

## MODEL OCENY WARTOŚCI ENERGETYCZNEJ TOPINAMBURU UPRAWIANEGO NA OPAŁ

Tomasz Piskier

*Katedra Agrotechnologii, Politechnika Koszalińska*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono model określający wpływ energii skumulowanej wydatkowanej na założenie plantacji, nawożenie i jej pielęgnację oraz wpływ wielkości współczynnika hydrotermicznego na wartość energetyczną plonu biomasy uprawianej na opał. Wartości energetyczne plonu uzyskane w latach 2008, 2009 wyniosły odpowiednio  $76,54 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , oraz  $78,85 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , natomiast wyliczone wg modelu wyniosły: dla roku 2008 –  $82,28 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a dla roku 2009 –  $77,39 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

**Słowa kluczowe:** model matematyczny, biomasa, energia

### Wprowadzenie

Od szeregu lat prowadzone są badania dotyczące wykorzystania biomasy w celach energetycznych. Uzyskiwane wyniki podlegają jednak bardzo wyraźnym wpływom lokalnym i technologicznym, co skutkuje znaczną rozbieżnością w uzyskiwanych wynikach [Pawlak 2010]. Podejmowane są próby, umożliwiające porównanie wyników produkcyjnych różnych gatunków roślin i technologii ich produkcji. Sposobem umożliwiającym przeprowadzenie takich porównań jest zastosowanie kryteriów ekonomicznych lub energetycznych [Michalek, Kosek 1985; Hryniewicz, Grzybek 2010; Muzalewski 2010]. Biomasa charakteryzuje się niewielką koncentracją energii w jednostce objętości [Warther i in. 2000]. Zjawisko to powoduje szereg problemów związanych z transportem, magazynowaniem i określeniem wielkości produkcji biomasy koniecznej do pokrycia zapotrzebowania energetycznego.

Podejmowane próby modelowania wielkości plonu roślin, wykorzystują m.in. znajomość wilgotności gleby, zawartości w niej azotu mineralnego oraz znajomość cech fizjologicznych poszczególnych gatunków, a nawet odmian roślin [López-Cedrón i in. 2008; Villalobos i in. 1996]. Jednym z bardziej rozbudowanych modeli wykorzystywanych w tym celu, jest model APSIM ujmujący bardzo szczegółowo warunki wzrostu roślin, fotoperiodyzm, jarowizację, reakcję roślin na czynniki stresowe, transpirację o nawet typ fotosyntezy [Wang i in. 2002].

Podejmowane są również próby określenia zależności pomiędzy wielkością nakładów energetycznych, a wielkością plonu roślin uprawianych w warunkach kontrolowanej atmosfery [Hatirli i in. 2005].

W produkcji biomasy przeznaczonej na cele energetyczne, jednym z ważniejszych problemów jest zbiór i transport plonu. W celu usprawnienia tych zadań powstały między innymi modele IBAL – opisany przez Sokhansanj'a [Sokhansanj i in. 2006] oraz MILP – opisany przez Kim'a [Kim i in. 2011].

Model IBSAL dotyczy usprawnienia technologii zbioru, transportu i magazynowania biomasy pochodzenia rolniczego. Zbudowany został skomplikowany system zapewniający systematyczność dostaw biomasy. Uwzględniono szereg czynników takich jak np.; wielkość plonu, sposób i termin zbioru, przebieg faz dojrzewania plonu, nakład energii koniecznej do przeprowadzenia zbioru, warunki meteorologiczne utrudniające zbiór. Występują tutaj dwa podstawowe moduły oceny:

- 1) odbiór i przechowywanie biomasy,
- 2) przygotowanie i transport biomasy z pola do biorafinerii [Sokhansanj i in. 2006]. Praktyczne wykorzystanie modelu IBSAL zastosowano np. w badaniach *Panicum virgatum*, gdzie szczegółowo rozpatrywano dobór technologii zbioru, transportu i magazynowania w zależności od wielkości plonu [Kumar, Sokhansanj 2007].

