

Danuta Chołuj, Sławomir Podlaski, Grzegorz Wiśniewski, Justyna Szmalec

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

KOMPLEKSOWA OCENA BIOLOGICZNEJ PRZYDATNOŚCI
7 GATUNKÓW ROŚLIN WYKORZYSTYWANYCH
NA CELE ENERGETYCZNE

Wstęp

W artykule, na podstawie wyników badań własnych oraz danych z literatury naukowej, podjęto próbę kompleksowej charakterystyki 7 gatunków roślin energetycznych: miskantusa (*Miscanthus sinensis x giganteus*), spartiny (*Spartina pectinata*), wierzby konopianki (*Salix viminalis*), róży bezkolcowej – odmiany Jatar (*Rosa multiflora*), ślazuwca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita*), rdestowca sachalińskiego (*Reynoutria sachalinensis*) i słonecznika bulwiastego (topinamburu) – odmiana Albik (*Helianthus tuberosus*). Wymienione gatunki uprawiane są od 3 lat na poletkach o powierzchni 636-792 m² w Eksperymentalnej Stacji Doświadczalnej Wydziału Rolnictwa i Biologii SGGW w Skierniewicach.

Roślinami energetycznymi przeznaczonymi do produkcji biomasy nazywamy dzikie lub udomowione rośliny charakteryzujące się produkcją dużej ilości energii w warunkach niskich nakładów środków produkcji.

Idealna roślina energetyczna powinna cechować się następującymi właściwościami:

- wieloletnim charakterem wzrostu i rozwoju,
- generatywnym sposobem rozmnażania,
- szybkim wzrostem na początku wegetacji oraz dużą zdolnością krzewienia i rozgałęzienia się roślin,
- wysoką produktywnością fotosyntetyczną,
- dużym udziałem łądyg w części nadziemnej,
- małymi wymaganiami wodnymi i tolerancją na suszę,
- szybkim wysychaniem roślin w czasie zimy (w czasie zbioru biomasa charakteryzuje się niską zawartością wody),
- wysoką produkcją biomasy,
- dobrymi parametrami jakościowymi biomasy związanymi z jej spalaniem.

WYNIKI I DYSKUSJA

Rośliny wieloletnie czy jednoroczne?

Bilans energetyczny oraz problem maksymalnej sekwestracji dwutlenku węgla w glebie są głównymi elementami, które należy brać pod uwagę podczas analizy upraw energetycznych roślin jednorocznych i wieloletnich. Rośliny wieloletnie, w przeciwieństwie do gatunków jednorocznych, wymagają jednokrotnego wykonania uprawy roli w okresie 10-15 lat przed założeniem plantacji oraz mniejszych dawek nawozów mineralnych. Mniejsze potrzeby nawozowe są spowodowane recyrkulacją składników mineralnych, z których duża część jest wycofywana do korzeni przed jesiennym zakończeniem vegetacji. Wieloletnie wysokie trawy preriowe (spartina lub proso różgowate) są zdolne do translokacji 30% azotu znajdującego się w części nadziemnej do korzeni i rizomów w warunkach długotrwałej suszy oraz w okresie zasychania przed zimą. Translokacja N stanowi kompromis pomiędzy ochroną zasobów N a wielkością asymilacji węgla (22). W ostatnich kilku latach firmy nasienne zaangażowały się w hodowlę specjalnych odmian roślin jednorocznych przeznaczonych na cele energetyczne. Należy do nich kukurydza hodowana przez firmę KWS i sorgo. Rośliny te mogą być używane do spalania, jako surowiec do produkcji etanolu z celulozy oraz do wytwarzania biogazu. Niektóre analizy wskazują, że rośliny jednoroczne mogą plonować podobnie jak wieloletnie.

H a l l a m i in. (21) porównywali plonowanie oraz koszty produkcji biomasy roślin wieloletnich (prosa trzcinowatego, prosa różgowatego, palczatki Gerarda i lucerny) oraz jednorocznych (sorgo słodkie, sorgo pastewne i kukurydza). W okresie 4 lat badań najwyższy plon – 15,3-20,7 t · ha⁻¹ – suchej masy uzyskano z sorga słodkiego, nieco niżej plonowało sorgo pastewne – 14,6-16,7 oraz kukurydza – 11,5-17,9 t · ha⁻¹. Wieloletnie trawy, proso i palczatka Gerarda osiągnęły w 4 roku badań poziom plonowania zbliżony do roślin jednorocznych. Koszt uzyskania 1 tony biomasy był najniższy dla sorga, wyższy dla prosa i palczatki, a najwyższy dla lucerny i prosa trzcinowatego.

Rozmnażanie generatywne i wegetatywne

Wśród roślin uprawianych na cele energetyczne występują gatunki rozmnażające się wegetatywnie i generatywnie. Biorąc pod uwagę łatwość zakładania plantacji i koszty znacznie korzystnej wypadają gatunki rozmnażane z nasion. Jednak z uwagi na niewielki stopień udomowienia tych roślin ich nasiona charakteryzują się niską jakością.

W naszych warunkach gatunkami rozmnażającymi się wyłącznie wegetatywnie są: wierzba, topinambur, miskantus i rdest sachaliński, a poprzez nasiona można rozmnażać ślazier i różę oraz w bardzo ograniczonym zakresie – spartinę. Nasiona spartiny w naturalnych warunkach charakteryzują się podwójnym okresem spoczynku, co powoduje, że dopiero 2 lata po zbiorze są zdolne do kiełkowania.

Spartina i miskantus mogą być rozmnażane przez kultury tkankowe i rizomy. Dobre rizomy spartiny powinny mieć kształt litery J i zawierać 8-30 cm suchego pędu, a na części podziemnej powinno znajdować się 3-5 oczek (27).

Według badań W a r y ł o (63) do uzyskania wysokiego plonu biomasy miskantusa należy użyć rizomów o masie około 65 g i 5 oczkach. Rośliny powstałe z większych rizomów, o większej liczbie oczek, dają większą liczbę pędów o większej masie. Rizomy można pozyskiwać wiosną po ruszeniu wegetacji lub późną jesienią. W przypadku zbioru jesienią muszą one być przechowywane w stanie wilgotnym w chłodnych pomieszczeniach. Rizomy mogą być wykopywane ręcznie lub cięte mechanicznie broną talerzową, której talerze ustawione są równoległe do kierunku jazdy. Najlepsze rizomy uzyskuje się z 2-3-letnich roślin.

Rdestowiec w naszych warunkach klimatycznych wytwarza tylko kwiaty męskie i rozmnaża się przez części systemu korzeniowego lub części pędów przysypane wilgotną glebą. Większość form rdestowca rosnących w Polsce, to prawdopodobnie mieszańiec o nazwie rdest czeski (*Reynoutria bohemica*).

