. Zennaro, J. Hamelin, H. Carrère, C. Sambusiti, *Biotechnol. Adv.* 2023, **65**, 108129, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108129>.
- [7] M. Zaefferer, D. Gaida, T. Bartz-Beielstein, *Appl. Soft Comput.* 2016, **48**, 13, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.05.047>.
- [8] Q. Zhang, J. Hu, D.-J. Lee, *Renew. Energy* 2016, **98**, 108.
- [9] M. Markowski, I. Białobrzewski, M. Zieliński, M. Dębowski, M. Krzemieniewski, *Renew. Energy* 2014, **69**, 219, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.039>.
- [10] M. Miltner, A. Makaruk, M. Harasek, *J. Cleaner Prod.* 2017, **161**, 1329, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.045>.
- [11] A. Toledo-Cervantes, J.M. Estrada, R. Lebrero, R. Muñoz, *Algal Res.* 2017, **25**, 237, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.05.006>.
- [12] A. Pertl, P. Mostbauer, G. Obersteiner, *Waste Manag.* 2010, **30**, 92, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.08.011>.
- [13] F. Teymoori Hamzehkolaei, N. Amjadi, *Renew. Energy* 2018, **118**, 602.
- [14] U. Brémond, R. de Buyer, J.-P. Steyer, N. Bernet, H. Carrere, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, **90**, 583, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.103>.

- [15] S. Khishtandar, *Appl. Energy* 2019, **236**, 183, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.092>.
- [16] Y. Zhang, Y. Jiang, *Waste Manag.* 2017, **60**, 329, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.004>.
- [17] J. Gao, F. You, *Comput. Chem. Eng.* 2019, **122**, 31, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.05.016>.
- [18] Substraty do produkcji biogazu – odpady hodowlane (część 3/5), OZE Odnawialne Źródła Energii (n.d.), <https://www.odnawialne-firmy.pl/wiadomosci/pokaz/111,substraty-do-produkcji-biogazu-odpady-hodowlane-czesc-35>, dostęp 3.10.2023 r.
- [19] Substraty do produkcji biogazu – rośliny energetyczne (część 5/5), OZE Odnawialne Źródła Energii (n.d.), <https://www.odnawialne-firmy.pl/wiadomosci/pokaz/120,substraty-do-produkcji-biogazu-rosliny-energetyczne-czesc-55>, dostęp 3.10.2023 r.
- [20] Substraty do produkcji biogazu – odpady przemysłu spożywczego (część 1/5), OZE Odnawialne Źródła Energii (n.d.), <https://www.odnawialne-firmy.pl/wiadomosci/pokaz/106,substraty-do-produkcji-biogazu-odpady-przemyslu-spozywczego-czesc-15>, dostęp 3.10.2023 r.
- [21] Substraty do produkcji biogazu – osady ściekowe (część 2/5), OZE Odnawialne Źródła Energii (n.d.), <https://www.odnawialne-firmy.pl/wiadomosci/pokaz/110,substraty-do-produkcji-biogazu-osady-sciekowe-czesc-25>, dostęp 3.10.2023 r.
- [22] Substraty do produkcji biogazu – odpady komunalne (część 4/5), OZE Odnawialne Źródła Energii (n.d.), <https://www.odnawialne-firmy.pl/wiadomosci/pokaz/117,substraty-do-produkcji-biogazu-odpady-komunalne-czesc-45>, dostęp 3.10.2023 r.
- [23] M. Tyszką, Poferment – nawóz czy odpad? – Nawożenie, www.farmer.pl, 2015, <https://www.farmer.pl/produkcja-roslinna/nawozy/poferment-nawoz-czy-odpad,57951.html>, dostęp 3.10.2023 r.
- [24] P. Ochal, Poferment z biogazowni rolniczej jako nawóz, Nawozy.Eu (n.d.), <https://nawozy.eu>, dostęp 3.10.2023 r.
- [25] Mixed-Integer Linear Programming (MILP) Algorithms – MATLAB & Simulink, (n.d.), <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html>, dostęp 2.02.2024 r.



KONFERENCJA

NAUKA NA RZECZ
ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU
24.-25.10.2024

Wrocławska Rada Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Naczelna Organizacja Techniczna we Wrocławiu zaprasza na

Konferencję Naukową „Nauka na rzecz zrównoważonego rozwoju”,

która odbędzie się w dniach **24–25 października 2024 r. we Wrocławiu**

Celem konferencji będzie wymiana doświadczeń dotyczących innowacyjnych technologii przyczyniających się do zrównoważonego rozwoju w wybranych dziedzinach życia. Wydarzenie umożliwi prezentację dorobku naukowego zarówno młodej, jak i doświadczonej kadry naukowej oraz będzie stanowić platformę służącą wymianie informacji, poglądów i doświadczeń pomiędzy pracownikami naukowymi a przedstawicielami przemysłu.

Tematyka konferencji obejmuje: nowoczesne technologie przemysłu chemicznego; nawozy mineralne o innowacyjnych składach; perspektywy rozwoju technologii zielonego wodoru; nowoczesne rozwiązania w technologiach galwanicznych; zaawansowane materiały funkcjonalne i użytkowe; innowacyjne rozwiązania w technologii uzdatniania wody i oczyszczania ścieków; recykling i zagospodarowanie odpadów; gospodarka w obiegu zamkniętym; sztuczna inteligencja w tworzeniu zrównoważonego rozwoju; ograniczenie marnotrawstwa surowców roślinnych w całym ciągu przetwórczym; aspekty środowiskowe w produkcji żywności; zapewnienie bezpieczeństwa żywności; zanieczyszczenia surowców i produktów; odnawialne źródła energii; zrównoważony rozwój rolnictwa; zrównoważony rozwój ogrodnictwa.

Podczas konferencji planowane są: wykłady plenarne oraz referaty i postery w sekcjach tematycznych. Wystąpienia należy przygotować w formie wystąpień multimedialnych, których prezentacja zajmować będzie ok. 15 min (referat) lub ok. 5 min (poster).

Organizatorzy przewidują możliwość publikacji artykułów naukowych w czasopismach: *Chemik* (0009-2886, 20 pkt), *Przemysł Chemiczny* (0033-2496, 70 pkt), *Ochrona przed Korozją* (0473-7733, 40 pkt) oraz *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* (1642-686X, 20 pkt.).

Opłaty:

Koszt uczestnictwa obejmuje: udział w konferencji, materiały konferencyjne wraz ze zbiorem abstraktów, certyfikat uczestnictwa w konferencji, wyżywienie oraz udział w spotkaniu integracyjnym z uroczystą kolacją pierwszego dnia konferencji (opłaty za nocleg/noclegi nie są uwzględnione w opłacie konferencyjnej).

Dostępne pakiety:

- dla członków Stowarzyszeń NOT: 750 zł – opłata wczesna, wniesiona do 15 września 2024 r.
850 zł – opłata wniesiona do 20 października 2024 r.
- dla osób niebędących członkami Stowarzyszeń NOT: 800 zł – opłata wniesiona do 15 września 2024 r.
900 zł – opłata wniesiona do 20 października 2024 r.
- dla studentów i doktorantów: 400 PLN – opłata wczesna, wniesiona do 15 września 2024 r.
500 zł – opłata wniesiona do 20 października 2024 r.

Opłaty za konferencję prosimy dokonywać do 20 października 2024 na konto **87109015220000000142021819**, z dopiskiem KNRZR oraz nazwisko uczestnika

Szczegółowe informacje znajdują się na stronie www.knrzr.not.pl • Kontakt mailowy: konferencje@not.pl