Model MILP został opracowany pod kątem dostaw biomasy odpadowej np. z produkcji leśnej. Jego podstawowy cel to określenie warunków w jakich opłaca się transport biomasy odpadowej. Opłacalność ta jest uzależniona od np.; rozproszenia źródeł biomasy, wielkości produkcji, odległości transportowych, sposobów transportu (dobór środków). Aspektem modyfikującym opłacalność jest sposób przetworzenia biomasy i pozyskania energii. Przeprowadzając bowiem wysoce sprawne sposoby przetwarzania biomasy, możemy zastosować nieco droższe technologie jej transportu. Model pozwala opracować kompletną logistykę biomasy oraz określić koszty produkcji energii [Kim i in. 2011].

Przedstawione badania i metody umożliwiają określenie wielkości plonu biomasy, kosztów produkcji, nakładów energetycznych, opracowanie logistyki biomasy. W dostępnej literaturze brak jest opracowań umożliwiających określenie wartości energetycznej plonu biomasy na podstawie nakładów energetycznych poniesionych na jej produkcję.

## Cel badań

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie modelu umożliwiającego określenie wartości energetycznej plonu topinamburu, na podstawie nakładów energetycznych poniesionych na jego produkcję.

## Warunki badań

Badania polowe przeprowadzono w latach 2005-2009 w miejscowości Rzepkowo oddalonej o 15 km od Koszalina, na glebie średniozwięzłej, IVa klasy bonitacyjnej. W doświadczeniu badano efektywność energetyczną produkcji topinamburu przeznaczzonego na opał, przy zastosowaniu nawożenia mieszanego (nawożenie kompostem z osadu ściekowego –  $5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  s.m. i równoważna dawka nawożenia mineralnego). Nakłady energetyczne obliczono wg algorytmu opracowanego w Katedrze Agrotechnologii Politechniki Koszalińskiej [Piskier 2010]. Nakłady pracy ludzkiej [ $\text{rbh} \cdot \text{ha}^{-1}$ ] wyliczono jako odwrotność wydajności eksploatacyjnej agregatów stosowanych przy poszczególnych zabiegach agrotechnicznych. Uzyskany wynik pomnożono przez 80, uzyskując nakład energetyczny pracy ludzkiej ( $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Oceniając energochłonność technologii produkcji biomasy, zastosowano metodę analizy procesu, polegającą na ustaleniu ciągu kolejnych zabiegów i operacji technologicznych

[Węgrzyn, Zajac 2008]. Następnie określono sumaryczne nakłady energetyczne dla poszczególnych grup zabiegów, wyróżniając: przygotowanie stanowiska i sadzenie bulw (zakładanie plantacji), nawożenie oraz pielęgnację. Trwałość plantacji topinamburu przyjęto na 10 lat, wartość nakładów energii poniesionej na jej założenie podzielono przez 10 i uwzględniano w równych częściach w poszczególnych latach badań. W każdej grupie zabiegów uwzględniono energię wnoszoną w czterech strumieniach (agregaty, paliwo, praca ludzka i materiały – jeśli były stosowane). Uzyskane wyniki posłużyły do opracowania modelu określającego wartość energetyczną plonu biomasy topinamburu.

Badania weryfikujące model przeprowadzono w latach 2008, 2009 jako polowe doświadczenie łanowe, w którym wartość nakładów energetycznych określono z wykorzystaniem pomiarów bezpośrednich (chronometraż uproszczony – w celu ustalenia wydajności agregatów i pracy ludzkiej, ilości zużytego paliwa określono pomiarem bezpośrednim). Nakład energii skumulowanej obliczono analogicznie, jak w trakcie gromadzenia danych do modelu.

W celu uwzględnienia wpływu warunków klimatycznych, obliczono współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa dla okresu intensywnego wzrostu topinamburu (maj-październik).