Zdolność kiełkowania świeżo zebranych nasion ślazuwca waha się w granicach kilku procent (8). Niska zdolność kiełkowania jest spowodowana nieprzepuszczalną okrywą nasienną. Wszystkie zabiegi zwiększające przepuszczalność okrywy nasiennej, takie jak: skaryfikacja, moczenie w gorącej wodzie, kwasie siarkowym itp. poprawiają zdolność kiełkowania nasion (8). Ślazuwiec może być rozmnażany poprzez nasiona, jak i z części wegetatywnych.

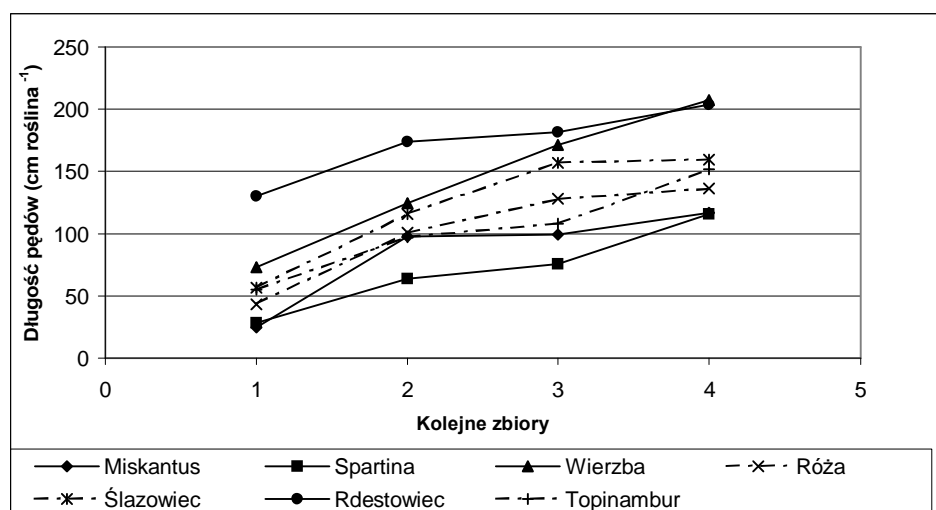
Róża wielkokwiatowa może być rozmnażana z nasion lub części wegetatywnych. Czerwone owoce o średnicy około 7 mm zawierają wiele drobnych nasion wymagających dwóch lat do skielkowania. W okresie zimy dochodzi do uszkodzenia okrywy nasiennej i wzrostu jej przepuszczalności, następnie nasiona róży wymagają okresu ciepłej pogody, aby nastąpiło dojrzewanie zarodka zakończone kiełkowaniem. Proces ten można przyspieszyć stosując skaryfikację nasion, następnie umieszczając je w temperaturze 25-30°C przez okres 2-3 tygodni dla imbibicji. Dalej nasiona przenosimy do temperatury kilku stopni powyżej zera i trzymamy przez następne 4 tygodnie, aby skielkowały. Rozmnażanie przez części wegetatywne polega na pocięciu na wpół zdrewniałych pędów na odcinki z oczkami i wysadzeniu ich wczesną wiosną. Można również wybrać zdrewniałe pędy o grubości ołówka i wysadzać je jesienią, jednak powinny być dobrze przykryte glebą, aby nie przemarzły (www.ibiblio.org)

Topinambur może być rozmnażany przez bulwy, rizomy, odcinki pędów, kultury tkankowe i nasiona. W praktyce podstawowym sposobem rozmnażania są bulwy o masie 45-60 g, charakteryzujące się okresem spoczynku wynoszącym od 54 do 200 dni w temperaturze zbliżonej do zera (29).

Tempo początkowego wzrostu oraz zdolność krzewienia i rozgałęziania się roślin

Istnieje niewiele danych w literaturze na temat szybkości wzrostu roślin energetycznych wiosną, w momencie ruszania wegetacji. Na podstawie własnych obserwacji można stwierdzić, że najszybciej zaczynają wegetację róża, spartina, rdestowiec i ślazier. Najszybsze przyrosty elongacyjne stwierdzono w przypadku rdestowca, gdzie w maju obserwowano przyrosty pędów wynoszące 5 cm dziennie. Miskantus największe przyrosty osiąga w czerwcu i lipcu. Nowe pędy spartiny pojawiają się w większości w kwietniu, chociaż początki tego procesu można obserwować już w marcu, pod warunkiem, że gleba nie jest zmarznięta.

W naszych badaniach u wszystkich 7 gatunków długość łodyg sukcesywnie zwiększała się w czasie ontogenezy (rys. 1). Pod koniec wegetacji, we wrześniu, najdłuższymi łodygami – w granicach 2 m – charakteryzowały się rośliny wierzby i rdestowca, a najkrótszymi, niewiele ponad 1 m, łodygi traw – miskanta i spartiny. Podobne badania prowadził M a j t k o w s k i w bydgoskim ogrodzie botanicznym, gdzie obserwowano wzrost i akumulację biomasy u roślin miskantusa i spartiny (cyt. za 51). W drugim roku uprawy rośliny miskantusa charakteryzowały się pędami prawie trzykrotnie wyższymi niż w naszych badaniach i osiągały wysokość 2,75 m. Podobnie wysokie pędy (2,4 m) u roślin spartiny obserwowano dopiero po czwartym roku uprawy. Po kilku latach wegetacji wysokość roślin miskantusa olbrzymiego może dochodzić nawet do 4 m (36). Podobnie jak inne trawy typu C_4 , spartina preriowa jest okazałą rośliną wyrastającą do maksymalnej wysokości ponad 2 m (31). Z danych literaturowych wynika, że prawidłowo posadzona i pielęgnowana wierzba może wy-

