

**Rafał Pudelko, Magdalena Borzęcka-Walker, Zuzanna Jarosz, Antoni Faber,
Anna Jędrejek**

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

WPŁYW PRODUKCJI BIOMASY STAŁEJ DLA POTRZEB ENERGETYKI
NA EMISJĘ GAZÓW CIEPLARNIANYCH I ZANIECZYSZCZENIA
BIOGENAMI*

Słowa kluczowe: biomasa, emisja gazów cieplarnianych, efektywność energetyczna

Wstęp

Wzrost rozwoju przemysłu i gospodarki pociąga za sobą potrzebę wykorzystania ogromnej ilości energii. Energia pozyskiwana jest głównie z ropy naftowej, gazu ziemnego oraz węgla kamiennego. Jednak te źródła nie są niewyczerpalne. Wszystkie dostępne źródła analityczne wskazują na wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia kryzysu energetycznego, a obserwowane różnice dotyczą tylko terminu jego wystąpienia (24, 32). Wzrost zużycia energii ma negatywny wpływ na zmiany klimatyczne (zwiększona emisja gazów cieplarnianych do atmosfery). Powyższe aspekty doprowadziły do rosnącego zainteresowania wykorzystaniem biomasy jako źródła energii. Biomasa została uznana za kluczowy element polityki Europy na rzecz zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych.

Źródłem biomasy stałej, o której mowa w dyrektywie RED (10) oraz kolejnych dokumentach KE, jest produkcja rolnicza (kukurydza, pszenica, słoma, obornik), gospodarka leśna (kłody, pniaki, liście i gałęzie), przemysł przetwórstwa drzewnego (kora, odpady, wióry drzewne, trociny), odpady organiczne (stałe odpady komunalne, pokonsumpcyjne drewno pochodzące z odzysku, paliwa pochodzące z odpadów komunalnych, osady ściekowe). Biomasa może stanowić jakiegokolwiek materiał organiczny. Wiele z tych surowców można wykorzystać również do produkcji biopaliw

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.4 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

stosowanych w transporcie lub biopłynów do produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodzenia. Duże możliwości postrzega się także we wprowadzaniu upraw wieloletnich roślin energetycznych.

Rolnictwo, podobnie jak leśnictwo, jest działem gospodarki, który różni się od innych tym, że przyczynia się nie tylko do emisji głównych antropogenicznych gazów cieplarnianych, ale również do ich pochłaniania. Emisja może być kompensowana przez absorpcję i akumulację węgla w biomase roślinnej, która trafiając do gleb, zwiększa retencję tego pierwiastka w postaci próchnicy. Ze względu na zachodzącą sekwestrację węgla przyjmuje się niekiedy, że ilości emitowanego dwutlenku węgla (CO_2) są w rolnictwie równoważone przez ilości węgla pochłanianego. Rolnictwo ma natomiast znaczący udział w całkowitej wielkości emisji podtlenku azotu (N_2O) – 73,4% oraz metanu (CH_4) – 35,0% (18). Całkowity udział rolnictwa w emisjach gazów cieplarnianych, wyrażony w ekwiwalentach CO_2 , wynosi 8,8%. Nie jest on dramatycznie duży, jednak rolnictwo, podobnie jak inne działy gospodarki, zobligowane jest ograniczać wielkość emisji tych gazów na mocy podpisanej przez Polskę Konwencji Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu. Najważniejszym wyzwaniem dla ochrony klimatu w rolnictwie jest wprowadzanie metod produkcji, które będą sprzyjać zmniejszaniu emisji gazów cieplarnianych (GHG). Sposobem na ograniczenie emisji w produkcji rolniczej jest modyfikacja stosowanych metod agrotechnicznych:

- zastosowanie ulepszonej technologii stosowania azotu, dostosowanie zaopatrzenia w azot do zapotrzebowania roślin, dostosowanie systemów produkcji do maksymalizacji wykorzystywania odchodów zwierzęcych w uprawie roślin, lepsze zagospodarowanie resztek poźniwnych, czy wreszcie zmniejszenie zużycia nawozów azotowych;
- przestrzeganie właściwego płodozmianu i wprowadzanie wsiewek międzyplonowych, które powodują wiązanie węgla i mogą ograniczać zapotrzebowanie na nawozy azotowe;
- stosowanie technik uprawy bezorkowej, co pozwala na zmniejszenie strat węgla z gleby i ogranicza emisję N_2O ;
- wspieranie upraw wieloletnich;
- lepsze wykorzystanie pasz, poprawę technik karmienia zwierząt;
- doskonalenie systemów utrzymania zwierząt gospodarskich, zmniejszenie powierzchni parowania odchodów z legowisk i ściółki;
- właściwe przechowywanie obornika i gnojowicy.