## Metodyka

Charakterystykę obiektu badań, na podstawie obserwacji polowych przyjęto za Polańskim [Polański 1984]. Obiektem badań była biomasa (topinambur), jako wielkości wejściowe przyjęto: wartość energii skumulowanej zużytej na założenie plantacji (proporcjonalnie do okresu jej użytkowania), wartość energii skumulowanej zużytej na nawożenie plantacji, wartość energii skumulowanej zużytej na pielęgnację roślin oraz wartość współczynnika hydrotermicznego dla okresu intensywnego wzrostu topinamburu. Warunki glebowe przyjęto jako wielkość stałą, ponieważ doświadczenie przeprowadzono na jednej glebie. Za wielkości zakłócające przyjęto zmiany warunków klimatycznych. Jako wielkość wyjściową przyjęto wartość energetyczną plonu.

Na podstawie wyników obliczeń ustalono zakresy wartości zmiennych reprezentujących właściwości układu (tab. 1).

Tabela 1. Zmienne reprezentujące właściwości układu

Table 1. Representing variables for the system.

Symbol	Wyszczególnienie	Jednostka	Zakres
Czynnik wynikowy			
$E_p$	Wartość energetyczna plonu	$GJ \cdot ha^{-1}$	63,44÷109,56
Czynniki badane			
$E_{zał}$	Nakład energii poniesiony na założenie plantacji (proporcjonalnie do długości okresu jej użytkowania)	$GJ \cdot ha^{-1}$	1,00÷1,11
$E_{na}$	Nakład energii poniesiony na nawożenie	$GJ \cdot ha^{-1}$	11,91÷13,97
$E_{piel}$	Nakład energii poniesiony na pielęgnację plantacji	$GJ \cdot ha^{-1}$	1,10÷1,65
$Wsp_{HT}$	Współczynnik hydrotermiczny		1,497÷2,527

Opracowanie modelu matematycznego obiektu badań przeprowadzono w oparciu o nowoczesne metody planowania eksperymentu i statystyczne opracowanie ich wyników. Postać modelu matematycznego ujmuje wpływ: nakładów energetycznych poniesionych na założenie plantacji jej nawożenie, pielęgnację oraz wielkość współczynnika hydrotermicznego na wartość energetyczną plonu.

$$E_p = f(E_{zał}, E_{na}, E_{piel}, W_{sp_{HT}}) \quad (1)$$

gdzie:

- $E_p$  – wartość energetyczna plonu,
- $E_{zał}$  – nakład energii poniesiony na założenie plantacji (proporcjonalnie do długości okresu jej użytkowania),
- $E_{na}$  – nakład energii poniesiony na nawożenie plantacji,
- $E_{piel}$  – nakład energii poniesiony na pielęgnację plantacji,
- $W_{sp_{HT}}$  – współczynnik hydrotermiczny.

Na podstawie rozważań teoretycznych oraz przeprowadzonej analizy danych, jako model przyjęto wielomian algebraiczny liniowo-kwadratowy z poczwórną interakcją (wg Kukielki 2002).

$$\bar{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i \bar{x}_i + \sum_{i=1}^4 b_{ii} \bar{x}_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^4 b_{ij} \bar{x}_i \bar{x}_j + \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i < j < k}}^4 b_{ijk} \bar{x}_i \bar{x}_j \bar{x}_k + \sum_{\substack{i,j,k,l=1 \\ i < j < k < l}}^4 b_{ijkl} \bar{x}_i \bar{x}_j \bar{x}_k \bar{x}_l \quad (2)$$

Zależność ta po rozpisaniu przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \bar{Y} = & b_0 + b_1 \bar{x}_1 + b_2 \bar{x}_2 + b_3 \bar{x}_3 + b_4 \bar{x}_4 + b_{11} \bar{x}_1^2 + b_{22} \bar{x}_2^2 + b_{33} \bar{x}_3^2 + b_{44} \bar{x}_4^2 + b_{12} \bar{x}_1 \bar{x}_2 \\ & + b_{13} \bar{x}_1 \bar{x}_3 + b_{14} \bar{x}_1 \bar{x}_4 + b_{23} \bar{x}_2 \bar{x}_3 + b_{24} \bar{x}_2 \bar{x}_4 + b_{34} \bar{x}_3 \bar{x}_4 + b_{123} \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \\ & + b_{124} \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 + b_{134} \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4 + b_{234} \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 + b_{1234} \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \end{aligned}$$