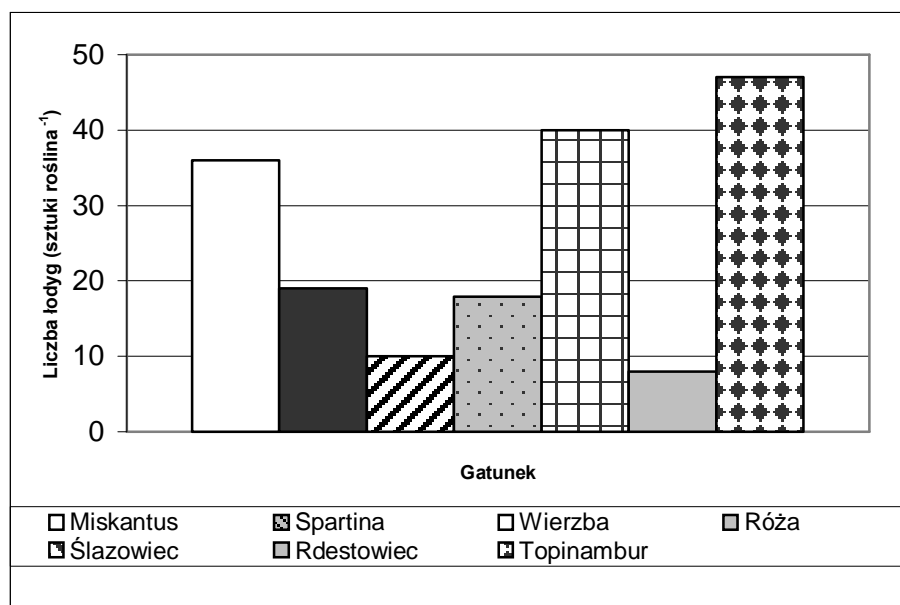


Rys. 1. Zmiany długości łodyg w czasie wegetacji (średnie z 5 powtórzeń)

Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

tworzyć pędy o wysokości 2-3 m, co potwierdzają również nasze badania (rys. 1). Róża bezkolcowa odmiany Jatar tworzy po kilku latach wegetacji rozłożyste krzewy o wysokości 4-7 m (24, 25, 40), chociaż w drugim roku uprawy długość jej łukowatych pędów nie przekraczała 1,5 m (rys. 1). Rdestowiec po kilku latach osiąga przeciętną wysokość ok. 3 m (42), a maksymalną do 6 m (25). Jest to gatunek silnie rosnący w ciągu pierwszych miesięcy wegetacji, a później przyrosty są znacznie wolniejsze (rys. 1). W przypadku roślin topinambura maksymalna wysokość pędów nadziemnych zależy od genotypu i waha się od 2 do 3 m (59).

Inną ważną cechą roślin energetycznych decydującą o ich produktywności jest zdolność krzewienia i rozgałęziania się. W naszych badaniach najintensywniej krzewiły się rośliny topinambura, ślazuca i miskantusa, natomiast najmniejszą liczbę łodyg obserwowano u rdestowca i wierzby. Niewiele jest danych w literaturze dotyczących stopnia krzewienia się porównywanych gatunków roślin energetycznych. Z badań W a r y ł o (63) wynika, że liczba pędów i długość pędów miskantusa olbrzymiego w pierwszym i drugim roku wegetacji zależy od masy i pokroju (liczby pąków) wysadzanych rizomów. Z rizomów średnich i dużych w drugim roku uprawy uzyskano, podobnie jak w prezentowanych badaniach, rośliny miskantusa odpowiednio z 31 i 45 pędami (63). M a j t k o w s k i i in. (42) donoszą, że rośliny spartiny preriowej, która jest trawą luźnokępkową, zwarty łan tworzą dopiero w trzecim roku uprawy (9), co potwierdzają także nasze badania (rys. 2). Według A n t e c k i e j (2) i J a b ł o n -



Rys. 2. Średnia liczba łodyg na pojedynczej roślinie w czasie całej wegetacji (średnie z 5 powtórzeń i 4 terminów pomiaru)

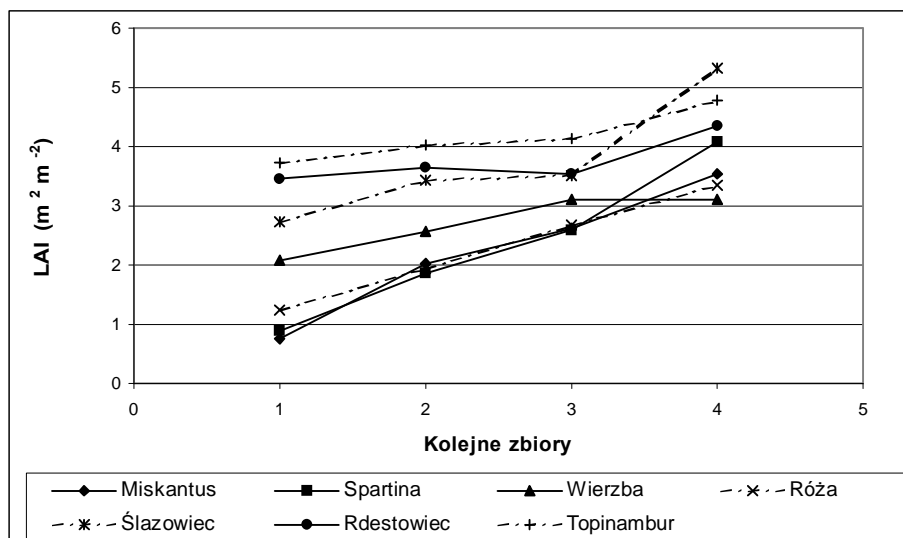
Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

s k i e g o (25) róża multiflora odmiany Jatar może być wykorzystywana do celów energetycznych dopiero w kolejnych latach wegetacji po rozkrzewieniu się karpki. Rośliny ślazuca corocznie odrastają, zwiększając liczbę łodyg od jednej w pierwszym roku do 20-30 w czwartym i następnych latach uprawy (8). Z prezentowanych wyników badań wynika, że stopień krzewienia się roślin ślazuca jest już duży w drugim roku uprawy (rys. 2). Według S w a n t o n a (59) liczba łodyg i cieńszych pędów u roślin topinambura zależy od genotypu, agrotechniki i warunków uprawy i kształtuje się od 30 do 50, co obserwowano również w naszych badaniach. W drugim roku uprawy liczba łodyg słonecznika bulwiastego przekraczała 45 sztuk w przeliczeniu na roślinę (rys. 2). M c L a u r i n i K a y s (43) stwierdzili, że liczba łodyg i cieńszych pędów roślin słonecznika bulwiastego zmienia się w trakcie ontogenezy i osiąga maksymalne wartości w ciągu pierwszych 8 tygodni wegetacji. Cecha ta zależy także od wielkości bulw użytych do nasadzeń (30).

