

Wpłynęło 24.10.2011 r.
Zrecenzowano 25.11.2011 r.
Zaakceptowano 16.05.2012 r.

Model kosztów pozyskania biomasy przez jednostkę kogeneracyjną CHP

Ryszard RĘBOWSKI^{AEF}, Marek PIELICH^{AF}

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Witelona w Legnicy

Streszczenie

Celem pracy było ustalenie i zbadanie podstawowej zależności (relacji) między ilością zapotrzebowania na biomasę ze strony jednostki CHP a kosztami jej pozyskania w warunkach dowolnej jej lokalizacji ze szczególnym uwzględnieniem roli kosztu transportu. Skonstruowano model, umożliwiający opisanie kosztu rzeczywistego pozyskania biomasy dla małej jednostki kogeneracyjnej CHP (ang. „combined heat and power”) jako funkcji M_o – zapotrzebowania na biomasę i jednostkowych wskaźników: k_j – kosztu transportu i załadunku, c_j – ceny biomasy, m_j – kosztu magazynowania. Opisano relację między tzw. kosztem wirtualnym a kosztem rzeczywistym, formułując charakterystyki modelu jako własności μ – współczynnika relacji kosztu wirtualnego do rzeczywistego. W szczególności uzyskano postać strukturalną jednostkowego kosztu całkowitego pozyskania biomasy.

Słowa kluczowe: jednostka kogeneracyjna CHP, plantacja, koszt wirtualny, koszt rzeczywisty

Wstęp

Dla każdej jednostki kogeneracyjnej CHP (ang. „combined heat and power”) kluczowym problemem jest zaopatrzenie jej w biomasę. Na ogół rozwiązaniem tego problemu jest założenie plantacji roślin z przeznaczeniem do produkcji tej biomasy. Na etapie projektowania takiej plantacji, obok problemu, co uprawiać i na jakiej powierzchni, ważna jest lokalizacja plantacji względem magazynów jednostki. Ma ona bowiem wpływ na wielkość jednego ze składników kosztu pozyskania biomasy – transportu. Tematyka ta pojawia się często w literaturze przedmiotu [BAKOS i in. 2008; BÖRJESSON 1996; FIALA i in. 1997; GRACHAM i in. 1997; HOLMGREN i in. 2007; JENKINS 1997; MARRISON, LARSON 1995; MURPHY, MCCARTHY 2005; SYGIT i in. 2008; TURSUN i in. 2009; WALLA, SCHNEEBERGER 2008]. Uzyskane wyniki akcentują znaczenie kosztu transportu i potrzebę jego



minimalizowania [BAKOS i in. 2008; SYGIT i in. 2008]. Generalnie uzyskane wyniki są efektem badań empirycznych i dotyczą konkretnych lokalizacji CHP i upraw roślin energetycznych, np. Austrii [WALLA, SCHNEEBERGER 2008], Grecji [BAKOS i in. 2008], Irlandii [MURPHY, MCCARTHY 2005] czy Stanów Zjednoczonych [GRAHAM i in. 1997; MARRISON, LARSON 1995; TURSUN i in. 2008]. Na przykład, MURPHY i MCCARTHY [2005] metodą empiryczną wyznaczyli zależność długości drogi transportu zebranego plonu od masy tego zbioru dla plantacji zlokalizowanych na terenie Danii. MARRISON i LARSON [1995] zaprezentowali podejście strukturalne do problemu kosztu transportu. Gruntowną analizę procesu transportu zaprezentowali też HOLMGREN i in. [2007], wykorzystując do tego celu konkretne lokalizacje CHP. Na uwagę zasługuje również zaproponowana analiza kosztów transportu biomasy [TURSUN i in. 2009].