Powyższe przykłady działań nie wyczerpują wszystkich możliwych sposobów redukcji emisji GHG w działalności rolniczej, wskazują jednak, jak szeroki jest zakres możliwych działań w tym sektorze, których wdrożenie może przyczynić się do ograniczenia emisji i skutecznej ochrony klimatu.

W latach 2011–2012 ilość wykorzystanej energii pierwotnej zawartej w biomase stałej powróciła na ścieżkę wzrostu na poziomie 5,4%, osiągając poziom

82,3 miliona ton oleju ekwiwalentnego (Mtoe), czyli o 4,2 Mtoe więcej w porównaniu z rokiem ubiegłym (2). Biomasa stała jest najczęściej wykorzystywanym źródłem energii odnawialnej. Szacowano, że Polska ma duży potencjał do produkcji biomasy energetycznej, który określono na 1–5 mln ha gruntów (w pierwszej czwórce w rankingu krajów europejskich) (11, 12, 15, 26, 33, 40). Oszacowane potencjały, często wykonywane przy użyciu częściowego modelu gospodarczego w całkowitej izolacji od informacji przestrzennej o agroklimacie, glebie, zasobach wodnych i specyfiki uwarunkowań organizacyjnych Polski, mogą być przeszacowane. Ich wiarygodności i przydatności są ograniczone. Szacunki uwzględniające przestrzenną zmienność warunków przyrodniczych i produkcyjnych rolnictwa wykonane w środowisku GIS wykazały, że na uprawę roślin energetycznych można przeznaczyć 1,59 mln ha (31).

Porównanie emisji z upraw strategicznych i energetycznych

Skutki środowiskowe wynikające z wprowadzania upraw energetycznych mogą być rozważane w porównaniu ze skutkami środowiskowymi związanymi z dotychczasową produkcją energii (paliwa kopalne) oraz z emisjami z produkcji rolnej czy leśnej. Oceną jest ogólny bilans zmniejszenia emisyjności gazów cieplarnianych w procesie pozyskiwania energii. Na proces wpływa:

- zmiana użytkowania terenu (najczęściej z produkcji żywności na produkcję energii),
- emisyjność podczas produkcji biomasy,
- logistyka dostaw,
- produkcja paliwa lub energii bezpośrednio.

Porównanie emisji wykonano na podstawie prac prowadzonych w IUNG-PIB. W modelowaniu wykorzystano metodę LCA. Ocena cyklu życia (LCA) jest narzędziem zarządzania wykorzystywanym do kompleksowych ocen oddziaływań na środowisko, obejmującym wszystkie etapy związane z procesem produkcji. Wskazówki oraz zasady przeprowadzania analiz LCA zawarte są w standardach zarządzania jakością i środowiskiem wprowadzonych przez Międzynarodową Komisję Normalizacyjną (19).

Przetwarzanie biomasy na energię ma liczne zalety, do których zaliczyć możemy ograniczenie emisji związków toksycznych, redukcję efektu cieplarnianego, biodegradowalność (17). Duże oczekiwania związane z odnawialnymi źródłami energii oraz fakt, że większość rządów UE, w związku z możliwością wzrostu wykorzystania roślin energetycznych, widzi potrzebę prowadzenia wnikliwych analiz spowodowało, że Parlament Europejski wydał dyrektywę nakładającą obowiązek spełnienia kryteriów zrównoważonej produkcji i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (1, 10). Obowiązkiem stało się wykazanie metodą LCA redukcji emisji CO₂ o 35% do 2017 r.; o 50% do 2018 r. oraz do 60% po 2018 r.

Z badań przeprowadzonych przez International Energy Agency i Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, dotyczących redukcji emisji GHG, wskutek wykorzystywania biopaliw w stosunku do benzyny i oleju napędowego wynika, że jedynie etanol produkowany z roślin ligno-celulozowych może ograniczyć emisję GHG o wymagane 60% (35). Analizy przeprowadzone przez OECD wskazują na bardzo dużą rozbieżność wyników badań prowadzonych metodą LCA (29). Redukcja emisji GHG w pełnym cyklu życia etanolu produkowanego z pszenicy waha się w przedziale od 30 do 60%, zaś biodiesla z oleju roślinnego od 40 do 55%. Jednak według Crutzen (7), emisja N₂O powstająca przy produkcji biopaliw nie prowadzi do zmniejszenia globalnego ocieplenia. Względne wskaźniki ocieplenia klimatu powodowanego przez emisję N₂O z produkcji rzepaku oraz pszenicy wskazują, że wykorzystywanie tych surowców do produkcji biopaliw płynnych wpłynie negatywnie na ocieplenie klimatu. Sposobem ograniczenia emisji w pełnym cyklu życia biopaliw jest zwiększenie sekwestracji węgla w glebie wskutek poprawy agrotechniki (20).

