

## MODEL UPRAWY TOPINAMBURU Z PRZEZNACZENIEM NA OPAŁ

Tomasz Piskier

*Katedra Agrotechnologii, Politechnika Koszalińska*

**Streszczenie.** W niniejszym artykule zaprezentowano model matematyczny uprawy biomasy przeznaczonej na cele energetyczne. Budowę modelu oparto o teoretyczne dane wyznaczone w latach 2005-2009 na podstawie prowadzonego doświadczenia polowego. Weryfikacji modelu dokonano w oparciu o dane eksperymentalne uzyskane w oparciu o ścisłe badania polowe prowadzone w latach 2008, 2009.

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

### Wprowadzenie

Wykorzystanie biomasy w energetyce jest uznawane za jeden z ważniejszych sposobów w dążeniu do pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych. Prowadzone jest szereg badań dotyczących przydatności roślin do wykorzystania w energetyce [Yuan i in. 2008; Sulima i in. 2006]. Biomasa jest jednak materiałem obciążonym wieloma cechami fizykochemicznymi utrudniającymi jej stosowanie w energetyce, a podstawowym z nich jest niewielka koncentracja energii w jednostce objętości [Warther i in. 2000; Balatinec 1983]. W produkcji biomasy przeznaczonej na cele energetyczne, za szczególnie ważne należy uznać dążenie do maksymalizacji efektów energetycznych, przy minimalizacji ponoszonych nakładów [Michalek, Kosek 1985]. Aby osiągnąć powyższy cel, należy dokonywać wnikliwej analizy wielkości nakładów energetycznych koniecznych do jej wyprodukowania [Klikocka 2006; Pasyniku 2009]. O wielkości i efektywności produkcji biomasy decyduje wiele czynników [Węgrzyn, Zając 2008], co skłania do stosowania w ocenie jej produkcji wielokryterialnych narzędzi [Skwarcz 2006]. Poprawne zarządzanie produkcją oparte jest na założeniach dotyczących np. spodziewanej wielkości plonu, jego wartości energetycznej czy wielkości poniesionych nakładów. Aby ułatwić te działania należy opracowywać modele pomagające w podejmowaniu decyzji [Bieranowski 2003; Bał, Bieranowski 2005; Bał i in. 2005].

### Cel badań

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie modelu, charakteryzującego pod względem energetycznym, uprawę biomasy z przeznaczeniem na opał.

## Warunki badań

W doświadczeniu polowym, prowadzonym na glebie o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego (IVa klasa bonitacyjna), badano efektywność energetyczną produkcji topinamburu przeznaczonego na opał. Stosując algorytm opracowany w Katedrze Agrotechnologii Politechniki Koszalińskiej [Piskier 2010], wyliczono wielkości nakładów energetycznych wniesionych w postaci paliwa, agregatów oraz materiałów jak również nakłady pracy ludzkiej. Określono również wartość energetyczną plonu. Wyniki badań uzyskane w latach 2005-2009, posłużyły do opracowania modelu energetycznego uprawy topinamburu. W dalszym etapie przeprowadzono analizy weryfikujące model, polegające na przeprowadzeniu lanowego doświadczenia polowego, w którym określając wartość energii skumulowanej posłużono się wynikami z bezpośrednich pomiarów polowych. Pomiarzy te dotyczyły wydajności maszyn i pracy ludzkiej (chronometraż uproszczony), ilości zużytego paliwa (pomiar bezpośredni). Ilość energii wniesionej w formie agregatów i materiałów, wyliczono wg metodyki stosowanej w trakcie gromadzenia danych, które posłużyły do opracowania modelu (wg algorytmu określonego w Katedrze Agrotechnologii Politechniki Koszalińskiej), uwzględniając wydajność maszyn określoną w oparciu o chronometraż uproszczony. Współczynnik hydrotermiczny obliczono dla okresu intensywnego wzrostu topinamburu (maj – październik).

## Metodyka

Dokonując analizy zjawisk i zależności występujących podczas prowadzenia doświadczeń polowych, określono wielkości charakteryzujące obiekt badań (wg Polańskiego 1984). Jako obiekt badań przyjęto biomasę (topinambur), jako wielkości wejściowe przyjęto wartość energii wniesionej w formie agregatów, paliwa i materiałów oraz nakład pracy ludzkiej. Wielkością zakłócającą były warunki klimatyczne (opady i temperatura) panujące w okresie intensywnego wzrostu topinamburu. Jako wielkość stałą przyjęto glebę, ponieważ doświadczenie prowadzone było na jednym typie i gatunku gleby. Za wielkość wyjściową przyjęto wartość energetyczną plonu.

