

dr inż. Elżbieta Malinowska,
dr inż. Beata Wiśniewska-Kadzajan,
prof. dr hab. Kazimierz Jankowski,
dr inż. Jacek Sosnowski
prof. nzw. dr hab. inż. Henryk Wyrębek
Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach

Ocena przydatności biomasy różnych roślin na cele energetyczne

Evaluation of the usefulness of biomass of different crops for energy

Streszczenie: Energia biomasy jest obecnie najważniejszym i najmniej kapitałochłonnym źródłem energii odnawialnej (OZE). Jej udział w strukturze wykorzystania OZE przekracza 98%. Spalanie biomasy jest uważane za korzystniejsze dla środowiska niż spalanie paliw kopalnych, gdyż zawartość szkodliwych pierwiastków w biomasie jest niższa, a powstawanie w procesie spalania dwutlenku węgla jest zredukowane niedawnym pochłanianiem go przez rosnące rośliny. Obecnie, coraz częściej obok upraw roślin wieloletnich, wdrażane są gatunki o jednorocznym cyklu zbioru. Zaletą uprawy gatunków jednorocznych jest możliwość utrzymywania właściwego płodozmianu, łatwiejsze dostosowanie się do koniunktury rynkowej oraz wykorzystanie posiadanych maszyn, urządzeń i budynków, natomiast wadą – niższa efektywność energetyczna w porównaniu do upraw wieloletnich. Niniejszy artykuł stanowi syntezę danych dotyczących wartości energetycznej 17 różnych roślin, a zwłaszcza wielu gatunków należących do traw.

Słowa kluczowe: rośliny energetyczne, biomasa, wartość opałowa, energia odnawialna

Abstract: Biomass energy is the most significant and least capital intensive Polish renewable energy source (RES). Its share in the use of renewable energy exceeds 98%. Biomass is considered to be better for the environment than burning fossil fuels, as the content of harmful elements in the biomass is lower, and the formation of the combustion of carbon dioxide is reduced by the recent absorption of himgrowing plants. Currently, more and more often next perennial, are implemented on a one-year cycle of the species set, such as grass. The advantage of one-crop species is the possibility to maintain proper crop rotation, easier to adapt to market condition and the use of their machinery, equipment and buildings, while the downside, lower than the energy efficiency compared to perennial crops. This article is a synthesis of data on the energy value of 17 different plants and especially many species belonging to the grass.

Keywords: energy crops, biomass, energy value, renewable energy

Wstęp

Warunkiem przetrwania życia na Ziemi, poza czystym powietrzem oraz racjonalnym wykorzystaniem ziemi i innych zasobów rzeczowych, jest pozyskanie energii. Współczesna cywilizacja charakteryzuje się wysokim i to rosnącym

zużyciem energii konsumowanej w różnej postaci¹. Przez tysiąclecia wydawało się, że zasoby paliw na ziemi w paliwa są nieograniczone. Stale też rozszerzano wachlarz surowców energetycznych. Poza tradycyjnymi, typu drewno, słoma, czy woda i wiatr, zastosowanie znalazł węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny oraz energia jądrowa². Poszukiwania nowych możliwości pozyskania nośników energii coraz częściej kierowane są w stronę rolnictwa. Radziejewicz³ podaje, że biomasa jest obecnie najważniejszym polskim źródłem energii odnawialnej. Jej udział w strukturze wykorzystania odnawialnych źródeł energii OZE przekracza 98%. Dotychczas zasadniczą część biomasy pochodziła z lasów. Jednak chociażby z uwagi na potrzeby prowadzenia racjonalnej gospodarki leśnej zasoby drewna na cele energetyczne są ograniczone. Fakt ten, w zestawieniu z rosnącym zapotrzebowaniem na biomasę, wywołał zainteresowanie tzw. plantacjami energetycznymi, zakładanymi na terenach rolniczych^{4,5,6}. Mogą być one obsadzone gatunkami jednorocznymi i wieloletnimi⁷.

Spalanie biomasy jest uważane za korzystniejsze dla środowiska niż spalanie paliw kopalnych, gdyż zawartość szkodliwych pierwiastków (przede wszystkim siarki) w biomacie jest niższa, a powstanie w procesie spalania dwutlenku węgla jest zredukowane niedawnym pochłanianiem przez te rośliny CO₂^{8,9}. Natomiast dwutlenek wprowadzony do środowiska przy spalaniu paliw kopalnych jest dodatkowym dwutlenkiem węgla wnoszonym do atmosfery, zwiększającym globalne ocieplenie. Wadą biomasy stosowanej do spalania jest emisja metali ciężkich.

Energia biomasy jest najmniej kapitałochłonnym odnawialnym źródłem energii. Jej produkcja może praktycznie przebiegać samoistnie, np. w puszczech, na stepach i łąkach, a także w oceanach i w zbiornikach wody słodkiej. Aby zintensyfikować produkcję biomasy, potrzebne są dodatkowe nakłady związane z nawożeniem, nawadnianiem, walką ze szkodnikami i ochroną roślin. Energia uzyskiwana z biomasy stanowi 15% światowego zużycia energii, przy czym w krajach rozwijających się udział ten jest większy i wynosi aż 38%. Biomasa roślinna jest produktem procesu fotosyntezy - asymilacji przez rośliny, pod wpływem dwutlenku węgla (CO₂) z powietrza, promieniowania słonecznego, podczas której tworzy się energia biomasy w postaci energii chemicznej. Wydzielony podczas spalania biomasy CO₂, na skutek fotosyntezy, krąży

¹ M. Renigier-Biżozor, K. Góbczyński, 2010. Możliwość wykorzystania odnawialnych źródeł energii w gospodarowaniu nieruchomościami mieszkaniowymi w Polsce na tle innych krajów – cz.I. Acta Sci. Pol., „Administratio Locorum” 9 (4) /2010, s. 107-120.