Emisje GHG dla miskanta obliczono na podstawie bilansu energetycznego, wykorzystując wskaźniki opublikowane przez Bulard i Metcalfe (5) oraz Fernando i Oliveira (13). Emisje gazów cieplarnianych dla wierzby obliczono, przyjmując wskaźniki opisane przez Börjessona (3). W przypadku pszenicy, rzepaku i ziemniaka użyto wskaźników opracowanych przez Williams i in. (41).

Efektywność energetyczna netto została wyliczona jako iloraz pomiędzy energią wyprodukowaną w postaci biomasy a energią zużytą w trakcie jej produkcji. Nakłady energetyczne na produkcję są sumą zużytej energii na produkcję sadzonek, nawozów i pestycydów oraz produkcję i wykorzystanie maszyn, przechowywanie biomasy, jak również jej transport. Energia wyprodukowana to iloczyn plonu suchej masy (t·ha⁻¹) i wartości opałowej brutto biomasy. Energia wyprodukowana netto jest to energia wyprodukowana pomniejszona o 10% strat plonu.

Do przeprowadzenia analiz dotyczących wierzby i miskanta wykorzystano informację o wysokości plonów pochodzących z badań polowych przeprowadzonych w Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Osinach w 2006 r. (tab. 1). Średnie dla kraju plony pszenicy, rzepaku i ziemniaka podano według Głównego Urzędu Statystycznego (16).

Tabela 1

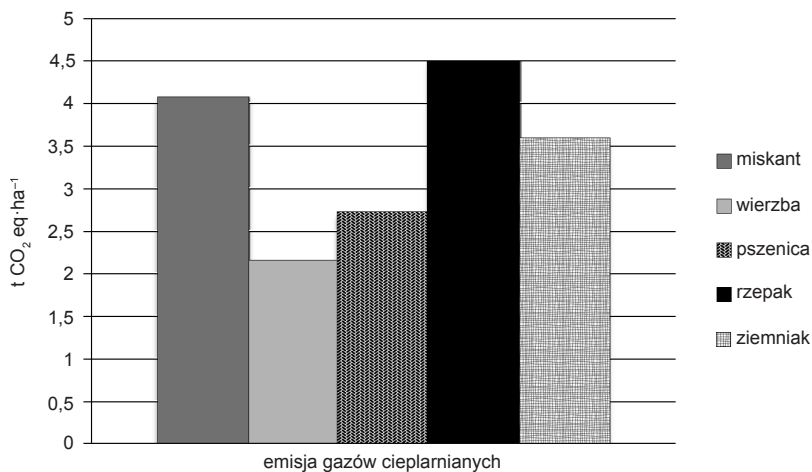
Plony roślin oraz wartości opałowe biomasy

Roślina	Plony (t·ha ⁻¹)	Wartości opałowe biomasy (GJ)
Miskant	17,8	19,3
Wierzba	14,0	19,5
Pszenica	3,4* + 3,4**	18,6*, 17,7**
Rzepak	2,65* + 2,65**	23,8*, 15**
Ziemniak	15,0	17,2

* ziarno, ** słoma

Źródło: Borzęcka-Walker i in., 2011 (4)

Najwyższą emisją gazów cieplarnianych charakteryzował się rzepak (rys. 1). Uważa się, że wysoka emisja GHG dla rzepaku wynikała z wysokich wymagań nawozowych tej rośliny. Wysokie emisje gazów cieplarnianych obliczono również dla uprawy miskanta. Styles i Jones (38) oszacowali dla miskanta emisję w wysokości 1,2–2,7 t CO₂ eq·ha⁻¹. Uprawa wierzby wymaga niskich nakładów energetycznych, a w związku z tym charakteryzuje się niską emisją GHG. Styles i Jones (38) emisje z uprawy wierzby oszacowali na 0,8–1,8 t CO₂ eq·ha⁻¹, natomiast Heller i in. (17) na poziomie 7,28 t CO₂ eq·ha⁻¹. Wysokie różnice otrzymanych rezultatów wynikają z różnych założeń metod obliczeniowych oraz wykorzystanych danych.