Produktywność fotosyntetyczna

Produktywność fotosyntetyczna jest warunkowana wielkością globalnej fotosyntezy rozumianej jako wypadkowa intensywności fotosyntezy, wielkości aparatu fotosyntetycznego oraz czasu trwania fotosyntezy (18). Powierzchnię liści można w warunkach ładu analizować za pomocą wskaźnika LAI, definiowanego jako stosunek powierzchni organów asymilacyjnych całego ładu do powierzchni gruntu zajmowanego przez ten ład. W naszych badaniach przez cały okres wegetacji LAI wykazywał tendencję wzrostową u wszystkich porównywanych gatunków roślin (rys. 3). Wartości wskaźnika LAI były najwyższe w łanie ślazuca, rdestowca i topinambura od początku do końca wegetacji, a u pozostałych gatunków kształtowały się na niższym, ale zbliżonym do siebie poziomie. W badaniach innych autorów powierzchnia liści pojedynczej 54-dniowej rośliny miskantusa olbrzymiego wynosiła około 0,3 dm² (13). Jednoroczne rośliny miskantusa charakteryzowały się wartościami LAI wynoszącymi 0,78 przy nasadzeniach rizomów na jesieni i 1,67 przy nasadzeniach wiosennych (53). W warunkach północnej Francji wskaźnik powierzchni liści ładu kilkuletnich roślin miskantusa mierzony latem osiągał wartości w granicach 9-12 m² · m⁻² (60). Według K a y s i N o t t i n g h a m (29) LAI ładu słonecznika bulwiastego zwiększa się w sposób wykładniczy we wczesnych fazach ontogenezy i osiąga optymalne wartości w granicach 4-6. Podobne wartości wskaźnika LAI (około 5) obserwowano pod koniec wegetacji w prezentowanym doświadczeniu (rys. 3). M o n t i i n (46) wskazywali na wyższe wartości LAI ładu topinambura, w granicach 5-8, w zależności od stopnia zaopatrzenia roślin w wodę.

W naszych badaniach najwyższą intensywnością fotosyntezy netto (Pn) w granicach 25-28 μmoli CO₂ · m⁻² · s⁻¹, mierzoną w warunkach połowych przy natężeniu napromieniowania (1200-1400 μmol PAR m⁻² · s⁻¹), stężeniu CO₂ około 300-350 μmol · mol⁻¹ i w temperaturze wahającej się od 25 do 30°C, charakteryzowały się liście miskantusa i spartiny (traw cyklu C₄). Średnie wartości Pn powyżej 15 μmoli CO₂ · m⁻² · s⁻¹ obserwowano dla liści bylin dwuliściennych, a najniższe dla liści wierzby i róży (rys.

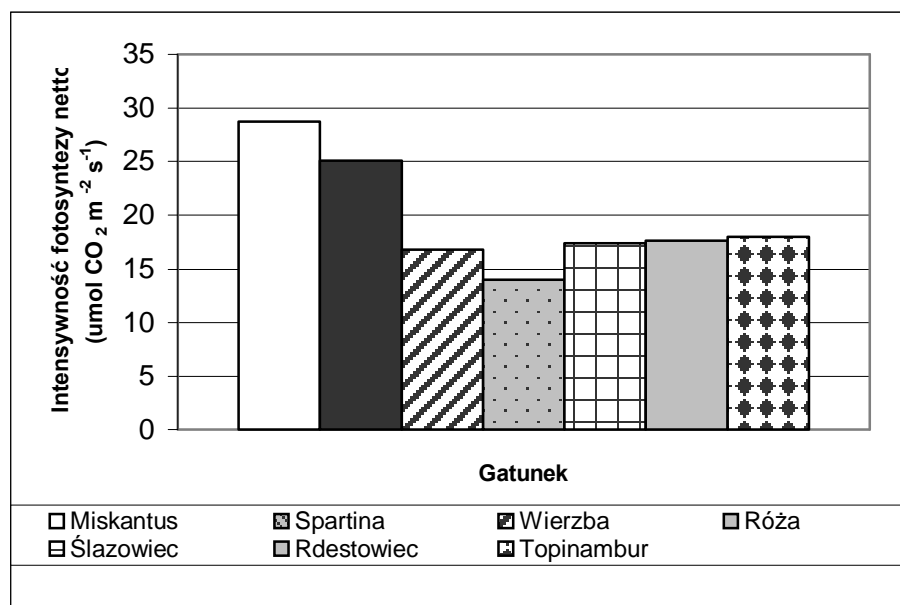


Rys. 3. Zmiany wskaźnika powierzchni ładu (LAI) w czasie wegetacji roślin (średnie z 15 powtórzeń)

Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

4). Rośliny o cyklu fotosyntezy C_4 potencjalnie charakteryzują się dwukrotnie wyższą intensywnością fotosyntezy netto niż rośliny C_3 , ale optymalna temperatura ich fotosyntezy i punkt wysycenia tego procesu przez PAR (fotosyntetycznie aktywne promieniowanie) są także wyższe w porównaniu z roślinami C_3 (38, 39).

Wcześniejsze doświadczenia prowadzone w SGGW (53, 63) wskazują, że maksymalna intensywność fotosyntezy liści miskantusa wynosi około $31-35 \mu\text{moli CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, a wartości te obserwowano w warunkach polowych, przy natężeniu napromieniowania powyżej $1800 \mu\text{mol PAR} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ i temperaturze około 30°C , w godzinach przedpołudniowych. W badaniach prowadzonych przez Pattona i Jonesa (49) na 4 gatunkach wierzby maksymalna intensywność fotosyntezy (P_n , max) mierzona w warunkach punktu wysycenia świetlnego kształtowała się w granicach $14-22 \mu\text{moli CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ w zależności od genotypu. Intensywność P_n trzech innych gatunków wierzby osiągała maksymalne wartości w godzinach przedpołudniowych – około 10 rano i wahała się od 11 do $16 \mu\text{moli CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ w zależności od genotypu (34). Zaprezentowane dane innych autorów porównywalne są z wynikami naszych badań, gdzie P_n wyrośniętych liści wierzby konopianki wynosiła ponad $15 \mu\text{moli CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 4). Intensywność P_n liści słonecznika bulwiastego była liniowo skorelowała z przewodnictwem szparkowym-gs do wartości równej $0,55 \text{ mola H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($r = 0,91^{**}$), a maksymalna wartość P_n wynosiła około $30 \mu\text{moli CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (43). W naszych badaniach intensywność fotosyntezy netto liści topinambura była dużo niższa, gdyż wynosiła około $18 \mu\text{moli CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 4). Kay i Nottingham (29) stwierdzają, że potencjalna P_n topinambura jest wyższa niż innych roślin



Rys. 4. Intensywność fotosyntezy netto wyrośniętych liści
(średnie z 4 terminów pomiarów po 10 powtórzeń w każdym terminie)

Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

C_3 i zależy od genotypu (zmiennosc w obrębie różnych klonów wynosi ponad 40%), fazy rozwojowej rośliny, a także położenia liści na roślinie. Punkt wysycenia tego procesu przez PAR wynosi dla słonecznika bulwiastego ponad $1700 \mu\text{mol PAR} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (55), a w naszych badaniach natężenie napromieniowania było niższe, dlatego wskaźnik P_n wyrośniętych liści mógł nie osiągnąć potencjalnych wartości.