² A. Skrobaccki, *Produkcja biomasy – wybrane problemy*, „Wies Jutra”, Warszawa 2009.

³ J. Radziejewicz, *Elektroniczny Magazyn Rolniczy*, Warszawa 2009.

⁴ N. El Bassam, *Possibilities and limitation of energy supply from biomass*, „Natural Resources Development”, 41/1995, s. 8-21.

⁵ A. Hastings, J.C.Clifton-Brown, M. Wattenbach, P. Stampfl, C.P. Mitchell, P. Smith, *Potential of Miscanthus grasses to provide energy and hence reduce greenhouse gas emissions*, „Agron. Sustain. Dev.”, 28/2008, s. 465–472.

⁶ A. Węgrzyn, G. Zając, *Selected aspects of research on energetic effectiveness of plant biomass production technology*, „Acta Agroph”. 158, 11(3)/2008, s. 799-806.

⁷ B. Sawicki, B. Kościk, *Trawy i zbiorowiska trawiaste*, [w:] *Rośliny energetyczne*, red. B. Kościk (red.) Wyd. AR Lublin 2003.

⁸D. Kalembasa, A. Janinhoff, E. Malinowska, D. Jaremko, S. Jeżowski, *Zawartość siarki w wybranych klonach trawy Miscanthus*. *J. Elem.*, 10 (2)/2005, s. 309–314.

⁹ I. Niedziółka, A. Zuchniarz, *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, *Motrol*, 8A/2006, s. 232-237.

w przyrodzie w obiegu zamkniętym. Spalanie biomasy jest procesem odnawialnym, a przez to nie powodującym wzrostu CO₂ w atmosferze – nie powiększa efektu cieplarnianego¹⁰.

Według Jabłońskiego¹¹, na całym świecie trwają ciągle poszukiwania odnawialnych źródeł energii (OZE). W traktacie akcesyjnym o przystąpieniu do Unii Europejskiej Polska zadeklarowała wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w produkcji energii elektrycznej do 14% w 2020 roku¹². Rolnicy szukają na tym rynku szansy dla swoich gospodarstw. Są nią m.in. rośliny energetyczne, czyli te, które mogą być uprawiane jako potencjalne paliwo, np. na biomasę dla kotłowni.

Biomasą może być nie tylko drewno grube. Może nią być także słoma, trawy i inne rośliny, gdyż zapewnia:

- osiągnięcie celów założonych w polityce ekologicznej państwa w zakresie zmniejszania emisji zanieczyszczeń wpływających na zmiany klimatyczne,
- obniżenie emisji gazów cieplarnianych oraz ograniczenie szkód w środowisku związane z wydobyciem paliw kopalnych,
- stałe i pewne dostawy krajowego nośnika energii,
- tworzenie nowych miejsc pracy, szczególnie ważnych na zagrożonej bezrobociem wsi,
- zagospodarowanie nieużytków i spożytkowanie odpadów rolnych i produkcyjnych,
- uzyskanie dochodu, który jest trudny do osiągnięcia przy nadprodukcji żywności,
- decentralizację produkcji energii i tym samym większe bezpieczeństwo energetyczne przez poszerzenie oferty producentów energii¹³.

Gradziuk¹⁴ podaje, że efektem prowadzonych w różnych krajach badań nad nie żywnościowym wykorzystaniem produktów rolniczych jest długa lista roślin uprawnych, które mogą znaleźć zastosowanie w kilkunastu branżach i gałęziach przemysłu. Większość z nich może być zalecana do uprawy również w Polsce, w tym także na glebach marginalnych, które nie mogą być efektywnie wykorzystane rolniczo.

Według Gańko¹⁵ pożądane cechy roślin uprawianych na cele energetyczne to przede wszystkim: duży przyrost roczny, wysoka wartość opałowa, znaczna odporność na choroby i szkodniki. Ponadto, rośliny te powinny charakteryzować się stosunkowo niewielkimi wymaganiami glebowymi, ponieważ pod ich uprawę będą przeznaczane przede wszystkim grunty niskiej jakości. Niezwykle istotną sprawą jest również możliwość mechanizacji prac agrotechnicznych związanych z zakładaniem plantacji oraz zbieraniem plonu. Obecnie do najpopularniejszych roślin użytkowanych na cele energetyczne w Europie należą rzepak oraz słonecznik, służące do produkcji biodiesla, a także pszenica, ziemniaki oraz

¹⁰ E. Nalborczyk (red.), *Nowe rośliny uprawne na cele spożywcze, przemysłowe i jako odnawialne źródła energii*, SGGW, Warszawa 1996.

¹¹ R. Jabłoński, *Ciepło pachnące różą*, „Agroenergetyka” Osielsko nr 2/2003.

¹² Ustawa z dn. 2 kwietnia 2004 roku *Zmiana ustawy – Prawo Energetyczne oraz Prawo Ochrony Środowiska*, Dz. U. nr. 91, poz. 875.

¹³ www.ecbartos.pl 2010.

¹⁴ P. Gradziuk, *Produkcja biomasy na cele nieżywnościowe jako perspektywistyczny kierunek działalności gospodarstw rolniczych*, „Wieś Jutra”, 6, s. 34-62.