Rys. 1. Emisja gazów cieplarnianych (t CO₂ eq·ha⁻¹)

Źródło: Borzęcka-Walker i in., 2011 (4)

Produkcja każdej rośliny pociąga za sobą koszty. Koszty ponoszone składają się z kosztów materiałów i surowców, eksploatacji zastosowanych maszyn, narzędzi i ciągników oraz kosztów robocizny. W przypadku analizowanych roślin najwyższymi kosztami charakteryzowała się produkcja ziemniaka (tab. 2). Dobek (8) oszacował energochłonność uprawy ziemniaka w wysokości 21–39 GJ·ha⁻¹, w zależności od systemu uprawy. Na podobnym poziomie (14–16 GJ·ha⁻¹) oszacowano zużycie energii w uprawie rzepaku i miskanta (tab. 2). Dla porównania, Skrobaccki (36), Dobek (9) oszacowali energochłonność uprawy rzepaku na poziomie 12–29 GJ·ha⁻¹, Jonathan (21) zaś oszacował energochłonność dla rzepaku w wysokości 19,3 GJ·ha⁻¹ oraz 9,2 GJ·ha⁻¹ dla miskanta. Nakłady energetyczne na uprawę wierzby wynosiły od 6 GJ·ha⁻¹ do 22,5 GJ·ha⁻¹ przy zbiorze roślin co roku, natomiast przy zbiorze co trzy lata 42 GJ·ha⁻¹ (21, 39). Nakłady ponoszone na produkcję pszenicy zależą również od systemu uprawy. Energochłonność uprawy pszenicy w systemie konwencjonalnym wynosiła 15,6 GJ·ha⁻¹, a w systemie uprawy intensywnej 17,5 GJ·ha⁻¹ (27).

Kuesters i Lammell (25) oszacowali wkład energii na poziomie $7,5 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ przy braku nawożenia i $17,5 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ przy wysokim nawożeniu. Według Jonathan (21), wielkość niezbędnej energii potrzebnej do produkcji pszenicy wynosi $21 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Tabela 2

Bilans energetyczny ($\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$) oraz ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w produkcji roślin

Wyszczególnienie	Miskant	Wierzba	Pszenica	Rzepak	Ziemniak
Zużycie energii	16,14	7,30	7,82	14,31	21,00
Energia wyprodukowana	424,21	273,00	135,46	102,82	258,00
Energia wyprodukowana netto	365,65	238,40	114,09	78,02	211,20
Efektywność energetyczna netto	22,66	32,66	14,59	5,47	10,06

Źródło: Borzęcka-Walker i in., 2011 (4)

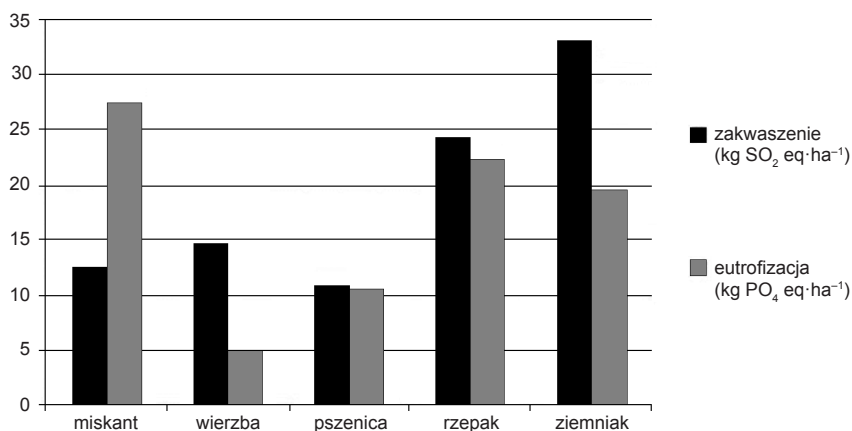
Najwyższą energią wyprodukowaną netto charakteryzowała się uprawa miskanta oraz wierzby (tab. 2), co wynika z wysokiego plonowania tych roślin. Wielkość produkcji energii netto w uprawie miskanta podana przez Fernando i Oliveira (13) była większa niż w badaniach własnych. Energia wyprodukowana netto oszacowana przez Lewandowską i Schmidt (28) wahała się w przedziale $115\text{--}590 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{r}^{-1}$, natomiast Jonathan (21) oszacował jej wielkość na poziomie $300 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. Drugi co do wielkości plon energii charakteryzował wierzbę (tab. 2). Szacunki energii netto wykonane dla upraw wierzby przez Jonathan (21) oraz Kuesters i Lammell (25) wyniosły odpowiednio: $180 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ oraz $40\text{--}160 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Efektywność energetyczna uprawy roślin wyrażona jest stosunkiem wartości energetycznej plonu do nakładów poniesionych na uprawę. W dużej mierze zależy od intensywności produkcji oraz warunków wzrostu roślin (25). Najwyższą efektywnością energetyczną charakteryzowała się wierzba (tab. 2). Oszacowana wielkość $32,7 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ wynikała z wysokiego plonu i niskich nakładów energetycznych poniesionych na jej produkcję. Na podstawie literatury stwierdzono, że szacunki efektywności energetycznej uprawy wierzby są mocno zróżnicowane. Według Piskier (30) wartość tego wskaźnika w zależności od warunków glebowych i uzyskiwanych plonów wahała się w zakresie od $4,5$ do $27,0 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. Börjesson (3) uzyskał dla wierzby efektywność energetyczną netto rzędu $21,0 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, natomiast według Szczukowski i Budnogo (39) wartość wskaźnika mieści się w przedziale $22,0\text{--}41,0 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. Zbiór wierzby krzewiastej w trzyletnich rotacjach charakteryzował się najniższą energochłonnością produkcji 1 tony suchej masy zrębków oraz najwyższym wskaźnikiem efektywności energetycznej. Pomimo wysokich nakładów ponoszonych na produkcję miskanta, charakteryzuje się on wysokim współczynnikiem efektywności energetycznej netto rzędu $22,6 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. Jonathan (21) oszacował ten indeks na poziomie $32,5 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. Wielkość efektywności energetycznej uprawy pszenicy wyniosła $10,9 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ (tab. 2). Kwapisz (27) dla konwencjonalnej uprawy pszenicy uzyskał wartość $8,0 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ oraz $9,4 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ dla uprawy intensywnej, biorąc pod uwagę zarów-