Metody badań

U podstaw przyjętej metodyki badań, w odróżnieniu od znanych w literaturze rozwiązań, leży konstrukcja modelu teoretycznego kosztów pozyskania biomasy, wykorzystująca pojęcie plantacji wirtualnej (obszar w kształcie okręgu o zadanym promieniu i środku umiejscowionym w lokalizacji CHP) oraz pojęcie całkowitego kosztu wirtualnego, rozumianego jako koszt pozyskania biomasy z plantacji wirtualnej. Za pomocą współczynnika μ , czyli relacji kosztu wirtualnego do rzeczywistego, koszt rzeczywisty pozyskania biomasy wyrażony został przez koszt wirtualny. Umożliwiło to określenie zależności między ilością biomasy a kosztem jej pozyskania. Podstawą do zrozumienia tej relacji jest zależność współczynników α i β tego modelu od ilości biomasy M i od μ . Analiza tych relacji umożliwia bowiem optymalizację kosztów, sprowadzoną do dwóch wariantów inwestycyjnych – pesymistycznego i optymistycznego. Z kolei zbadanie przypadków: $\mu = 1$, $\mu > 1$, $\mu < 1$ pozwala sformułować zasadę optymalnego wyboru planowania lokalizacji plantacji uprawy roślin na biomasę.

Model kosztów pozyskania biomasy

Układ kogeneracyjny na podstawie zapotrzebowania na energię Q określa wymagania, dotyczące ilości biomasy, która w wyniku procesu jej przetwarzania jest w stanie tę energię wyprodukować. Przyjmując, że zależność między energią Q a biomasą M ma postać $M = f(Q)$, można wyznaczyć wartość tej funkcji dla określonej wartości zapotrzebowania na energię $Q = Q_0$, czyli $M_0 = f(Q_0)$. Dalsze postępowanie zmierza do określenia powierzchni plantacji, która będzie w stanie zaspokoić zapotrzebowanie jednostki CHP na biomasę. Funkcjonowanie takiej plantacji polega na przeprowadzaniu okresowych zbiorów, ich magazynowaniu i właściwym przechowywaniu. Przyjęto, że składowanie biomasy odbywa się na terenie plantacji, która ma postać płata powierzchniowo gładkiego Σ . Teren upraw może charakteryzować się zmiennymi warunkami (jakość gleby, warunki klimatyczne itp.) przyjęto więc, że znana jest gęstość plonu uprawy roślin z przeznaczeniem na biomasę, czyli funkcja $\Sigma \ni (x, y, z) = \sigma \rightarrow q(\sigma) \in \mathbf{R}_+$, wyrażana w $t \cdot ha^{-1}$. Dla przypadku, gdy funkcja ta nie jest funkcją ciągłą, założono,

że plantacja Σ jest sumą obszarów Σ_j oraz że na każdej składowej Σ_j , q jest już ciągła. Wtedy całkowita masa surowca biomasy M_c , zebrana z tego arealu (masa całkowita), będzie całką z funkcji q po powierzchni Σ :

$$M_c = \int_{\Sigma} q(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

bądź w sytuacji ogólniejszej

$$M_c = \sum_{j=1}^n \int_{\Sigma_j} q(\sigma) d\sigma \quad (2)$$

Po uwzględnieniu strat, związanych ze: zbiorem, załadunkiem i przewiezieniem biomasy do magazynu, mamy do czynienia z masą zebraną M_o [$t \cdot ha^{-1}$], gdzie $M_o = \eta M_c$ dla pewnej wartości współczynnika strat η , którego wartość należy wyznaczyć empirycznie.

Założono również, że jednostka CHP, dla której należy dostarczyć ilość M_o biomasy, ma do dyspozycji bazę logistyczno-transportową, a więc niezbędny tabor i magazyny. Efektem tego będzie poniesiony całkowity koszt K_r pozyskania surowca [PLN], którego struktura wygląda następująco:

$$K_r = C + K_{tr} + K_m \quad (3)$$

gdzie:

C – cena zakupu M_o surowca biomasy [PLN],

K_{tr} – koszt transportu (w tym załadunku i rozładunku) tego surowca na trasie: magazyn CHP–magazyn plantacji–magazyn CHP [PLN],

K_m – koszt magazynowania surowca w magazynach CHP [PLN].