¹⁵ E. Gańko, *Uwarunkowania rozwoju*, „Agroenergetyka” Osielsko nr 3.

buraki cukrowe wykorzystywane do produkcji bioetanolu. Wyżej wymienione rośliny, to rośliny jednoroczne, które tradycyjnie są uprawiane na potrzeby żywnościowe. W ostatnich latach coraz większą uwagę poświęca się jednak roślinom wieloletnim na cele energetyczne, takim jak: drzewa szybko rosnące (wierzba, topola, eukaliptus), wieloletnie trawy i trzcin (mozga trzcionowata, miskant olbrzymi) oraz wieloletnie byliny dwuliścienne (topinambur, ślazowiec pensylwański, rdesty). Rośliny te obecnie są głównie źródłem biopaliw stałych do wytwarzania ciepła i energii elektrycznej, jednak w dłuższej perspektywie będą służyły także do produkcji ciekłych paliw transportowych. W porównaniu do roślin jednorocznych główne zalety plantacji roślin wieloletnich to: relatywnie wysokie plony, niższe koszty założenia plantacji (w przeliczeniu na jeden rok) oraz mniejszy negatywny wpływ na środowisko związany z mniejszą intensywnością zabiegów polowych w trakcie uprawy tych roślin^{16,17,18}.

W Polsce do najpopularniejszych roślin wieloletnich przeznaczonych na cele energetyczne należy przede wszystkim wierzba krzewiasta, a także topinambur, miskant, ślazowiec pensylwański i róża bezkolcowa. Wiele roślin testowanych jest w ośrodkach naukowo-badawczych na polach doświadczalnych, m.in. w Instytucie Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach, Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytucie Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Bydgoszczy, Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie, Instytucie Nauk Rolniczych w Zamościu i Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie¹⁹.

Radziejewicz²⁰ wyjaśnia, że pod pojęciem roślin energetycznych rozumie się takie rośliny, które uzyskują duże przyrosty biomasy w relatywnie krótkim okresie czasu. Tendencje rozwoju energetyki obserwowane na przełomie wieków pozwalają na postawienie tezy, iż konwencjonalne źródła energii przyczyniają się w dużym stopniu do degradacji środowiska przyrodniczego i dlatego konieczna jest zmiana systemów wytwarzania energii i odstępianie od surowców kopalnych na rzecz odnawialnych. Wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych jest jednym z istotnych komponentów zrównoważonego rozwoju, przynoszącym wymierne efekty ekologiczne, gospodarcze oraz społeczne. Należą do nich m.in.: ograniczenie emisji zanieczyszczeń, zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego, stworzenie nowych miejsc pracy oraz promowanie rozwoju regionalnego.

Szczególnie cenne są tu rośliny typu C4 fotosyntezy, które charakteryzują się wysokim potencjałem plonowania, zwiększoną absorpcją CO₂ oraz oszczędnym gospodarowaniem wodą.

Ten rodzaj metabolizmu jest często spotykany u traw pochodzących z Azji oraz Ameryki Północnej. Różnice w budowie anatomicznej organów asymilacyjnych roślin C4 są wynikiem przystosowania do wydajnego wiązania CO₂ w środowiskach kserofitycznych o ograniczonej wilgotności, wysokiej temperaturze

¹⁶ E. Nalborczyk (red.), *Nowe rośliny uprawne na cele spożywcze, przemysłowe i jako odnawialne źródła energii*, SGGW, Warszawa 1996.

¹⁷ G. Harasimowicz- Hermann, J. Hermann, *Uprawa wierzby krzewiastej na cele energetyczne alternatywą dla spalania słomy i zachowania żyzności gleby*, Wyd. UTP, Bydgoszcz 2007, s.72.

¹⁸ A. Kotecki, *Uprawa miskanta olbrzymiego. Energetyczne i pozaenergetyczne możliwości wykorzystania słomy*, Wyd. UWP, Wrocław 2010, s. 186.

¹⁹ E. Gańko, *Uwarunkowania rozwoju*, „Agroenergetyka” Osielsko nr 3/2005.

²⁰ J. Radziejewicz „Elektroniczny Magazyn Rolniczy” Warszawa 2009.

i silnym nasłonecznieniu^{21,22}. Produkcja biomasy roślin energetycznych przyczynia się do ograniczenia efektu cieplarnianego²³ i sekwestracji związków węgla w glebie²⁴.

Podkreśla się kilkakrotnie mniejszą zawartość popiołu pozostającego po spalaniu słomy pochodzącej z wieloletnich traw C4 w porównaniu ze słomą zbóż i wieloletnich, rodzimych traw typu C3 – mozgi trzcinowatej (*Phalaris arundinacea*) i trzciny pospolitej (*Phragmites australis*). Słomę z traw C4 można więc traktować jak biomasę z plantacji szybko rosnących drzew^{25,26}.

Majtkowski²⁷ uważa, że trawy z uwagi na powszechność występowania, różnorodność i wielofunkcyjność należą do najważniejszej grupy roślin. Zbiorowiska trawiaste obok lasów, w procesie fotosyntezy wytwarzają największą biomasę, kumulując odnawialną energię słoneczną. Z uwagi na spadek pogłowia przeżuwaczy coraz większe znaczenie powinno mieć wykorzystanie biomasy traw do celów energetycznych. Szeroka amplituda siedliskowa, w której występują trawy, pozwala na dobór gatunków do zagospodarowania terenów marginalnych, od ubogich piasków (stokłosa bezostna, kostrzewa trzcinowa) po gleby okresowo zalewane (np. mozga trzcinowata). W tych skrajnych warunkach trawy osiągają plony w granicach 10-15 t s.m. · ha⁻¹.