Udział łodyg w masie części nadziemnej

Ważnym procesem determinującym produktywność rośliny jest również dystrybucja asymilatów z donorów – głównie liści – do organów stanowiących plon rolniczy (20, 57). W przypadku badanych roślin energetycznych plonem rolniczym są łodygi i cieńsze pędy. W naszych badaniach udział suchej masy łodyg w masie całej części nadziemnej rośliny kształtował się na początku wegetacji u większości gatunków na poziomie około 40-50%. W trakcie ontogenezy roślin udział suchej masy łodyg stopniowo wzrastał i pod koniec okresu wegetacji obserwowano znaczną przewagę biomasy łodyg w stosunku do suchej masy liści. Najwięcej biomasy w plonie rolniczym lokowały rośliny wierzby i topinambura – ponad 80%, następnie miskantusa, róży i ślázowca (około 70%), a wyraźnie mniej spartiny i rdestowca (około 60%).

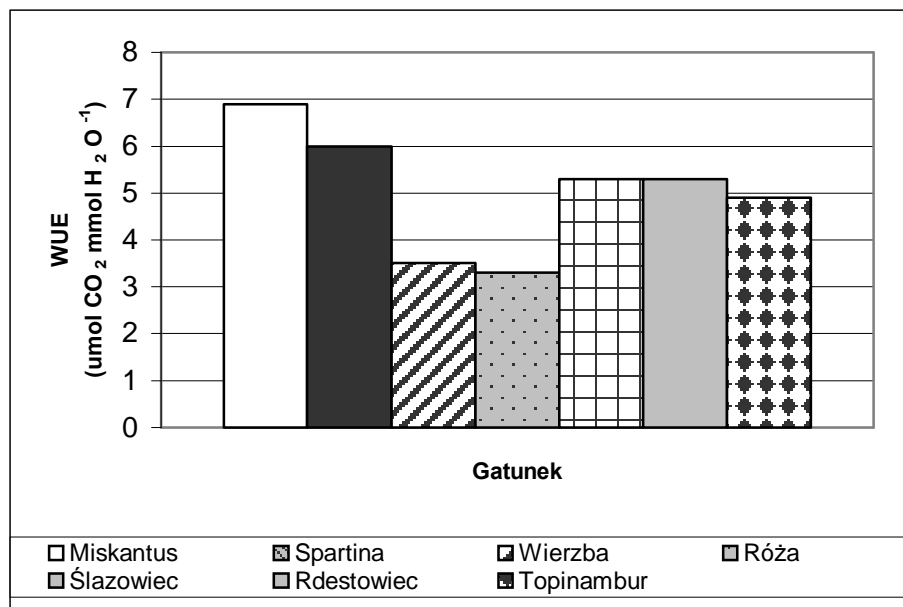
Niewiele jest danych w literaturze dotyczących dystrybucji biomasy w części nadziemnej porównywanych gatunków roślin energetycznych. Na roślinach miskantusa

prowadzono szczegółowe badania wzrostu korzeni, których sucha masa osiągała maksymalne wartości w granicach 11-14 t · ha⁻¹ w zależności od fazy wzrostu rośliny (48), co może stanowić około połowy maksymalnej suchej masy akumulowanej w części nadziemnej (23). Podobnych zależności można się spodziewać w przypadku innej trawy typu C₄ – spartiny preriowej. Rośliny topinambura pomiędzy 8 a 18 tygodniem wegetacji akumulują 60-80% suchej masy w części nadziemnej, głównie w łodygach, cieńszych pędach i ogonkach liściowych (43). Po 20 tygodniu następuje remobilizacja asymilatów, sucha masa blaszek liściowych i pędów obniża się, a podwyższa się udział rizomów i bulw. Udział bulw w masie całej rośliny pod koniec wegetacji, około 30 tygodni po wysadzeniu bulw matecznych, może wynieść nawet 70%. Jednocześnie około 7 t · ha⁻¹ biomasy jest akumulowane w innych organach niż bulwy (43).

Wymagania wodne i tolerancja na suszę

Jednym z istotnych czynników zewnętrznych ograniczających akumulację biomasy roślin jest niedobór wody w podłożu i często wiążący się z tym stres suszy. Czynniki te nie tylko modyfikują intensywność fotosyntezy czy oddychania, ale przede wszystkim wpływają na intensywność transpiracji. W prowadzonych badaniach rośliny były nawadniane, czyli w miarę optymalnie zaopatrzone w wodę, ale liście poszczególnych gatunków transpirowały z istotnie różną intensywnością. W trakcie całej ontogenezy najwyższą intensywnością transpiracji (E) charakteryzowały się liście spartiny i wierzby, około 6 mmol H₂O · m⁻² · s⁻¹ i miskantusa – 4,5 mmol H₂O · m⁻² · s⁻¹, natomiast najslabiej, nieco powyżej 3 mmol H₂O · m⁻² · s⁻¹ transpirowały liście bylin dwuliściennych – rdestowca, ślazuwca i topinambura. W badaniach F o t i i in. (17) intensywność transpiracji liści miskantusa olbrzymiego zależała od dostępności wody w glebie i kształtowała się około 3 mmol H₂O · m⁻² · s⁻¹ przy skrajnym deficycie wody oraz około 10 przy optymalnym zaopatrzeniu roślin w wodę. Intensywność transpiracji liści wierzby osiąga maksymalne wartości pomiędzy godziną 10 a 12 i jest zróżnicowana genotypowo – E trzech gatunków wierzby wynosiło 3-6 mmol H₂O · m⁻² · s⁻¹ (37). Podobną (około 6 mmol H₂O · m⁻² · s⁻¹) intensywność transpiracji wyrosniętych liści wierzby konopianki obserwowano w naszych badaniach.