no plon ziarna jak i słomy. K u e s t e r s i L a m m e l (25) w zależności od nawożenia oszacowali efektywność energetyczną uprawy pszenicy w przedziale $6,0\text{--}13,0\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. Efektywność energetyczna ziemniaka wyniosła $10,1\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ (tab. 2) i jest ona wyższa od danych literaturowych. K l i k o c k a (23) uzyskała dla uprawy ziemniaka wielkość $2,4\text{--}3,4\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, D o b e k (8) zaś oszacował efektywność energetyczną mieszczącą się w przedziale $1,5\text{--}3,4\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ w zależności od odmiany i agrotechniki. Najniższą efektywnością energetyczną wynoszącą $5,5\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ charakteryzuje się uprawa rzepaku. Nieco niższą wartość tego wskaźnika ($3,8\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$) uzyskał J o n a t h a n (21).

Emisje gazów wpływających na zakwaszenie oraz eutrofizację środowiska

W Polsce zakwaszenie gleb jest od kilkudziesięciu lat jednym z najpoważniejszych problemów rolnictwa. Zgodnie z indeksem żyzności gleby czynnik ten najbardziej ogranicza produkcję rolniczą (14). Według przeprowadzonych obliczeń największym wpływem na zakwaszenie charakteryzuje się uprawa ziemniaka (rys. 2). Wynika to z wysokiego nawożenia oraz z faktu, że gleba pod uprawą tej rośliny podatna jest na zwiększone wymywanie kationów zasadowych, zwłaszcza wapnia i magnezu. Największy nadmiar azotu występuje na powierzchni zajmowanej przez rośliny okopowe (37). Niższy wpływ na zakwaszenie pomimo wysokiego nawożenia stwierdzono w uprawie rzepaku. Zwarty łan uprawy zmniejsza wymywanie składników pokarmowych do gleby. Natomiast najniższym wpływem na zakwaszenie charakteryzowała się uprawa pszenicy (rys. 2).



Rys. 2. Emisje gazów wpływających na zakwaszenie oraz eutrofizację środowiska

Źródło: Borzęcka-Walker i in., 2011 (4)

Główną przyczyną eutrofizacji jest wzrastający ładunek pierwiastków biogennych, przede wszystkim fosforu. Większa ilość tego biogenu związana jest z intensyfikacją

nawożenia oraz wzrostem erozji w zlewni. Wzrost dopływu azotu, drugiego z biogenów, związany jest ze wzrastającą emisją tlenków azotu do atmosfery, a tym samym dużą ich zawartością w opadach atmosferycznych. Silne opady deszczu mogą łatwo wypłukiwać azot z powierzchniowej warstwy gleby oraz z nawozów.

Największy wpływ na eutrofizację wywarła uprawa miskanta (rys. 2), najmniej zaś, ze względu na niskie nawożenie oraz efektywne wykorzystanie składników pokarmowych, uprawa wierzby.