Według Gutowskiej²⁸ w Polsce funkcjonuje już wiele kotłowni, w których spalana jest słoma. W zasadzie nie ma istotnych przeszkód, ażeby spalać w nich biomasę uzyskaną z traw na trwałych i przemiannych użytkach zielonych. Spośród traw rodzimych ciekawą perspektywę stanowi energetyczne użytkowanie zbiorowisk szuwarowych, a w tym manny wodnej i trzciny pospolitej z naturalnych stanowisk. Subocz i Kopczyński²⁹ podają, że ciekawym sposobem produkcji biomasy energetycznej na gruntach ornych może uprawa kupkówki pospolitej. W wielu badaniach własnych i innych – plony suchej masy zebranej w trzech pokosach i zastosowaniu 200 kg·ha⁻¹ azotu mineralnego, wyniosły średnio 12 t·ha⁻¹. Przy czym doświadczenia te prowadzone na glebie IVb klasy bonitacyjnej bez deszczowania.

Dobrym źródłem energii jest mozga trzcinowata, znosząca długotrwałe zalewy powierzchniowe. Jedyna odmiana tej trawy w Polsce – Motycka, doskonale reaguje na zwiększone nawożenie azotowe. W latach 90. w krajach UE zrealizowano program hodowlany ukierunkowany na wyodrębnienie ekotypów

²¹ W. Majtkowski, *Przydatność wybranych gatunków traw typu C4 do upraw alternatywnych w Polsce*, „Hod. Roślin Nasien”, 2/1998, s. 41-44.

²² E. Sacala, *Miscanthus - unusual grass: biochemical and physiological characteristic*, “A review. Ecol. Chem. Eng. A”, 18(12)/2011, s. 1615-1624.

²³ E. Coetto, *Grasslands for bioenergy production*, “A review, Agron., Sustain. Dev.” 28/2008, s. 47-55.

²⁴ D.K. Benbi, J.S. Brar, *A 25-year record of carbon sequestration and soil properties in intensive agriculture*, “Agron. Sustain. Dev.”, 29/2009, s. 257-265.

²⁵ R. Samson, P. Duxbury, L. Mulkins, *Research and development of fibre crops in cool season regions of Canada*, Final Conference COST 814 Crops development for cool and wet regions of Europe. G. Parente, J. Frame (eds.) Pordenone 2000, Italy 10-13.05.2000, 555-565.

²⁶ G.Majtkowska, W. Majtkowski, *Trawy źródłem energii*, Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin. Bydgoszcz 2008.

²⁷ W. Majtkowski, *Bioróżnorodność upraw energetycznych. Podstawy zrównoważonego rozwoju*, „Probl. Inż. Roln.” nr 2/2006, s. 25-36.

²⁸ A. E. Gutowska, *Rośliny energetyczne – trawy*, „Informator mazowiecki”, czerwiec 2005.

²⁹ S. Subocz, J. Kopczyński, *Dobór roślin do produkcji bioenergetycznej masy na terenie Pomorza Zachodniego*, „Inż. Roln.”, nr 1 (110)/2009, 303-309.

przydatnych do produkcji biomasy na cele energetyczne i została wykreślona z Listy Odmian Roślin Uprawnych³⁰.

Pilarczyk podaje, że także żyto kępkowe („żyto o łamliwej osadce kłosowej kępkowej”) ma zastosowanie w uprawie pod kątem opałowym. Z uwagi na wartość wysokoenergetyczną, a nie wysoko białkową, jest idealnym surowcem w produkcji biogazu. Wytwarza w procesie fermentacji stosunkowo dużo metanu a mało amoniaku. Wielorakie zastosowanie oraz walory tej rośliny wskazują, że jest ona idealna do zagospodarowania dotychczasowych wieloletnich odłogów, zaniedbanych łąk czy nieużytków³¹.

Oddzielnym zagadnieniem są introdukowane gatunki traw, takie jak: miskant olbrzymi, miskant cukrowy, spartina preriowa czy palczatka Gerarda. Podobnie jak inne gatunki typu C4, spartina preriowa brana jest pod uwagę jako potencjalna roślina energetyczna (biopaliwo) do uprawy w Europie³².

Jak podaje Majtkowski³³, w uprawie prosa różgowego na cele energetyczne wykorzystywane są odmiany naturalne i modyfikowane, osiągające znacznie wyższe przyrosty biomasy. Wykorzystywane jest ono jako biopaliwo i równie dobrze sprawdza się jako surowiec do produkcji etanolu.

Z jednej tony prosa różgowego można potencjalnie wyprodukować 380 litrów etanolu. To daje potencjał wyprodukowania ok. 9500 litrów etanolu z hektara, w porównaniu do ok. 6200 litrów z hektara trzciny cukrowej i około 3800 litrów z hektara kukurydzy. Trwa jednak debata nad ekonomicznością produkcji etanolu z prosa różgowego. Według polskiego profesora Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley, Tadeusza Patzka, produkcja etanolu z prosa różgowego ma negatywny bilans energetyczny – wymaga 45% więcej energii niż zawiera wyprodukowane paliwo. Inny profesor tego uniwersytetu, Richard Muller, zauważa w swej opublikowanej w 2007 roku publikacji, że proces produkcji etanolu z prosa różgowego jest bardzo niewydajny. Zauważa też, że trwają prace nad zwiększeniem wydajności przez zastosowanie bakterii do bardziej efektywnej zamiany celulozy w etanol³⁴.

Za podjęciem uprawy miskanta olbrzymiego przemawia jego dynamiczny wzrost począwszy od posadzenia, niewielkie wymagania nawozowe oraz długi okres plonowania na względnie stałym poziomie^{35,36}. Szczególnie istotne jest małe zapotrzebowanie na wodę (2-3 tys. m³ rocznie na 1 ha uprawy), co ma szczególne znaczenie przy bardzo ograniczonych zasobach wodnych naszego kraju. Przeciętna wydajność kilkuletniej plantacji kształtuje się na poziomie 20 ton biomasy z 1 ha, przy wilgotności około 20%. Wartość opałowa takiego paliwa wynosi od 14 do 17 MJ · kg⁻¹³⁷.