Ze względu na możliwą różnorodność geometryczną arealu Σ , przed przystąpieniem do dalszych rozważań, należy skonstruować jego wirtualną reprezentację. Zakłada się, że będzie nią koło $K(CHP, r_o)$ o pewnym promieniu r_o i o środku umiejscowionym w lokalizacji CHP. Ponadto założono, że ze względu na rozmiar jednostki CHP będzie ona w stanie pomieścić zebraną biomasę w jednym magazynie bądź magazyny będą zlokalizowane blisko siebie. Przyjęto również, że na plantacji wirtualnej transport na trasie magazyn CHP–magazyn plantacji–magazyn CHP nie będzie odbiegał od drogi poprowadzonej wzdłuż promienia, łączącego lokalizację CHP, gdzie znajduje się magazyn CHP z magazynem plantacji. Dlatego oddalony on będzie od jednostki CHP o taką wartość r_m , że:

$$\pi r_m^2 = \frac{1}{2} \pi r_o^2 \quad (4)$$

czyli

$$r_m = \frac{\sqrt{2}}{2} r_o \cong 0,707 r_o \quad (5)$$

Aby skonstruować promień r_o wirtualnej plantacji, przez q_t oznaczono teoretyczną wartość średnią funkcji q , czyli $q_t|\Sigma| = M$, gdzie $|\Sigma|$ oznacza pole powierzchni obszaru Σ [ha]. Analogicznie oznaczono rzeczywistą wartość średnią q_o funkcji q , czyli:

$$q_o = \frac{M_o}{|\Sigma|} = \eta q_t \quad (6)$$

Wirtualną reprezentacją plantacji Σ będzie koło $K(\text{CHP}, r_o)$, gdzie r_o spełnia równość: $\pi r_o^2 q_o = M_o$, czyli r_o będzie równe:

$$\pi r_o^2 q_o = q_o |\Sigma| \Leftrightarrow r_o^2 = \frac{|\Sigma|}{\pi} \quad (7)$$

W następnym etapie zdefiniowano koszt K_w , zwany dalej wirtualnym kosztem, związany z procesem pozyskania biomasy z plantacji wirtualnej. Podobnie jak w przypadku plantacji rzeczywistej, na koszt K_w składają się trzy składniki: koszt zakupu, transportu i składowania. Dla kosztu zakupu wartość ta równa jest

$$\pi r_o^2 q_o c_j = M_o c_j \quad (8)$$

gdzie:

c_j – oznacza wskaźnik ceny jednostkowej [PLN·t⁻¹] zakupu biomasy.

W przypadku składowej wynikającej z magazynowania biomasy, wartość ta wyniesie:

$$\pi r_o^2 q_o m_j d = M_o m_j d \quad (9)$$

gdzie:

m_j – wskaźnik wartości przechowywania jednostki biomasy przez jeden dzień [PLN·d⁻¹·t⁻¹],

d – liczba dni.

Pozostaje zająć się składnikiem, związanym z transportem i załadunkiem–rozładunkiem. Traktując ten składnik jako funkcję argumentu promienia r , jego przyrost ΔK_{trw} obliczymy następująco:

$$\Delta K_{trw} = 2\pi r q_o 2r_m k_j \Delta r \quad (10)$$

gdzie:

k_j – wskaźnik kosztu jednostkowego, związanego z operacją załadunku (rozładunku) i przewiezieniem na dystansie 1 km jednostki biomasy, jeśli droga transportu zgodnie z (5) wynosi $2r_m = 1,414r_o$ [PLN·km⁻¹·t⁻¹].

Stąd wirtualny koszt całkowity $K_w(r_o)$ procesu pozyskania biomasy z plantacji wirtualnej o promieniu r_o otrzymamy, całkując powyższą równość w przedziale $[0, r_o]$ i dodając pozostałe składniki, czyli

$$K_w(r_o) = \int_0^{r_o} 2\pi r q_o 2r_m k_j dr + M_o c_j + M_o m_j d \quad (11)$$

co daje

$$K_w(r_o) = \pi q_o k_j 2r_m r_o^2 + M_o c_j + M_o m_j d$$

Wykorzystując zależność (5), wartość kosztu wirtualnego (11) wyniesie:

$$K_w(r_o) = 1,414 \pi q_o k_j r_o^3 + M_o c_j + M_o m_j d \quad (12)$$

Następne postępowanie dotyczy rzeczywistego kosztu całkowitego K_r tej technologii. W modelu przyjęto, że koszt K_r jest znany. W takim razie koszt wirtualny przyjmie postać $K_w(r_o) = \mu K_r$ dla pewnej wartości μ , którą nazwiemy współczynnikiem relacji kosztu wirtualnego do rzeczywistego.