Skutki środowiskowe związane z rozwojem upraw energetycznych

W pracy Kabały i in. (22) dokonano przeglądu aktualnego stanu wiedzy na temat przydatności najważniejszych gatunków roślin energetycznych do rekultywacji gleb zdegradowanych chemicznie oraz gruntów rekultywowanych, szczególnie w warunkach nawożenia osadami ściekowymi lub kompostami. Pod uwagę wzięto tolerancję na zanieczyszczenie metalami ciężkimi oraz zdolność ich akumulacji przez wierzbę, topolę, miskanta, ślazuca i topinamburu na glebach zanieczyszczonych lub przy nawożeniu osadami zawierającymi wysokie stężenia pierwiastków śladowych. Większość analizowanych roślin odznacza się zdolnością akumulacji cynku i kadmu w biomase części nadziemnych oraz gromadzenia miedzi i ołowiu w korzeniach. Na glebach słabo zanieczyszczonych, a także na gruntach rekultywowanych możliwa jest uprawa wszystkich roślin energetycznych, w tym miskanta i ślazuca, pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej zasobności podłoża w składniki nawozowe oraz wilgotności. Do uprawy na glebach średnio i silnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi zalecane są wybrane klony wierzby wiciowej, o relatywnie dużej tolerancji na zanieczyszczenie, dużych zdolnościach fitoekstrakcji metali oraz zadowalająco wysokim plonie biomasy. Plantacje topoli stosowane są przede wszystkim do fitostabilizacji ołowiu, miedzi i kadmu. Potwierdzono dużą przydatność osadów ściekowych do nawożenia plantacji roślin energetycznych. Najwyższą łączną efektywność plonowania oraz fitoekstrakcji metali uzyskuje się przy nawożeniu osadami, w których stężenie metali ciężkich nie przekracza zawartości dopuszczalnych we właściwych przepisach prawnych. Postępy inżynierii genetycznej pozwalają przypuszczać, że w najbliższej przyszłości pojawią się nowe odmiany roślin energetycznych o coraz wyższej zdolności plonowania, zapewniającej ekonomiczną efektywność plantacji, oraz o zdecydowanie większych zdolnościach fitoekstrakcji pierwiastków śladowych.

Z dotychczasowych badań wynika, iż wpływ plantacji wierzby i miskanta na bioróżnorodność jest korzystniejszy, albo porównywalny z typowymi roślinami rolniczymi (tab. 3). Wykazano, że plantacje wierzby zwiększają bogactwo gatunkowe flory (34) oraz pozytywnie wpływają na bioróżnorodność ptaków w porównaniu z gruntami ornymi (6). Uprawy wierzby są również atrakcyjniejszym siedliskiem dla małych ssaków, płazów i gadów w porównaniu z uprawami rolniczymi.

Tabela 3

Wpływ uprawy roślin na środowisko

Wpływ na środowisko	Wierzba	Miskant	Pszenvica, Rzepak, Burak cukrowy
Sekwestracja węgla	+	+	+/-
Wymywanie azotu i erozja	+++	++	+/-
Fitoremediacja	+++	N	N
Walory wizualne	-	-	+/-
Bioróżnorodność ptaków	++	-	+/-
Bioróżnorodność roślin	++	+/-	+/-
Bioróżnorodność bezkręgowców	++	+/-	+/-
Bioróżnorodność ssaków	+/-	+/-	+/-
Hydrologia	+/-	+/-	+/-
Bilans energii i węgla	+++	+++	+

+ wpływ dodatni, - wpływ ujemny, N brak oceny

Źródło: Rowe i in., 2007 (34)

Podsumowanie

Jednym z głównych powodów promowania bioenergii są potencjalne korzyści dla środowiska, w tym ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, które można uzyskać poprzez zamianę paliw kopalnych na źródła biomasy.