³⁰ www.biomassstradecentres.eu , 2010.

³¹ www.zytostuletnie.pl , 2007.

³² www.ihar.edu.pl , 2011.

³³ W. Majtkowski, *Bioróżnorodność upraw energetycznych. Podstawy zrównoważonego rozwoju*, „Probl. Inż. Roln.”, nr 2/2006, s. 25-36.

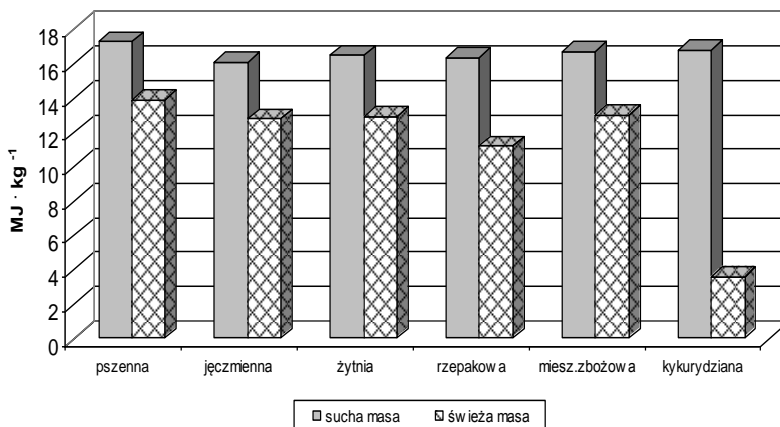
³⁴ www.wikipedia.pl.

³⁵ D. Kalembasa, E. Malinowska, D. Jaremko, S. Jeżowski, *Wpływ nawożenia NPK na strukturę plonu traw Miscanthus ssp.*, „Biuletyn IHAR”, nr 234/2004, s. 205-211.

³⁶ E. Malinowska, D. Kalembasa, 2013. *Contents of some selected elements in Miscanthus sacchariflorus (Maxim.) Hack biomass under the influence of sewage sludge fertilization in cultivation experiment*, “Ecol. Chem. Eng.”, A 20 (2) /2003, s. 203-211, DOI: 10.2428/ecea. 213 (02) 021.

³⁷ D. Kalembasa, E. Malinowska, *Wpływ dawek osadu ściekowego na plon biomasy trawy Miscanthus sacchariflorus (Maxim.) Hack., zawartość siarki oraz wartość energetyczną*, „Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.”, nr 533, s. 171-179.

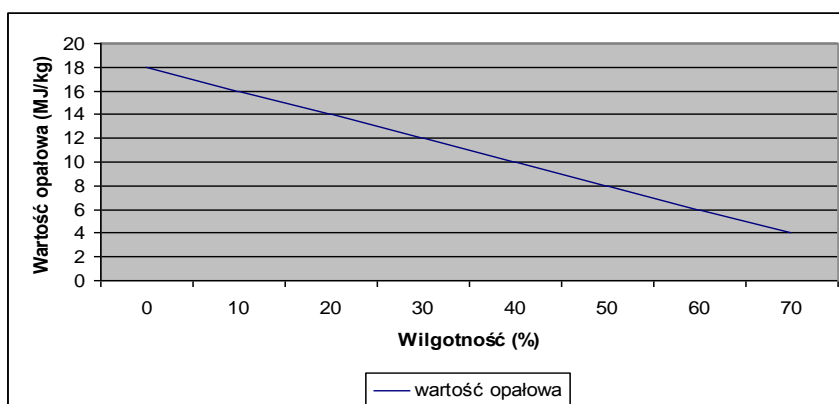
Wartość opałowa słomy zbóż (rys. 1) kształtuje się na podobnym poziomie od $16,1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla słomy jęczmiennej do $17,3 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ dla słomy pszennej. Wilgotność słomy pszennej i jęczmiennej kształtuje się na poziomie 12-22%, a wartość opałowa świeżej słomy tych gatunków od $12,0$ do $14,9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, dla słomy rzepakowej jest niższa $11,2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.



Rysunek 1. Wartość opałowa słomy z różnych zbóż

Źródło: I. Niedziółka, A. Zuchniarz, *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, Motrol 2006, 8A, 232-237.

Z powodu dużej wilgotności słomy kukurydzianej jej wartość opałowa jest bardzo niska i wynosi od $3,3$ do $7,2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Wzrost wilgotności siana (rys. 2) wpływa wprost proporcjonalnie na zmniejszenie jego wartości opałowej. Wartość opałowa siana suchego wynosi około $18 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, natomiast przy 70% wilgotności wartość opałowa spada do około $4 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.



Rysunek 2. Zależność wartości opałowej od wilgotności

Źródło: I. Niedziółka, A. Zuchniarz, *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, Motrol, 8A, 2006, s. 232-237

Dreszer i in.³⁸ w swych badaniach stwierdzili, że wartość opałow sły jako paliwa energetycznego uzależniona jest nie tylko od jej gatunku i wilgotności, ale również od techniki przechowywania (tab. 1).