Współczynnik wykorzystania wody (WUE), obliczany jako stosunek intensywności fotosyntezy netto do intensywności transpiracji, świadczy o efektywności asymilacji CO₂ w przeliczeniu na jednostkę wytranspirowanej wody (rys. 5). W naszych badaniach, średnio przez cały okres wegetacji, najwyższym WUE, około 6-7 μmol CO₂ · mmol H₂O⁻¹, charakteryzowały się liście traw cyklu C₄, średnim (5 μmol CO₂ · mmol H₂O⁻¹) byliny dwuliścienne, a prawie dwukrotnie niższym rośliny wierzby i róży (rys. 5). WUE traw o cyklu fotosyntezy C₄, jak obserwowano w prezentowanym doświadczeniu, zwykle jest nawet dwukrotnie wyższe niż roślin C₃ (38, 56). Współczynnik wykorzystania wody młodych roślin miskantusa olbrzymiego, obliczany na podstawie stosunku suchej masy łodyg do wielkości transpiracji, w przeliczeniu na roślinę, wynosił w badaniach wazonowych około 2 g s.m. · kg⁻¹ H₂O, a przeliczony na



Rys. 5. Współczynnik wykorzystania wody (WUE) wyrośniętych liści wyliczony jako stosunek intensywności fotosyntezy netto do transpiracji (średnie z 4 terminów pomiarów po 10 powtórzeń w każdym pomiarze)

Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

suchą masę całej rośliny wynosił około $13 \text{ g s.m.} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ i nie zależał od stopnia zaopatrzenia roślin w wodę (13). W badaniach polowych prowadzonych na 5-letnich roślinach wskaźnik WUE obliczony dla samych łodyg wynosił $7,8 \text{ g s.m.} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ (5). Według B e a l e i L o n g a (4) rośliny miskantusa na wyprodukowanie 15 t suchej masy z ha zużywają w ciągu roku 450 mm wody. Korzenie miskantusa są w stanie pobierać wodę z gleby z głębokości 2 m. Należy również zauważyć, że miskantus, jak i inne rośliny energetyczne tworzące zwarty łąn zatrzymują około 20-30% opadów na liściach i woda ta nigdy nie dochodzi do gleby. Ocenia się, że na każdy 1 mm deficytu wody w glebie plon biomasy miskantusa obniża się o 90 kg (12). C l i f t o n - B r o w n i L e w a n d o w s k i (13) obserwowali pod wpływem niedoboru wody w podłożu znaczne obniżenie akumulacji biomasy w części podziemnej (korzenie i rizomy) i nadziemnej roślin trzech gatunków miskantusa. Stosunek suchej masy części nadziemnej do podziemnej zmieniał się u miskantusa olbrzymiego w niewielkim stopniu, od 0,19 do 0,22 w miarę pogłębiania się suszy, gdy zawartość wody w glebie w czasie 30 dni wegetacji obniżała się od 18 do 6% (13).

WUE wierzby podlega rytmice dobowej, najwyższe wartości osiąga około godziny 10 rano i jest cechą genotypową (37). W badaniach L i u i in. (37) zróżnicowanie wartościami WUE liści trzech gatunków wierzby wynosiło od $2 \text{ do } 8 \text{ μmol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$. Wierzba jest gatunkiem wymagającym do bujnego wzrostu ponad

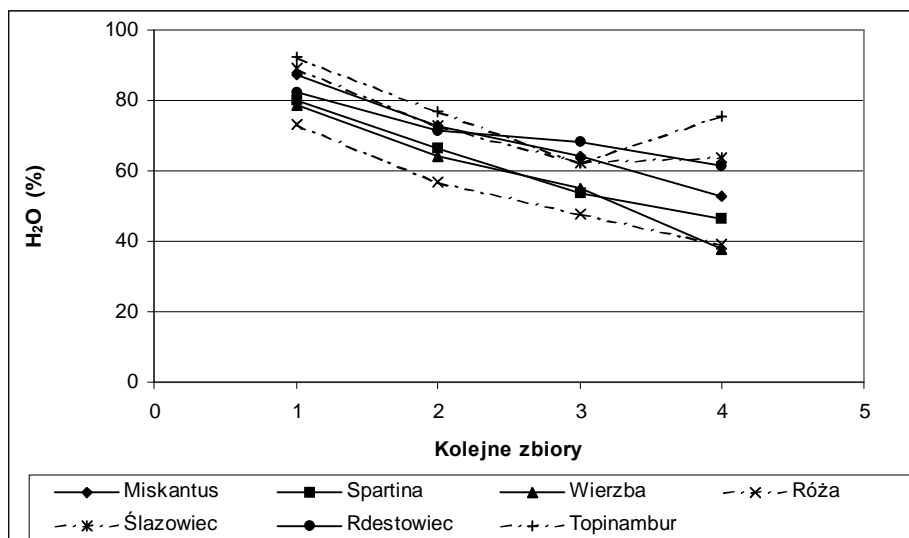
500 mm opadów rocznie, a susza może spowodować spadek plonowania nawet o 50%. Według C o n d e i in. (14) słonecznik bulwiasty jest to roślina stosunkowo tolerancyjna na niedobory wody, a jego współczynnik wykorzystania wody kształtuje w granicach 1,1-1,9 g suchej masy na kg wytranspirowanej wody.

W naszych badaniach wewnętrzny współczynnik wykorzystania wody (WUE_i), czyli stosunek intensywności fotosyntezy netto do wartości przewodnictwa szparkowego, był także zdecydowanie najwyższy w liściach miskantusa i spartiny; wynosił odpowiednio 140 i 130 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol H}_2\text{O}^{-1}$, co świadczy o bardzo sprawnej fotosyntezie przeliczonej na jednostkę otwarcia aparatów szparkowych. U pozostałych gatunków obserwowano zbliżone wartości tego współczynnika – 60 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol H}_2\text{O}^{-1}$, czyli prawie o 50% niższe w porównaniu z trawami. Wśród czterech gatunków wierzby *Salix viminalis* charakteryzowała się najwyższymi wartościami P_n , max, ale także wysokimi wartościami wewnętrznego współczynnika wykorzystania wody (WUE_i), ze względu na niewielki stopień otwarcia szparek przy stosunkowo intensywnej fotosyntezie (49).

W suchym 2006 roku jedynie rdestowiec sachaliński nie wykazał żadnej reakcji na niedobór wody. Największy spadek plonu biomasy na poletkach bez nawadniania, w porównywanych z nawadnianymi, wystąpił w przypadku: wierzby – 50%, miskantusa – 34%, róży i spartiny – 28% oraz ślázowca – 13%. Dane te wskazują, że prawdopodobnie najbardziej przydatny do uprawy na glebach słabych, charakteryzujących się deficytem wody, może być rdestowiec sachaliński. Trzeba jednak pamiętać o niskich plonach tej rośliny, sięgających $7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ suchej masy.