W celu wyznaczenia wektora B nieznanymi współczynnikami b w funkcji regresji, skorzystano z następującego związku:

$$\bar{Y} = \widehat{Y}(\bar{x}_n, B) + e \quad (3)$$

gdzie:

- $e$  – nieznaną błąd,
- $\widehat{Y}(\bar{x}_n, B)$  – aproksymacja nieznaną zależności  $\widehat{Y}$

Zadanie polegało na znalezieniu takiego sposobu wyznaczenia wektora nieznanymi współczynników B, aby suma wartości bezwzględnych błędów  $e_n$  była jak najmniejsza. Wymaganie to spełnia postulat najmniejszej sumy kwadratów błędów następującej postaci:

$$S_R = \sum_{n=1}^N e_n^2 \rightarrow \min \quad \text{dla } n = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Następnie zminimalizowano wariancję resztową ( $S_R$ ) względem wektora B i wyliczono współczynniki b.

Model przyjął postać:

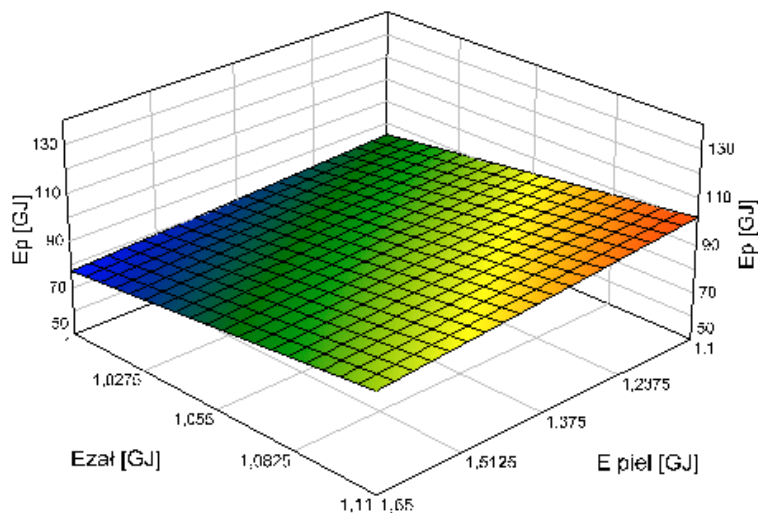
$$E_p = 0,168 + 1,061 \cdot E_{zat} - 2,913 \cdot E_{na} + 0,583 \cdot E_{piel} + 0,537 \cdot W_{sp_{HT}} + 1,551 \cdot E_{zat}^2 - 0,890 \cdot E_{na}^2 + 1,001 \cdot E_{piel}^2 - 1,968 \cdot W_{sp_{HT}}^2 + 4,231 \cdot E_{zat} \cdot E_{na} + 0,759 \cdot E_{zat} \cdot E_{piel} + 1,101 \cdot E_{zat} \cdot W_{sp_{HT}} + 4,400 \cdot E_{na} \cdot E_{piel} + 2,753 \cdot E_{na} \cdot W_{sp_{HT}} - 0,436 \cdot E_{piel} \cdot W_{sp_{HT}} + 6,129 \cdot E_{zat} \cdot E_{na} \cdot E_{piel} + 9,105 \cdot E_{zat} \cdot E_{na} \cdot W_{sp_{HT}} - 0,883 \cdot E_{zat} \cdot E_{piel} \cdot W_{sp_{HT}} - 0,637 \cdot E_{na} \cdot E_{piel} \cdot W_{sp_{HT}} - 7,282 \cdot E_{zat} \cdot E_{na} \cdot E_{piel} \cdot W_{sp_{HT}}$$

gdzie:

- $E_p$  – wartość energetyczna plonu [ $GJ \cdot ha^{-1}$ ],
- $E_{zat}$  – nakład energii poniesiony na założenie plantacji (proporcjonalnie do długości okresu jej użytkowania) [ $GJ \cdot ha^{-1}$ ],
- $E_{na}$  – nakład energii poniesiony na nawożenie plantacji [ $GJ \cdot ha^{-1}$ ],
- $E_{piel}$  – nakład energii poniesiony na pielęgnację plantacji [ $GJ \cdot ha^{-1}$ ],
- $W_{sp_{HT}}$  – współczynnik hydrotermiczny.

Współczynnik dopasowania modelu wynosi  $R=0,98$ .

W oparciu o opracowany model, analizowano wpływ badanych czynników i zachodzących pomiędzy nimi interakcji na wartość energetyczną plonu, poziom ufności wynosił  $\alpha=0,05$ . W niniejszej pracy zamieszczono wyniki przykładowej analizy. Przy założeniu minimalnej wartości współczynnika hydrotermicznego (1,497) oraz minimalnej wartości nakładów energii wniesionej w nawożeniu (11,91  $GJ \cdot ha^{-1}$ ), określano wpływ zmian wartości nakładów energii poniesionych na założenie i pielęgnację plantacji na wartość energetyczną plonu (rys. 1).



Rys. 1. Wpływ zmian wartości nakładów energii poniesionych na założenie ( $E_{zat}$ ) i pielęgnację plantacji ( $E_{piel}$ ) na wartość energetyczną plonu

Fig. 1. The impact of changes in the values of energy expenditures for plantation establishing ( $E_{zat}$ ) and maintenance ( $E_{piel}$ ) on crop energy value.

Nakład energii na pielęgnację plantacji wynoszący  $1,1 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , przy nakładach poniesionych na założenie plantacji wynoszących  $1,11 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  generuje wartość energetyczną plonu na poziomie  $99,91 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Zwiększenie nakładu energii na pielęgnację do  $1,65 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , powoduje zmniejszenie wartości energetycznej polu do  $89,72 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Zależność taka wydaje się nielogiczna, dopóki nie uwzględnimy faktu, że zwiększenie nakładów energetycznych poniesionych na pielęgnację było związane z koniecznością zastosowania ochrony chemicznej plantacji przeciwko zgniliznie twardzikowej.

Ograniczając nakład energii konieczny do założenia plantacji (do wartości  $E_{\text{zat}} = 1,0 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), przy zachowaniu nakładów energii poniesionych na pielęgnację na poziomie  $1,65 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , należy liczyć się ze zmniejszeniem wartości energetycznej plonu do  $77,32 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

### Weryfikacja modelu

Do praktycznej weryfikacji modelu wykorzystano teoretyczne i empiryczne wyniki badań z lat 2008, 2009.

Wartość energetyczna plonu uzyskana w roku 2008 wyniosła  $76,54 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Podstawiając do modelu faktyczne nakłady energii, wniesionej w analizowanych czynnikach wejściowych, z zachowaniem wartości współczynnika hydrotermicznego dla danego okresu badań, obliczony plon wyniósł  $82,28 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Dla danych z roku 2009, model był dokładniejszy. Empirycznie określona wartość energetyczna plonu wyniosła  $78,85 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , natomiast wielkość obliczeniowa wyniosła  $77,39 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Uzyskane wartości zawierają się w przedziale ufności przy  $\alpha=0,05$ .

### Wnioski

1. Zbudowany model pozwala określić wartość energetyczną plonu topinamburu.
2. Zastosowanie modelu umożliwia wyznaczenie wpływu nakładu energii poniesionej na założenie plantacji, jej nawożenie i pielęgnację oraz współczynnika hydrotermicznego na wartość energetyczną plonu.