Uznaje się, że ocena cyklu życia (LCA) jest stosowną metodą oceny wydajności bioenergii w zakresie emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z paliwami kopalnymi. Emisje gazów cieplarnianych z systemów bioenergetycznych różnią się w zależności od rodzaju surowca, zmian w zasobach węgla spowodowanych zmianami użytkowania gruntów, rodzaju transportu, obróbki surowców i technologii przemiany wykorzystywanych w produkcji ciepła lub energii elektrycznej. Do głównych celów Wspólnoty w zakresie energii należą ograniczenie jej zużycia i zwiększenie efektywności jej produkcji. Sprawność przemiany energii w przypadku pieców i kotłów na biomasę stosowanych w gospodarstwach domowych waha się w granicach od 10 do 95%. Elektrociepłownie i ciepłownie komunalne mogą osiągnąć sprawność wynoszącą 80–90%, zaś duże elektrownie i spalarnie odpadów z odzyskiem energii mogą osiągnąć sprawność wynoszącą 10–35%. Istnieje zatem znaczny potencjał ograniczenia zużycia energii poprzez zwiększenie sprawności. Postęp technologiczny w tym zakresie może znacząco wpłynąć na obecnie prowadzone szacunki, ponieważ możliwe jest uzyskanie zmniejszenia proporcji między emisyjnością w przypadku wykorzystania paliw kopalnych a emisyjnością związaną z pozyskaniem i przetworzeniem biomasy.

Jak wynika z przedstawionego przeglądu literatury, badania nad emisją gazów cieplarnianych są podejmowane przez wiele zespołów badawczych. Daje to możli-

wość szerszej oceny oraz konfrontacji rezultatów uzyskanych przez różnych autorów z wynikami badań własnych.

Prace badawcze nad analizą cyklu życia przedstawione w powyższej pracy stanowią wstępne próby wykorzystania jej do porównania oddziaływania na środowisko różnych roślin przeznaczonych na produkcję biopaliw. Przeprowadzone analizy wykazały, że:

- najwyższą emisją gazów cieplarnianych charakteryzuje się uprawa rzepaku,
- uprawa ziemniaka oraz rzepaku ma największy wpływ na zakwaszenie środowiska wśród analizowanych roślin,
- miskant posiada najwyższy potencjał produkcji energii netto,
- najwyższą efektywnością energetyczną produkcji netto charakteryzuje się wierzba.

Literatura

1. Biomass Action Plan. Communication from the Commission. Commission of the European Communities. Brussels 2005.
2. Biuletyn Energii Odnawialnej. Biomasa Stała – Eurobserv'er – styczeń 2014.
3. B ö r j e s s o n P.: Livscykelanalys av Salix produktion, (Life Cycle Assessment of Willow production), IMES/EESS Report, 2006, 60.
4. B o r z ę c k a - W a l k e r M., F a b e r A., P u d e ł k o R., K o z y r a J., S y p A., B o r e k R.: Life cycle assessment (LCA) of crops for energy production. J. Food Agric. Environ., 2011, **9(3&4)**: 698-700.
5. B u l l a r d M., M e t c a l f e P.: Estimating the energy requirements and CO₂ emissions from production of the perennial grasses Miscanthus, Switchgrass and Reed Canary Grass. ETSU B/U1/00645/REP DTI/Pub URN 01/797, 2001.
6. C h o ł u j D., P o d l a s k i S.: Kompleksowa ocena biologicznej przydatności 7 gatunków roślin wykorzystywanych w uprawach energetycznych. W: Energia odnawialna, P. Grudziak (red.). Wyd. MODR w Warszawie, Oddział w Płońsku, 2008, 61-76.
7. C r u t z e n P.J., M o s i e r A.R., S m i t h K.A., W i n i w a r t e r W.: N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Atmos. Chem. Phys., 2008, **8**: 389-395.
8. D o b e k T.: Efektywność energetyczna produkcji ziemniaków jadalnych w wybranych gospodarstwach. Inżynieria Rolnicza, 2006, **2**: 239-246.
9. D o b e k T.: Ocena efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji pszenicy ozimej i rzepaku ozimego wykorzystanych do produkcji biopaliw. Inżynieria Rolnicza, 2007, **6**: 41-48.
10. Dyrektywa 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
11. E r i c s s o n K., N i l s s o n L.: Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. Biomass Bioenerg., 2006, **30**: 1-15.
12. European Environment Agency. How much energy can be Europe produce without harming the environment? EEA Report, Copenhagen, 2006, **7**: 72.
13. F e r n a n d o A.L., O l i v e i r a J.S.: Some aspects of Environmental Impact Assessment of *Miscanthus x giganteus* production in Portugal – Application of a model, 2002, <http://www.berr.gov.uk/files/file20819.pdf>