Do realizacji założonego celu pracy pozostaje jeszcze wyznaczenie zależności między zapotrzebowaniem na biomasę M_o a kosztem rzeczywistym K_r . Po podstawieniu do wzoru (12) do obliczenia kosztu wirtualnego K_w wartości promienia r_o otrzymamy:

$$K_r = 1,414 \frac{k_j}{\mu} \frac{1}{(\pi q_o)^{\frac{1}{2}}} M_o^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{c_j + m_j d}{\mu} \right) M_o \quad (13)$$

Ponieważ α i β , zwane dalej współczynnikami wariantu inwestycyjnego, są odpowiednio równe:

$$\alpha = 1,414 \frac{k_j}{\mu} \frac{1}{(\pi q_o)^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{c_j + m_j d}{\mu} \quad (15)$$

ostateczne, główne równanie modelu teoretycznego kosztu pozyskania biomasy przyjmie następującą postać:

$$K_r = \alpha M_o^{\frac{3}{2}} + \beta M_o \quad (16)$$

Podsumowanie

Dla jednostki kogeneracyjnej kluczowym problemem jest zaopatrzenie jej w biomasę, co na ogół wymaga założenia plantacji roślin. Obok kwestii, co uprawiać i na jakim areale, ważny jest wybór lokalizacji plantacji względem ma-

gazynów jednostki. Strukturę całkowitego kosztu pozyskania surowca z takiej plantacji przedstawia wzór (3). Różnorodność geometrii takiej plantacji powoduje, że trudno jest wyrazić zależność tego kosztu od ilości zapotrzebowania na biomasę. Problem ten rozwiązuje konstrukcja plantacji wirtualnej – o stałej geometrii koła o środku w lokalizacji CHP i pewnym promieniu. Skalkulowany koszt wirtualny dla takiej plantacji opisuje wzór (12). Znajomość kosztu rzeczywistego prowadzi do pojęcia współczynnika relacji obu kosztów. To z kolei umożliwia wyrażenie kosztu rzeczywistego w funkcji zapotrzebowania na biomasę, co przedstawiają wzory (14)–(16). W efekcie równanie (16) daje strukturalny opis jednostkowego kosztu pozyskania biomasy J_K [PLN·t⁻¹], gdzie:

$$J_K = \alpha M_o^{\frac{1}{2}} + \beta$$

Występujące w równaniu (16) współczynniki α i β zależą od przyjętych w modelu wskaźników: k_j , c_j i m_j oraz parametrów: μ , d , q_o . Wskaźniki oraz parametry mogą zależeć od ilości biomasy. Parametr μ jest zmienną niezależną modelu (16), dlatego α i β są wartościami funkcji zmiennych (μ , M). Jeśli funkcje te oznaczymy przez α i β , to

$$K_r(\mu, M) = \alpha(\mu, M)M^{\frac{3}{2}} + \frac{\beta(\mu, M)}{\alpha(\mu, M)}M$$

W sytuacji szczególnej, kiedy k_j , c_j , m_j i d oraz parametr q_o nie zależą od ilości zakupionej biomasy, iloraz funkcji β i α jest stałą liczbową. Umożliwia to określenie wartości brzegowych, decydujących o opłacalności pozyskania biomasy przez CHP, odpowiednio dla wariantu optymistycznego $K_{r(opt)}$ i wariantu pesymistycznego $K_{r(pes)}$, gdzie:

$$K_{r(pes)}(\mu, M) = \alpha(\mu, M)M(M^{\frac{1}{2}} + \max \frac{\beta}{\alpha}), \quad K_{r(opt)}(\mu, M) = \alpha(\mu, M)M(M^{\frac{1}{2}} + \min \frac{\beta}{\alpha}).$$

Model (16) wyjaśnia też znaczenie długości drogi transportu L w koszcie, bowiem

$$\mu = 1, \text{ czyli } K_w = K_r \Leftrightarrow L = 0,798 \mid \Sigma \mid^{\frac{1}{2}}, \quad \mu > 1, \text{ czyli } K_w > K_r \Leftrightarrow L < 0,798 \mid \Sigma \mid^{\frac{1}{2}},$$

$$\mu < 1, \text{ czyli } K_w < K_r \Leftrightarrow L > 0,798 \mid \Sigma \mid^{\frac{1}{2}} \text{ oraz } L < \mid \Sigma \mid^{\frac{1}{2}} \left(0,798 + \frac{K_r}{M_o \mid \Sigma \mid^{\frac{1}{2}} k_j} \right)$$

Pozwala to sformułować zasadę optymalnego wyboru lokalizacji plantacji.