### Bibliografia

- Hatirli S.A., Ozkan B., Fert C.** 2005. Energy input and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*, vol. 31. Issue 4. pp. 427-438.
- Hryniewicz M., Grzybek A.** 2010. Porównanie jednostkowej energochłonności skumulowanej uprawy wierzby, miskanta i słazowca, Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy, praca zbiorowa pod redakcją A. Grzybek, ITP Warszawa. ISBN 978-83-62416-08-0.
- Kim J., Realff M., Lee J., Whittaaker C., Furtner L.** 2011. Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model, *Biomass and bioenergy* 35. pp. 853-871.
- Kukielka L.** 2002. Podstawy badań inżynierskich, PWN, Warszawa 2002. ISBN 83-01-13749-5.
- Kumar A., Sokhansanj S.** 2007. Switchgrass (*Panicum virgatum*, L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model, *Bioresourte Technology*. Vol. 98. Issue 5. pp. 1033-1044.
- López-Cedrón F.X., BooteK.J., Piñeiro J., Sau F.** 2008. Improving the CERES-Maize Model Ability to Simulata Water Deficit Impact on Maize Production and Yield Components. *Agronomy Journal*. Vol. 100. Issue 2. pp. 296-307.

- Michalek R., Kosek J.** 1985. Uwagi o metodach liczenia energochłonności produkcji rolniczej rachunkiem ciągnionym. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 280, s. 9-23.
- Muzalewski A.** 2010. Koszty i opłacalność produkcji roślin energetycznych – wyniki badań terenowych, Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy, praca zbiorowa pod redakcją A. Grzybek, ITP Warszawa. ISBN 978-83-62416-08-0.
- Pawlak J.** 2010. Efektywność ekonomiczna produkcji biomasy z wierzby wiciowej w świetle badań modelowych, Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy, praca zbiorowa pod redakcją A. Grzybek, ITP Warszawa. ISBN 978-83-62416-08-0. s.158-170.
- Piskier T.** 2010. Algorytm do obliczeń efektywności energetycznej produkcji biomasy. Manuskrypt. Politechnika Koszalin.
- Polański Z.** 1984. Planowanie doświadczeń w technice. PWN Warszawa. ISBN 83-01-04507-8.
- Sokhansanj S., Kumar A., Turhollow A. F.** 2006. Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL). Biomass & Bioenergy. [www.elsevier.com/locate/biombioe](http://www.elsevier.com/locate/biombioe)
- Wang E., Robertson M.J., Hammer G.L., Carberry P.S., Holzworth D., Meinke H., Chapman S.C., Hargreaves J.N.G., Huth N.I., McLean G.** 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. European Journal of Agronomy 18. pp. 121-140.
- Werther J., Saenger M., Hartge E.U., Ogada T., Siagi Z.** 2000. Combustion of agricultural residues, Progress in Energy and Combustion Science. 26.
- Węgrzyn A., Zajac G.** 2008. Wybrane aspekty badań efektywności energetycznej technologii produkcji biomasy roślinnej. Acta Agrophysica 11 (3). s. 799-806.
- Villalobos F.J., Hall A.J., Ritchie J.T., Orgaz F.** 1996. Oilcrop-sun: A development, growth, and yield model of sunflower crop. Agronomy Journal. vol. 88. pp. 403-415.

## THE MODEL OF ENERGY VALUE ASSESSMENT FOR TOPINAMBOUR GROWN FOR FUEL

**Abstract.** The work presents a model determining the impact of cumulated energy expended for establishing a plantation, its fertilising and maintenance, and the influence of hydrothermal coefficient on crop energy value for biomass grown for fuel. Crop energy values obtained in years 2008, 2009 were  $76.54 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , and  $78.85 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectively, whereas the values calculated using the model reached:  $82.28 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  in 2008, and  $77.39 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  in 2009.

**Key words:** mathematical model, biomass, energy

### Adres do korespondencji:

Tomasz Piskier; e-mail: [piskier@poczta.onet.pl](mailto:piskier@poczta.onet.pl)  
Katedra Agrotechnologii  
Politechnika Koszalińska  
ul. Raclawicka 15-17  
75-526 Koszalin