Tabela 1. Właściwości sły żółtej i szarej

Rodzaj sły	Wilgotność	Wartość energetyczna MJ·kg ⁻¹	Zawartość popiołu % s.m.
Sły żółta	10-20	14,3	4,0
Sły szara (pozostawiona na polu – działanie warunków atmosferycznych)	10-20	15,2	3,0

Źródło: I. Niedziółka, A. Zuchniarz, *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, Motrol, 8A, 2006, s. 232-237

Z danych dotyczących porównania wydajności biogazu z traw łąkowych do innych roślin uprawnych wynika, że ich znaczenie w produkcji paliw z roślin energetycznych jest dość znaczące. Asortyment biopaliw dostępnych na rynku przedstawia tabela 2. Biomase z siana spotkać można w postaci peletów, brykietów, balach i luzem, przy czym pelety odznaczają się najwyższą wartością opałow (16,7 GJ · t⁻¹), niewiele niższą od peletów z drzewa, która wynosi 18,6 GJ · t⁻¹. Natomiast biomase najmniej przydatną (9 GJ · t⁻¹) pod względem wartości opałowej jest kora drzew. Równie dobrym rodzajem paliwa jest biomasa ze sły, w której najlepszym paliwem są również pelety o wartości opałowej 17,0 GJ · t⁻¹. Wśród rodzajów biopaliwa znaczącą pozycję zajmuje biopaliwo gazowe (metan), którego wartość opałow wynosi 23,6 GJ · m⁻³ oraz biopaliwa płynne, których wartość opałow szacuje się średnio na poziomie około 35,0 GJ · m⁻³ (tab. 2.)

Z jednego hektara traw, przy plonie wynoszącym średnio około 70 ton, można uzyskać wydajność biogazu na poziomie 6650 m³ · ha⁻¹. Wydajność biogazu z traw łąkowych jest niższa niż z buraków pastewnych (8000 m³ · ha⁻¹), natomiast bardzo zbliżona do wydajności biogazu z kukurydzy (6750 m³ · ha⁻¹). W porównaniu do traw, znacznie niższą wydajność biogazu z hektara ma ziarno pszenicy (4200 m³ · ha⁻¹), tyle że wysokość plonów pszenicy jest dziesięć razy niższa niż traw. Jednak już GPS z pszenicy, a także CCM z kukurydzy posiada podobną wydajność biogazu z hektara (tab. 3.).

³⁸ K. Dreszer, R. Michałek, A. Roszkowski, *Energia odnawialna – możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie*, Wyd. PTIR, Kraków-Lublin-Warszawa 2003.

Tabela. 2 Dostępne na rynku biopaliwa³⁹

Rodzaj paliwa	Jednostka	Paliwo	Wartość opałowa [GJ/jm]
biomasa – siano	t	siano luzem	12,0
		siano w balach	12,0
		brykiety z siana	15,0
		pelety z siana	16,7
biomasa – słoma	t	słoma luzem	13,0
		słoma w balach	13,0
		brykiety ze słomy	15,2
		pelety ze słomy	17,0
biomasa – drewno	t	pelety z drewna	18,6
		zrębki drewna	13,0
		szczepki drewna	13,0
		kora	9,0
		pył drzewny	17,0
		brykiety z drewna	16,7
biomasa – inne	t	odpady biologiczne	10,0
		ziarno energetyczne	17,5
		masa mięsno – kostna	17,5
biopaliwo gazowe	m ³	metan	23,6
biopaliwo płynne	m ³	ester metylowy kwasów tłuszczowych	33,2
		ester etylowy kwasów tłuszczowych	35,2
		olej roślinny	35,2
		olej zwierzęcy	35,0

Tabela 3. Wydajność biogazu z traw łąkowych w porównaniu z innymi roślinami według badań niemieckich⁴⁰

Gatunek	Plony (t · ha ⁻¹)	Wydajność biogazu (m ³ · t ⁻¹)	Wydajność biogazu (m ³ · ha ⁻¹)
Kiszonka z kukurydzy	50	200	1000
	35	215	7525
Buraki pastewne	80	100	8000
Trawa łąkowa, 3 pokosy	70	95	6650
CCM - kukurydza	15	450	6750
GPS - pszenica	12	500	6000
Ziemniaki	40	110	4400
Ziarno pszenicy	7	600	4200

Przeprowadzone badania nad wartością energetyczną różnych roślin (tab. 4), dowodzą że trzcinaowa odznacza się największą wartością opałową 18 MJ · kg⁻¹. Dość wysoką wartością opałową wykazuje miskant chiński (ponad 17 MJ · kg⁻¹), nieznacznie mniejszą siano łąkowe (ok. 17 MJ · kg⁻¹), mniejszą (około

³⁹ www.cieplej.pl 2011.⁴⁰ www.kukurydza.uprawy.info, 2011.

16 MJ · kg⁻¹) słoma zbóż, najmniejszą zaś stokłosa bezostana (16,4 MJ · kg⁻¹). wartości zamieszczone w tabeli obliczono przyjmując założenie, że węgiel kamienny, węgiel brunatny i olej opałowy zawierają odpowiednio: 18,8-29,3 MJ · kg⁻¹ (średnio 24,1 MJ · kg⁻¹ Budzyński, Bielski⁴¹), 7,6-20 MJ · kg⁻¹ (średnio 13,8 MJ · kg⁻¹) i 40-42 MJ · t⁻¹ (średnio 41 MJ · kg⁻¹)⁴².

Po przeliczeniu suchej masy roślin uzyskanej z hektara na ilość węgla kamiennego, węgla brunatnego i oleju opałowego (tab. 5) można stwierdzić, że najwięcej energii można uzyskać z miskanta chińskiego, która jest równoważna z wydajnością od 7,17 do 21,53 t węgla kamiennego. Dwukrotnie mniejszą ilość energii pozyskać można z miskanta cukrowego oraz trzciny pospolitej, co odpowiada 3,51-10,51 oraz 8,22-12,32 t węgla kamiennego. Najmniej zaś energii spośród porównywanych roślin (w przeliczeniu na węgiel kamienny) uzyskuje się ze słomy jęczmiennej i stokłosa bezostnej, odpowiednio 2,67 i 2,72 t.