W oparciu o uzyskane wyniki obliczeń ustalono zakresy wartości zmiennych reprezentujących właściwości układu (tab. 1).

Tabela 1. Zmienne reprezentujące właściwości układu  
Table 1. Variables representing the system's properties

Symbol	Wyszczególnienie	Jednostka	Zakres
Czynnik wynikowy			
Pe	Wartość energetyczna plonu	GJ·ha <sup>-1</sup>	0-150
Czynniki badane			
Epal	Nakład energii wniesiony w formie paliwa	GJ·ha <sup>-1</sup>	0-10
Eagr	Nakład energii wniesiony w formie agregatów	GJ·ha <sup>-1</sup>	0-4
Emat	Nakład energii wniesiony w formie materiałów	GJ·ha <sup>-1</sup>	0-10
Esum	Suma nakładów energii (Epal+Eagr+Emat)	GJ·ha <sup>-1</sup>	0-24
Rob	Nakłady pracy ludzkiej	rbh·ha <sup>-1</sup>	0-40
Czynnik zakłócający			
wspT	Współczynnik hydrotermiczny		0-3

Model fizyczny został scharakteryzowany w oparciu o:

- a- zjawiska
  - wzrost rośliny,
  - występowanie agrofagów,
- b- założenia:
  - zakres nakładu robocizny:  $0-40 \text{ rbh}\cdot\text{ha}^{-1}$
  - zakres nakładu energii wniesionej w formie paliwa:  $0-10 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$
  - zakres nakładu energii wniesionej w formie agregatów:  $0-4 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$
  - zakres nakładu energii wniesionej w formie materiałów:  $0-10 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$
  - zakres wartości współczynnika hydrotermicznego:  $0-3$
- c- uproszczenia
  - nie uwzględniono klasy i gatunku gleby, ponieważ topinambur, jako roślina wieloletnia uprawiany był na tym samym polu .

Model fizyczny przyjął postać:

$$Pe = f(E_{sum}, Rob, wspT)$$

### Model matematyczny

Na podstawie rozważań teoretycznych oraz przeprowadzonej analizy danych jako model (wg Kukielka 2002) przyjęto wielomian algebraiczny liniowo-kwadratowy bez interakcji w postaci:

$$\bar{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^s b_i \bar{x}_i + \sum_{i=1}^s b_{ii} \bar{x}_i^2$$

$$\overline{Pe} = b_0 + b_1 \cdot \overline{E_{sum}} + b_2 \cdot \overline{Rob} + b_3 \cdot \overline{wspT} + b_{11} \cdot \overline{E_{sum}}^2 + b_{22} \cdot \overline{Rob}^2 + b_{33} \cdot \overline{wspT}^2$$

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

$$\bar{Y} = \hat{Y}(\bar{x}_n, B) + e$$

gdzie:

e – nieznanymi błąd

$\hat{Y}(\bar{x}_n, B)$  – aproksymacja nieznanymi zależności  $\bar{Y}$

Podstawiając do powyższego wzoru wyniki pomiarów, otrzymano układ równań w postaci:

$$\begin{cases} \bar{Y}_1 = \hat{Y}(\bar{x}_1, B) + e_1 \\ \bar{Y}_2 = \hat{Y}(\bar{x}_2, B) + e_2 \\ \dots \\ \bar{Y}_N = \hat{Y}(\bar{x}_N, B) + e_N \end{cases}$$

W którym występuje (L+N) niewiadomych (tj. L nieznanymi współczynnikami b wektora B oraz N nieznanymi błędami  $e_n$ ).

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

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

Przekształcając powyższy wzór względem  $e_n$  i podstawiając wcześniejszą zależność, otrzymano:

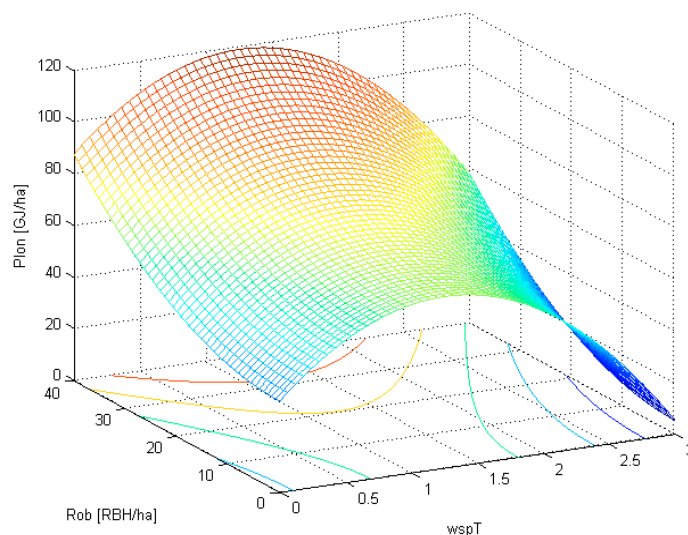
$$S_R = \sum_{n=1}^N e_n^2 = \sum_{n=1}^N [\bar{Y}_n - \hat{Y}_n(\bar{x}_1, B)]^2 \rightarrow \min \quad \text{dla } n = 1 \dots, N.$$

W celu zminimalizowania  $S_R$  względem wektora B nieznanymi współczynników użyto funkcji **fmincon** z Optimization Toolbox pakietu Matlab.

Na podstawie skryptu napisanego w pakiecie Matlab wyliczono współczynniki b, a model przyjął postać:

$$Pe = 4,87 + 49,64 \cdot \text{wsp}_T + 0,09 \cdot E_{\text{sum}}^2 + 0,03 \cdot \text{Rob}^2 - 19,85 \cdot \text{wsp}_T^2$$

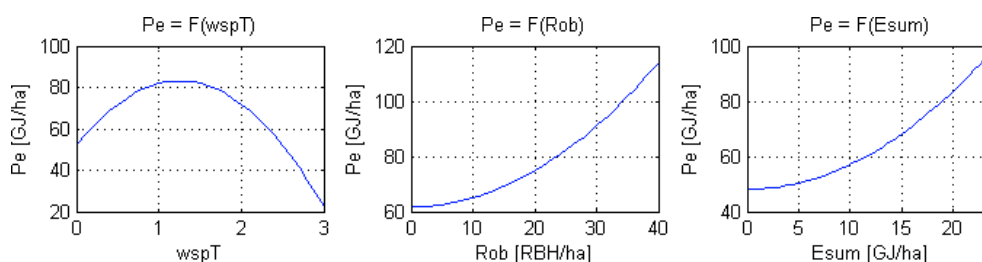
W oparciu o dane z roku 2009 przedstawiono przykładowy wykres (rys. 1) zależności wartości energetycznej plonu od wartości współczynnika hydrotermicznego i nakładu pracy ludzkiej.



Rys. 1. Zależność wartości energetycznej plonu od współczynnika hydrotermicznego i nakładu robocizny (wg danych z roku 2009)

Fig. 1. The relationship between crop energy value and hydrothermal coefficient and labour amount (according to data from 2009)

Rozpatrując wpływ poszczególnych zmiennych na wartość energetyczną plonu, w oparciu o dane z roku 2009, można występujące zależności przedstawić graficznie (rys. 2).



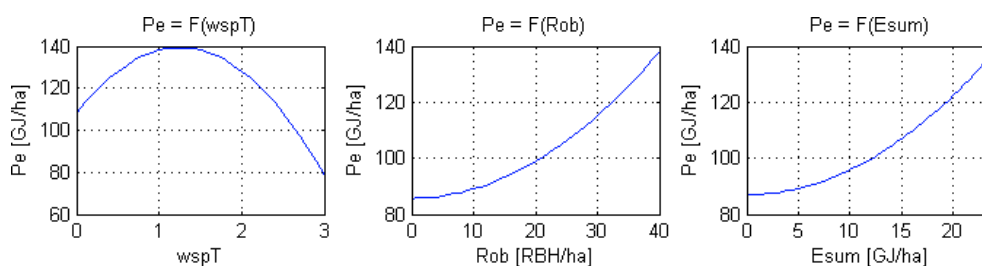
Rys. 2. Wpływ analizowanych zmiennych (wspT – współczynnik hydrotermiczny, Rob – nakład pracy ludzkiej, Esum – skumulowanego nakładu energii) na wartość energetyczną plonu (Pe)

Fig. 2. The impact of analysed variables (wspT – hydrothermal coefficient, Rob – labour amount, Esum – cumulated energy expenditure) on crop energy value (Pe)

### Weryfikacja modelu

Weryfikacja poprawności modelu polegała na obserwacji uzyskanych wyników z przeprowadzonych symulacji dla skrajnych wartości parametrów modelu.