14. Filipek T., Fotyma M., Lipiński W.: Stan, przyczyny i skutki zakwaszenia gleb ornych w Polsce. Nawozy i Nawożenie, 2006, **2(27)**: 7-38.
15. Fischer G., Prieler S., van Velthuisen H.: Biomass potentials of miscanthus, willow, and poplar: Results and policy implications for Eastern Europe, Northern, and Central Asia. Biomass Bioenerg., 2005, **28**: 119-132.
16. Główny Urząd Statystyczny. Wyniki produkcji roślinnej w 2006 r., Warszawa 2006.
17. Heller M.C., Keoleian G.A., Mann M.K., Volk T.A.: Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. Biomass Bioenerg., 2004, **29**: 1023-1042.
18. IOŚ: Piąty raport rządowy dla Konferencji Stron Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu. Warszawa, 2010.
19. ISO 14040. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, 2006.
20. Jarosz Z., Faber A.: Możliwości ograniczenia emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia biopaliw. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2014, **39(13)**: 9-27.
21. Jonathan H.: A versatile solution? Growing Miscanthus for bioenergy Renewable Energy World, 2007, 87.
22. Kabała C., Karczewska A., Kozak M.: Przydatność roślin energetycznych do rekultywacji i zagospodarowania gleb zdegradowanych, Zesz. Nauk. UP Wroc., Rol., XCVI, 2010, **576**: 97-118.
23. Kłikocka H.: Efektywność energetyczna różnych sposobów uprawy roli i nawożenia naturalnego w produkcji ziemniaka. Acta Agroph., 2006, **8**: 385-393.
24. Kopetz H., Jossart J.M., Ragossnig H., Metschina C.: European Biomass Statistics 2007. AEBIOM. Bruksela, 2007, 73.
25. Kuesters J., Lamme J.: Investigations of the energy efficiency of the production of winter wheat and sugar beet in Europe. Eur. J. Agron., 1999, **1**: 35-43.
26. Kuś J., Faber A.: Alternatywne kierunki produkcji rolniczej. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2007, **7**: 139-149.
27. Kwapisz M.: Efektywność energetyczna produkcji wybranych gatunków zbóż, 2008, <http://www.warsztaty.wnr.edu.pl/13/referaty/tekst/kwapisz.pdf>
28. Lewandowski I., Schmid U.: Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. Agr. Ecosyst. Environ., 2006, **112**: 335-346.
29. OECD: Economic assessment of biofuel support policies. Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, Paris, 2008. www.oecd.org/tad/bioenergy
30. Piskier T.: Efektywność energetyczna uprawy wierzby w różnych warunkach glebowych. Inżynieria Rolnicza, 2008, **2**: 215-220.
31. Pudełko R., Borzęcka-Walker M., Faber A., Borek R., Jarosz Z., Syp A.: The technical potential of perennial energy crops in Poland. J. Food Agric. Environ., 2012, **10(2)**: 781-784.
32. Ramsay W.: Security of energy supply in the European Union International Energy Agency. Melnik, 31 maja 2007.
33. Renewable Fuels for Advanced Powertrains. Final report of the project SE-2003-502705 (RENEW), 2008, <http://www.renew-fuel.com>.
34. Rowe R.L., Street N.R., Taylor G.: Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in UK. Renew. Energy Rev., 2007.
35. Sims R., Taylor M., Saddler J., Mabee W.: From 1st- to 2nd-Generation Biofuel Technologies. An overview of current industry and RD&D activities. Inter. Energ. Agency, 2008.

36. Skrobaccki A.: Możliwości samozaopatrzenia rolnictwa w paliwo silnikowe. *Motrol*, 2006, **8A**: 265-270.
37. Sobolewska A.: Wpływ polskiego programu rolnośrodowiskowego na straty azotu z polowej produkcji rolnej. *Zesz. Nauk. Akad. Roln. Wrocław*, 2006, **540**: 455-460.
38. Styles D., Jones M.B.: *Miscanthus* and willow heat production – an effective land-use strategy for greenhouse gas emission avoidance in Ireland? *Energ. Policy*, 2008, **36**: 97-107.
39. Szczukowski S., Budny J.: Wierzba krzewiasta – roślina energetyczna, 2003, http://www.bip.wfosigw.olsztyn.pl/res/serwisy/bipwfosigwolsztyn/komunikaty/_016_003_001_64954.pdf
40. Thran D., Weber M., Scheuermann A., Frohlich N., Zeddies J., Henze A., Thoroe C., Schweinle J., Fritsche U., Jenseit W., Rausch L., Schmidt K.: Sustainable Strategies for Biomass Use in the European Context. Institute for Energy and Environment, Leipzig, 2005, 387.
41. Williams A., Sanders D., Audsley E.: Sustainability and Environmental Burdens in Agriculture SABRE Conference, 12th September 2006 (pdf).

Adres do korespondencji:

dr hab. Rafał Pudelko
Zakład Agrometeorologii i Zastosowań Informatyki
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 886 34 21 w. 236
e-mail: rpudelko@iung.pulawy.pl