Wysychanie roślin w okresie jesieni i zimy

Biomasa roślin energetycznych w czasie zbioru powinna zawierać jak najmniej wody, co znacznie zmniejsza koszty dosuszania i transportu. W naszych badaniach, w trakcie ontogenezy u większości badanych gatunków obserwowano stopniowe zmniejszanie się zawartości wody w łodygach (rys. 6). Pod koniec wegetacji, we wrześniu, najniższą zawartość wody – około 40% – stwierdzono w łodygach wierzby i róży, następnie w łodygach traw C_4 – około 50%, zaś najwyższą u bylin dwuliściennych – około 60-70 %. Zawartość wody w plonie biomasy zmieniała się jednak bardzo istotnie w okresie zimy (tab. 1). Wczesną wiosną zawartość wody w plonie wierzby i róży wynosiła około 40%, spartiny – 20% oraz miskantusa, ślázowca i rdestowca – 10%. Rośliny topinambura zbierano późną jesienią, gdyż zagrożone one są wyleganiem w przypadku intensywnych opadów śniegu, a zawartość wody w łodygach w momencie zbioru wynosiła około 40%. W badaniach J e ż o w s k i e g o (28) przy zimowym terminie zbioru łodygi miskantusa miały wilgotność około 20%, a wierzby 40%. Podobnie jak w naszych badaniach A n t e c k a (2) obserwowała, że biomasa róży w momencie zbioru zawiera ponad 40% wody. Biomasa ślázowca zbierana jesienią, w końcu wegetacji może zawierać ponad 40% wody, zaś przy zbiorach zimowych zawartość wody znacznie obniża się, nawet do 20% (8). Z porównawczych



Rys. 6. Zmiany zawartości wody w łodygach w czasie wegetacji roślin (średnie z 5 powtórzeń)
 Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

Tabela 1

Zawartość wody w biomacie (%) w czasie końcowego zbioru

Gatunek	Zawartość wody w czasie zbioru (%)
Miskantus	8,32
Spartina	21,11
Wierzba	46,28
Róża	39,22
Ślázowiec	10,50
Rdestowiec	12,58
Topinambur	38,67

Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

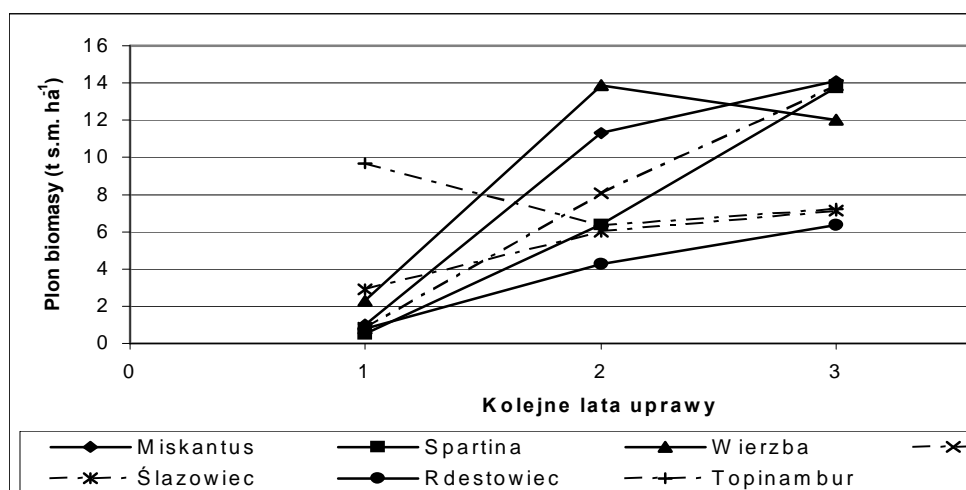
badania Borkowski (6) wynika, że bez względu na termin zbioru biomasa wierzby w połowie składa się z wody, zaś masa ślázowca zbieranego zimą zawiera o połowę mniej wody, co potwierdzają również wyniki naszych badań (rys. 6; tab. 1). Według Jabłońskiego (25) pędy rdestowca zbierane jesienią lub zimą nie wymagają dosuszania, gdyż zawierają 32-36% wody.

Plon biomasy

Na rysunku 7 przedstawiono dynamikę zmian plonowania porównywanych gatunków roślin w kolejnych latach uprawy. W pierwszym roku wegetacji plon suchej masy był zbliżony u większości gatunków i kształtował się w granicach od 1 do 3 ton na ha, a tylko topinambura w granicach $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (rys. 7). W kolejnym roku obserwowano

wyraźny wzrost plonowania w porównaniu z pierwszym rokiem u większości gatunków z wyjątkiem topinambura, gdzie stwierdzono obniżenie plonu biomasy prawie o $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. W drugim roku uprawy najwyższe plony biomasy, powyżej $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, uzyskano z wierzby i miskantusa, 6-8 ton ze spartiny, róży i ślazuwca, a tylko nieco powyżej $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ z rdestowa. W trzecim roku uprawy plon wierzby był niższy w porównaniu z osiągniętym w drugim roku wegetacji, a topinambura kształtował się na zbliżonym poziomie (rys. 7). Najwyższe plony suchej masy w trzecim roku uprawy – 14 ton na ha – stwierdzono w przypadku miskantusa, spartiny i róży, nieco niższe ($12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) u wierzby i najniższe ($6-7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) u bylin dwuliściennych. Sumaryczne plony za okres trzech lat (2005–2007) były zbliżone w przypadku miskantusa i wierzby, odpowiednio 26 i 28 ton z ha, nieco niższe, około 20 ton, u spartiny, róży i topinambura oraz najniższe u ślazuwca – 16 t i rdestowca – 11 t (tab. 2).

W doświadczeniu polowym przeprowadzonym w Pizie we Włoszech w latach 1992–1995 plon suchej masy łodyg miskantusa olbrzymiego wynosił $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w pierwszym roku uprawy i $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w kolejnych latach badań (16). W drugim roku uprawy plony biomasy miskantusa wahały się od 10 do $7,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w zależności od terminu zbioru – wrzesień do lutego (54). Podobnie w trzecim roku, przy zbiorze w październiku plon łodyg wynosił 23,4, a przy marcowym $20,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (52). Miskantus pełnię plonowania osiąga w 3-5 roku uprawy (36). W centralnej i północnej Europie, gdzie całkowita radiacja i średnie temperatury roczne są prawie dwukrotnie niższe (ok. $3500-3900 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ i $7-8^\circ\text{C}$) niż w krajach Europy południowej oraz krótszy jest okres wegetacji, przeciętne plony miskantusa wynoszą $10-25 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (34, 36). Spartina preriowa, podobnie jak miskantus, osiąga pełnię plonowania w 3-5 roku wegetacji, a potencjalne plony waha się od 17 do 29 t suchej masy z ha (31, 32).