Przyjmując założenia: maksymalnego nakładu energii (Esum = 24) i robocizny (Rob = 40), oraz wartości współczynnika hydrotermicznego (wspT) zawartej w przedziale  $0 \div 3$  stwierdzono, że przy maksymalnym nakładzie pracy ludzkiej i energii oraz przy „neutralnej” wartości współczynnika hydrotermicznego (wspT=1.5) wartość energetyczna plonu wyniesie  $140 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  (rys. 3a). Przy maksymalnym nakładzie energii (Esum = 24) oraz współczynnika hydrotermicznym (wspT) wynoszącym 1.5 („neutralnym”) plon rośnie wraz ze wzrostem nakładu pracy ludzkiej i osiąga wartości  $85 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  dla zerowego nakładu pracy ludzkiej (Rob = 0) oraz  $140 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  dla nakładu pracy ludzkiej kształtującego się na poziomie  $40 \text{ rbh}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Rob = 40) (rys. 3b).



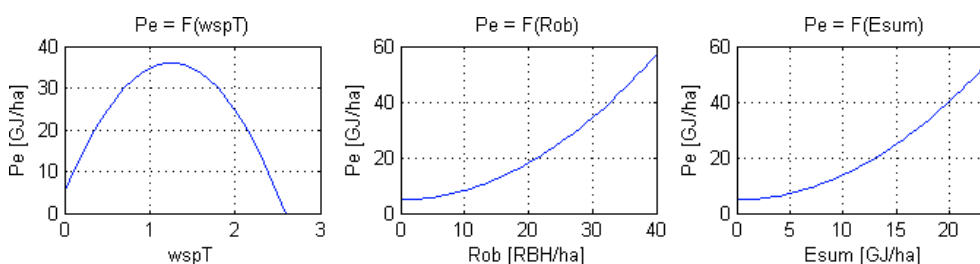
Rys. 3. Wpływ analizowanych zmiennych przyjętych dla danych z górnego zakresu na wartość energetyczną plonu (Pe) (oznaczenia jak na rys. 2)

Fig. 3. The impact of analysed variables assumed for the upper range data on crop energy value (Pe) (symbols as in fig. 2)

Przy maksymalnym nakładzie pracy ludzkiej ( $Rob = 40$ ) oraz wartości współczynnika hydrotermicznego na poziomie 1.5, wartość energetyczna plonu rośnie wraz ze wzrostem nakładu energii ( $E_{sum}$ ) i osiąga wartości  $87 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  dla zerowego nakładu energii ( $E_{sum} = 0$ ), oraz  $140 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  dla maksymalnego nakładu energii z analizowanego przedziału ( $E_{sum} = 24$ ) (rys 3c).

Zakładając, że nie zostaną poniesione nakłady pracy ludzkiej i energii (rys. 4a), spodziewana wartość energetyczna plonu jest bliska zero, dla skrajnych wartości współczynnika hydrotermicznego. Natomiast przy „neutralnej” wartości współczynnika hydrotermicznego ( $wspT=1.5$ ), wartość energetyczna plonu wyniesie  $35 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Przy braku nakładu energii oraz wartości współczynnika hydrotermicznego na poziomie 0 ( $wspT=0$ ), wraz ze wzrostem nakładów pracy ludzkiej wartość energetyczna plonu rośnie od  $5 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  – przy zerowym nakładzie pracy ludzkiej do  $56 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  – przy nakładzie pracy ludzkiej wynoszącym  $40 \text{ rbh}\cdot\text{ha}^{-1}$  (rys. 4b).

Przy braku nakładu pracy ludzkiej ( $rob=0$ ), oraz minimalnej wartości współczynnika hydrotermicznego, wartość energetyczna plonu rośnie wraz ze wzrostem nakładu energii ( $E_{sum}$ ) i osiąga wartości  $5 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  dla sytuacji, w której nie jest wnoszona energia ( $E_{sum} = 0$ ), oraz wartość  $57 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  dla maksymalnego zakresu wnoszonej energii ( $E_{sum} = 24 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) (rys. 4c).



Rys. 4. Wpływ analizowanych zmiennych przyjętych dla danych z dolnego zakresu na wartość energetyczną plonu ( $Pe$ ) (oznaczenia jak na rys. 2).

Fig. 4. The impact of analysed variables assumed for the lower range data on crop energy value ( $Pe$ )

Analizując weryfikację modelu w oparciu o wartości skrajne, należy pamiętać, że w układzie biologicznym, łączne wystąpienie wartości skrajnych ma charakter jedynie hipotetyczny.