Tabela 4. Plon i wartość opałow wybranych roślin (źródła podane w tabeli)

Materiał badawczy	Średni plon (t s.m · ha⁻¹)	Wartość opałow (MJ · kg⁻¹ s.m.)	Źródło
Słoma rzepakowa -brykiet	5–8	15,0- 16,6	Niedziółka, Zuchniarz (2006)
Siano łąkowe- brykiet	8	16,6-17,1	Niedziółka i in. (2013)
Słoma pszenna-brykiet	7-9	16,8-17,2	Niedziółka, Zuchniarz (2006)
Słoma jęczmienna-brykiet	4	16,1	Niedziółka, Zuchniarz (2006)
Słoma żytnia-brykiet	5	16,5-17,0	Niedziółka i in. (2013)
Słoma mieszanki zbożowej - brykiet	5	16,5-16,9	Niedziółka i in. (2013)
Słoma kukurydziana-brykiet	8,5	16,8	Niedziółka, Zuchniarz (2006)
Trzcina pospolita	12-18	16,5	Harkot i in. (2007)
Miskant chiński	10-30	17,3	Kalembasa i in. (2004)
Miskant cukrowy	5-15	16,9	Kalembasa, Malinowska (2008)
Spartina periowa	9,5	16,8	Kowalczyk-Juško, Kościk (2004)
Kupkówka pospolita	10	17,6	Harkot i in. (2007)
Mozga trzcinowata	15	18,0	Harkot i in. (2007)
Kostrzewa trzcinowata	5	16,8	Harkot i in. (2007)
Stokłosa bezostna	4	16,4	Harkot i in. (2007)
Trzcinnik pospolity	4,5	17,3	Kozłowski, Swędrzyński (2010)
Rajgras wyniosły	18,5	17,6	Harkot i in. (2007)

⁴¹ W. Budzyński, S. Bielski, *Surowce energetyczne pochodzenia rolniczego. Cz. II. Biomasa jako paliwo stałe*, „Acta Sci. Pol., Agricultura”, nr 3(2), s. 15-26.

⁴² www.brykietkominkowy.pl.

Tabela 5. Równowartość opału z hektara w przeliczeniu na węgiel kamienny, węgiel brunatny i olej opałowy

Materiał	Równoważniki		
	węgiel kamienny (t)	węgiel brunatny (t)	olej opałowy (l)
Słoma rzepakowa - brykiet	3,20-5,10	5,62-8,99	1890-3024
Siano łąkowe - brykiet	5,51	9,86	3317
Słoma pszenna - brykiet	4,94-6,35	8,62-11,09	2902-3732
Słoma jęczmienna - brykiet	2,67	4,67	1571
Słoma żytnia - brykiet	3,49	6,09	2047
Słoma mieszanki zbożowej - brykiet	3,46	6,05	2037
Słoma kukurydziana - brykiet	5,93	10,35	3483
Trzcina pospolita	8,22-12,32	14,35-21,52	4829-7244
Miskant chiński	7,17-21,53	12,54-37,61	4219-12656
Miskant cukrowy	3,51-10,51	6,12-18,37	2061-6183
Spartina preriowa	6,62	11,57	3893
Kupkówka pospolita	7,30	12,75	4293
Mozga trzcinowata	11,20	19,57	6585
Kostrzewa trzcinowata	3,49	6,09	2049
Stokłosa bezostna	2,72	4,75	1600
Trzcinnik piaszkowy	3,34	5,84	1965
Rajgras wyniosły	13,51	23,59	7941

Podsumowanie

Trawy, rosnące często w ekstremalnych warunkach siedliskowych mogą stanowić niezwykle produktywnie źródło biomasy. Od pewnego czasu pojawiła się przed trawami perspektywa wykorzystania ich biologicznej właściwości ciągłego i obfitego odtwarzania części nadziemnej do produkcji biomasy stanowiącej energię odnawialną.

Uwzględniając źródła produkcji energii w Polsce można stwierdzić, że energia zielona wyprodukowana z odnawialnych źródeł energii (woda, wiatr, biogaz, biomasa) stanowi zaledwie 4% ogólnej wartości energii.

Wartość opałowa biomasy roślin uzależniona jest ściśle od ich wilgotności i wzrasta wprost proporcjonalnie w miarę zwiększania się zawartości suchej masy.

Spośród badanych roślin największą wartością opałową odznaczała się móżga trzcinowata, a najniższą stokłosa bezostna i słoma jęczmienna.

Najwyższy równoważnik wartości opałowej w przeliczeniu na węgiel kamienny uzyskano z miskanta chińskiego a najmniejszą ze słomy jęczmiennej i stokłosa bezostnej.