Bibliografia

- BAKOS G.C., TSIOLIARIDOU E., POTOLIAS C. 2008. Technoeconomic assessment and strategic analysis of heat and power co-generation (CHP) from biomass in Greece. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 32. Iss. 6 s. 558–567.
- BÖRJESSON P.I.I. 1996. Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy*. Vol 11. Iss. 4 s. 305–318.
- FIALA M., PELLIZZI G., RIVA G. 1997. A model for the optimal dimesioning of biomass-fuelled electric power plants. *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 67. Iss. 1 s. 17–25.
- GRAHAM R.L., ENGLISH B.C., NOON C.E., JAGER H.I., DALY M.J. 1997. Predicting switchgrass farmgate and delivered costs: an 11 state analysis. W: *Making a business from biomass in energy, environment, chemicals, fibers, and materials. Proceedings of the third biomass conference of the Americas*. Montréal, Québec, Canada, August 24–29, 1997. T. 2 s. 121–129.
- HOLMREN M., CASAVANT K., JESSUP E. 2007. Review of transportation costs for alternative fuels. SFTA Research Report No. 25. Pullman. Washington State University ss. 55.
- JENKINS B.M. 1997. A comment on the optimal sizing of a biomass utilization facility under constant and variable cost scaling. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 13. Iss.1–2 s. 1–9.
- MARRISON Ch.L., LARSON E.D. 1995. Cost versus scale for advanced plantation-based biomass energy systems in U.S. [online]. U.S. EPA Symposium on Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Research. Washington D.C, 27–29 June 1995. United States Environmental Protection Agency. National Risk Management Research Laboratory. [Dostęp: 29.05.2012]. Dostępny w Internecie: <http://princeton.edu/pei/energy/publications/texts/Cost-vsscale...Marrison-and-Larson.pdf>
- MURPHY J.D., MCCARTHY K. 2005. The optimal production of biogas for use as a transport fuel in Ireland. *Renewable Energy*. Vol. 30. Iss. 14 s. 2111–2127.
- SYGIT M., CHROBAK P., PIELICH M. 2008. Szacowanie kosztów transportu biomasy. W: *Odnawialne źródła energii – szanse i bariery rozwoju* [online]. II Forum Ekologiczne. Stary Węgliniec, 22.10.2008. Wrocław. Wydaw. SYGMA. [Dostęp 08.06.2012]. Dostępny w Internecie: www.cedres.pl/sites/default/files/Szacowanie%20kosztow%20transportu.pdf
- TURSDUN D., KANG S., ÖNAL H., OUYANG Y., SHEFFRAN J. 2009. Optimal biorefinery locations and transportation network for the future biofuels industry in Illinois. W: *Transition to a bio-economy: Environmental and rural development impacts*. Pr. zbior. Red. M. Khanna. Proceedings of Farm Foundations/USDA Conference. St. Louis, Missouri, October 15–16, 2008. Oak Brook. Farm Foundation s. 149–166.
- WALLA C., SCHNEEBERGER W. 2008. The optimal size for biogas plants. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 32. Iss. 6 s. 551–557.

Ryszard Rębowski, Marek Pielich

COST MODEL OF BIOMASS RAISING BY CO-GENERATION CHP UNIT

Summary

The aim of study was to ascertain and investigate basic relations between the quantitative demand for biomass by a CHP (*combined heat and power*) unit and the costs of its raising under conditions of any localization, with particular emphasis put on the role of transport costs. A model was constructed, which enables to describe the ac-

tual costs of raising biomass for a small co-generation CHP unit. The model is based on function of M_o – demand for biomass, and the unitary indices: k_j – costs of loading and transport, c_j – biomass price, m_j – costs of storage. Relations between so-called virtual, and real expenses were described; characteristics of the model was formulated as the μ coefficient of virtual to real cost relation. In particular, the structural form of total unitary cost of biomass raising was defined.

Key words: co-generation CHP unit, crop plantation, biomass raising, virtual cost, real cost

Adres do korespondencji:

dr inż. Ryszard Rębowski
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Witelona
Wydział Zarządzania i Informatyki
ul. Staszica 2/4, 59-220 Legnica
tel. 60 636-82-04; e-mail: rrebowski@poczta.onet.pl