Dodatkowym sposobem weryfikacji modelu było porównanie wyników teoretycznych, które zostały użyte do stworzenia modelu z wynikami pochodzącymi ze ścisłych badań polowych. Badania weryfikujące przeprowadzono w latach 2008, 2009.

Wartość energetyczna plonu, uzyskana w roku 2008 wyniosła  $76,54 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , w roku 2009 –  $78,85 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Wartości te posłużyły do opracowania modelu. Podstawiając do modelu wartości faktycznie poniesionych nakładów energetycznych oraz pracy ludzkiej, wyliczono wartość energetyczną plonu, która dla danych z roku 2008 wyniosła  $76,62 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ , natomiast dla danych z roku 2009 –  $80,36 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Uzyskane wyniki (dla  $\alpha=0,05$ ) nie różnią się w sposób istotny od wartości wyliczonych z zastosowanego modelu.

## Wnioski

1. Zbudowany model pozwala określić wartość energetyczną plonu biomasy uprawianej w celach energetycznych na glebie średniozwięzłej, w oparciu o wielkość nakładów energetycznych, pracy ludzkiej i współczynnik hydrotermiczny.
2. Zastosowanie modelu umożliwia wyznaczenie wpływu nakładu energii, pracy ludzkiej oraz współczynnika hydrotermicznego na uzyskaną wartość energetyczną plonu biomasy.

## Bibliografia

- Balatinecz J.J.** 1983, The potential of densification In biomass utilisation, w: Cote WA, editor: Biomass utilization, London, Plenum Press. pp. 181-193.
- Bal R., Bieranowski J., Piechocki J.** 2005. Model systemu wytwarzania i wykorzystania odnawialnych nośników energetycznych pochodzenia rolniczego Cz. I. Model relacyjny systemu wytwarzania i wykorzystania odnawialnych nośników energii. Inżynieria Rolnicza Nr 14. s. 7-14.
- Bal R., Bieranowski J.** 2005. Model systemu wytwarzania i wykorzystania odnawialnych nośników energetycznych pochodzenia rolniczego Cz. II. Model matematyczny i symulacyjny systemu wytwarzania i wykorzystania odnawialnych nośników energii. Inżynieria Rolnicza. Nr 14. s. 15-22.
- Bieranowski J.** 2003. Model systemu utrzymania wybranych maszyn przemysłu rolno-spożywczego. Inżynieria Rolnicza Nr 1 (43). Kraków. s. 9-88.
- Klikocka H.** 2006. Efektywność energetyczna różnych sposobów uprawy roli i nawożenia naturalnego w produkcji ziemniaka. Acta Agrophysica 8 (2). s. 385-393.
- Kukielka L.** 2002. Podstawy badań inżynierskich. PWN. Warszawa ISBN 83-01-13749-5.
- Michalek R., Kosek J.** 1985. Uwagi o metodach liczenia energochłonności produkcji rolniczej rachunkiem ciągnionym. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Z. 280. s. 9-23.
- Pasyniuk P.** 2009. Problemy organizacji zbioru wierzby krzewiastej na cele energetyczne. Problemy Inżynierii Rolniczej 1(63). s.105-112.
- Piskier T.** 2010. Algorytm do obliczeń efektywności energetycznej produkcji biomasy. Manuskryp. Politechnika Koszalin.
- Polański Z.** 1984. Planowanie doświadczeń w technice. PWN Warszawa. ISBN 83-01-04507-8.
- Skwarcz J.** 2006. Założenia nowej metody doboru maszyn do produkcji rolniczej. Inżynieria Rolnicza Nr 13(88). Kraków. s. 423-428.
- Sulima P., Przyborowski J.A., Stolarski M.** 2006. Ocena przydatności wybranych gatunków wierzby do celów energetycznych. Fragmenta Agronomica (XXIII) nr 3(91). s. 290-299.
- 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.
- Yuan J. S., Tiller K. H., Al-Ahmad H., Stewart N. R., Stewart C. N. Jr.** 2008. Plants to power: bioenergy to fuel the future. Trends in Plant Science. Vol. 13. No. 8. s. 421-429.

## **A MODEL OF TOPINAMBOUR CULTIVATION FOR FUEL PURPOSES**

**Abstract.** This article presents a mathematical model of biomass growing for energy production purposes. Construction of the model has been based on theoretical data acquired between years 2005 and 2009 as a result of completed field experiment. The model has been verified on the basis of experimental data obtained in the outcome of a precise field research carried out in years 2008 and 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 Koszalin  
ul. Raławicka 15-17  
75-526 Koszalin