Bibliografia

- Benbi D.K., Brar J.S. 2009. *A 25-year record of carbon sequestration and soil properties in intensive agriculture*, Agron. Sustain. Dev., 29, 257-265.
- Budzyński W., Bielski S. 2004. *Surowce energetyczne pochodzenia rolniczego. Cz. II. Biomasa jako paliwo stałe*, Acta Sci. Pol., Agricultura 3(2), 15-26.
- Coetto E. 2008. *Grasslands for bioenergy production, A review*, Agron., Sustain. Dev. 28, 47-55.
- Dreszer K., Michałek R., Roszkowski A. 2003. *Energia odnawialna – możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie*, Wyd. PTIR, Kraków-Lublin-Warszawa.
- El Bassam N. 1995. *Possibilities and limitation of energy supply from biomass*. Natural Resources Development, 41, 8-21.
- Gańko E. 2005. *Uwarunkowania rozwoju „Agroenergetyka”* Osielsko nr 3.
- Gradziuk P. 2003. *Produkcja biomasy na cele nieżywnościowe jako perspektywistyczny kierunek działalności gospodarstw rolniczych*. Wieś Jutra, 6, 34-62.
- Gutowska A.E. 2005. *Rośliny energetyczne – trawy*. Informator mazowiecki, 2005.
- Harasimowicz- Hermann G., Hermann J. 2007. *Uprawa wierzby krzewiastej na cele energetyczne alternatywą dla spalania słomy i zachowania żyzności gleby*. Wyd. UTP, Bydgoszcz, s.72.
- Harkot W., Warda M., Sawicki J., Lipińska H., Wylupek T., Czarnecki Z., Kulik M. 2007. *Możliwość wykorzystania runi łąkowej do celów energetycznych*. Łąkarstwo w Polsce, 10, 59-67.
- Hastings A., Clifton-Brown J.C., Wattenbach M., Stampfl P., Mitchell C.P., Smith P. 2008. *Potential of Miscanthus grasses to provide energy and hence reduce greenhouse gas emissions*. Agron. Sustain. Dev., 28, 465-472.
- Jabłoński R. 2003. *Ciepło pachnące różą „Agroenergetyka”* Osielsko nr 2.
- Kalembara D., Janinhoff A., Malinowska E., Jaremko D., Jeżowski S. 2005. *Zawartość siarki w wybranych klonach trawy Miscanthus*. J. Elem., 10 (2): 309-314.
- Kalembara D., Malinowska E. 2008. *Wpływ dawek osadu ściekowego na plon biomasy trawy Miscanthus sacchariflorus (Maxim.) Hack., zawartość siarki oraz wartość energetyczną*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 533, 171-179.
- Kalembara D., Malinowska E., Jaremko D., Jeżowski S. 2004. *Wpływ nawożenia NPK na strukturę plonu traw Miscanthus ssp*. Biuletyn IHAR, 234, 205-211.
- Kotecki A. 2010. *Uprawa miskanta olbrzymiego. Energetyczne i pozaenergetyczne możliwości wykorzystania słomy*. Wyd. UWP, Wrocław, 186.
- Kowalczyk-Juśko A., Kościak B. 2004. *Produkcja biomasy miskanta cukrowego i spartiny preriowej w zróżnicowanych warunkach glebowych oraz możliwości jej konwersji na energię*. Biuletyn IHAR 234, 213-218.

- Kozłowski S., Swędrzyński A. 2010. *Możliwość wykorzystania trzcinnika paskowego w kontekście jego biologicznych, chemicznych i fizycznych właściwości*. Łąkarstwo w Polsce, 13, 117-126.
- Majtkowska G., Majtkowski W. 2008. *Trawy źródłem energii*. Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin. Bydgoszcz.
- Majtkowski W. 1998. *Przydatność wybranych gatunków traw typu C4 do upraw alternatywnych w Polsce*. Hod. Roślin Nasien. 2, 41-44.
- Majtkowski W. 2006. *Bioróżnorodność upraw energetycznych. Podstawy zrównoważonego rozwoju*. Probl. Inż. Roln. 2, 25-36.
- Malinowska E., Kalembasa D. 2013. *Contents of some selected elements in Miscanthus sacchariflorus (Maxim.) Hack biomass under the influence of sewage sludge fertilization in cultivation experiment*. Ecol. Chem. Eng. A 20 (2): 203-211 DOI: 10.2428/ecea.213(02)021.
- Nalborczyk E. (red.) 1996. *Nowe rośliny uprawne na cele spożywcze, przemysłowe i jako odnawialne źródła energii*. SGGW, Warszawa.
- Niedziółka I., Kachel-Jakubowska M., Kraszkiewicz A., Szpryngiel M. 2013. *Analiza cech fizycznych brykietów z biomasy roślinnej*. Inż. Roln. 2(143), 233-243.
- Niedziółka I., Zuchniarz A. 2006. *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*. Motrol, 8A, 232-237.
- Radziejewicz J. 2009. „Elektroniczny Magazyn Rolniczy” Warszawa.
- Renigier-Biłozor M., Góbczyński K. 2010. *Możliwość wykorzystania odnawialnych źródeł energii w gospodarowaniu nieruchomościami mieszkaniowymi w Polsce na tle innych krajów – cz. I*. Acta Sci. Pol., Administratio Locorum 9(4), 107-120.
- Sacała E. 2011. *Miscanthus - unusual grass: biochemical and physiological characteristics: A review*. Ecol. Chem. Eng. A, 18(12), 1615-1624.
- Samson R., Duxbury P., Mulkins L. 2000. *Research and development of fibre crops in cool season regions of Canada*. Final Conference COST 814 Crops development for cool and wet regions of Europe. G. Parente, J. Frame (eds.) Pordenone, Italy 10-13.05.2000, 555-565.
- Sawicki B., Kościak B. 2003. *Trawy i zbiorowiska trawiaste*. [w:] Rośliny energetyczne. Red. Kościak B. Wyd. AR Lublin.
- Skrobaccki A. 2009. „Produkcja biomasy wybrane problemy” Wieś Jutra, Warszawa.
- Subocz S., Kopczyński J. 2009. *Dobór roślin do produkcji bioenergetycznej masy na terenie Pomorza Zachodniego*. Inż. Roln. 1(110), 303-309.
- Ustawa z dn. 2 kwietnia 2004r. *Zmiana ustawy – Prawo Energetyczne oraz Prawo Ochrony Środowiska*. Dz.U. nr. 91, poz. 875.
- Węgrzyn A., Zajac G. 2008. *Selected aspects of research on energetic effectiveness of plant biomass production technology*. Acta Agroph. 158, 11(3), 799-806.
- www.biomassradecentres.eu, 2010.
- www.ihar.edu.pl, 2011.
- www.wikipedia.pl.
- www.zytostuletnie.pl, 2007.
- www.cieplej.pl, 2011.
- www.kukurydza.uprawy.info, 2011.
- www.brykietkominkowy.pl.
- www.ecbartos.pl, 2010.