Rys. 7. Plon suchej masy części nadziemnej w trzech kolejnych latach uprawy (2005–2007)
Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

Tabela 2

Sumaryczny plon po trzech pierwszych latach uprawy (2005–2007)

Gatunek	Sumaryczny plon z 3 lat uprawy (t s.m. · ha ⁻¹)
Miskantus	26,4
Spartina	20,6
Wierzba	28,1
Róża	22,7
Ślázowiec	16,0
Rdestowiec	11,4
Topinambur	23,2

Źródło: Chołuj D., Podlaski S. i in., dane niepublikowane.

Z badań przeprowadzonych w Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w latach 1997–2001 wynika, iż wzrost gęstości sadzenia wierzby z 20 do 40 tys. szt. na ha zwiększał istotnie plon suchej masy z 16 do 18,7 t · ha⁻¹ · rok⁻¹ (61). Przy dalszym wzroście zagęszczenia do 60 tys. roślin na ha odnotowano dalszy wzrost plonu (do 19,4 t s.m. · ha⁻¹ · rok⁻¹), lecz nie był on udowodniony statystycznie. Tendencję do wyższego plonowania wierzby obserwowano w piątym i szóstym roku jej uprawy (62). Najwyższe plony suchej masy drewna wierzbowego uzyskiwano na glebach organicznych (mułowo-murszowych) przy zastosowaniu nawożenia mineralnego (N : P : K – 40 : 60 : 80 t · ha⁻¹) w trzyletnim cyklu zbioru – 18,4 t · ha⁻¹ · rok⁻¹ (58). W badaniach A d e g b i d i i in. (1), gdzie jednym z czynników była gęstość sadzenia, stwierdzono również, że najwyższe plony uzyskiwano przy zagęszczeniu 37 tys. roślin · ha⁻¹. Zastosowano tam dużą rozpiętość gęstości sadzenia (15; 37; 107 tys. roślin · ha⁻¹ *Salix* spp.), a rośliny pozyskiwano w trzech cyklach zbioru (co rok, co dwa i co trzy lata). Średnia roczna produkcja biomasy w zależności od klonu, nawożenia i nawadniania wynosiła od 2,5 do 21,5 t s.m. · ha⁻¹ · rok⁻¹. W przypadku róży bezkolcowej odmiany Jatar maksymalny plon wynosi ok. 10-15 t · ha⁻¹ biomasy w 4-5 roku wegetacji (2, 25). Po drugim roku uprawy plony ślázowca pensylwańskiego według B o r - k o w s k i e j i S t y k a (8) wynosiły 13 t · ha⁻¹ i były tylko o 1,5 t · ha⁻¹ niższe niż plony biomasy wierzby. Ślázowiec uprawiany na osadach ściekowych wydał plon ponad 11 t · ha⁻¹, zaś na glebie mineralnej kl. III – 17,8 t · ha⁻¹. W warunkach obydwu siedlisk wyższe plony uzyskiwano z rozmnożeń wegetatywnych, w porównaniu z wysiewem nasion do gruntu (7). W przypadku roślin rdestowca sachalińskiego najwyższe plony uzyskuje się po 3-4 roku uprawy i wynoszą one w warunkach południowej i centralnej Europy 20-40 t · ha⁻¹ świeżej masy przy zawartości wody około 32-36% (9, 42), co w przeliczeniu na suchą masę waha się pomiędzy 15 a 30 t · ha⁻¹. Według K a y s i N o - t t i n g h a m (29) plony suchej masy części nadziemnej słonecznika bulwiastego wahają się od 4 do 30 t · ha⁻¹ w zależności od genotypu, warunków klimatycznych (fotosyntetycznie czynnej radiacji, temperatury, opadów), rodzaju gleby i wieku plantacji. Całkowita sucha masa, łącznie z bulwami, wynosi od 6-9 t · ha⁻¹ w warunkach

niekorzystnych do 20-30 t · ha⁻¹ w warunkach zbliżonych do optymalnych. Przeciętna sucha masa bulw kształtuje się na poziomie 4-15 t · ha⁻¹ (29).

Parametry jakościowe biomasy wykorzystywanej do spalania

W literaturze naukowej niewiele jest danych dotyczących jakości biomasy, a dodatkowo wyniki są dość rozbieżne, co może wynikać ze specyficznych interakcji środowiska i genotypu (47). Niska jakość biomasy może w istotny sposób obniżać ilość energii uzyskiwanej z roślin energetycznych w wyniku obniżenia wartości opałowej oraz gorszej wydajności pracy maszyn i urządzeń grzewczych. Stwierdzono, że wartość opałowa jest ujemnie skorelowana z zawartością popiołu. Zwiększeniu zawartości popiołu o 1% towarzyszy zmniejszenie wartości opałowej o 0,2 MJ · kg⁻¹ (11). Ponadto popioły i składniki nieorganiczne, głównie o charakterze alkalicznym, mogą stać się przyczyną wielu problemów związanych z prawidłowym funkcjonowaniem kotłów. Przyczyną pogorszenia efektywności spalania biomasy jest żużlowanie, osadzanie popiołów i korozja. Stopień żużlowania, osadzania popiołów i korozji jest ściśle zależny od zawartości składników mineralnych w spalanej biomase (26). Jest więc oczywiste, że efektywność spalania biomasy zależy od jej właściwości (15, 63). W związku z tym ocena składu chemicznego biomasy jest niezbędna do wyboru technologii jej przetwarzania, a także opracowania niezbędnych modyfikacji urządzeń i instalacji do jej spalania. Dobrze znany jest fakt, że podczas spalania biomasy lotne składniki, takie jak siarka i chlor mogą kondensować w formie różnych związków chemicznych, które w wysokiej temperaturze i w obecności potasu oraz krzemu tworzą lepkie osady na częściach grzewczych kotłów. Potas stanowi około 1% suchej masy roślin energetycznych i prawie cała jego ilość uwalnia się w postaci gazowej w czasie spalania. Krzem w obecności potasu i wapnia łatwo tworzy krzemiany o odczynie zasadowym. Fosfor z kolei zwiększa zdolność biomasy do żużlowania powierzchni komór paleniskowych.

Ze względu na wpływ na żużlowanie powierzchni komór paleniskowych stosunek pomiędzy zawartością K, Ca i Si powinien być brany pod uwagę w ocenie jakości paliw. R e u m e r m a n n i V a n d e r B e r g (50) stwierdzili, że biomasa miskantusa ma wysoki stosunek Si/K i Ca/K, co wpływa na niską zdolność do żużlowania. Nie ulega wątpliwości, że biomasa charakteryzująca się wysoką zawartością Si i Ca, a niską K dobrze nadaje się do spalania. Ponadto biomasa jest bogata w chlorki, które reagują z K powodując osadzanie osadów na powierzchniach konwekcyjnych. Dodatkowo chlorki stanowią główną przyczynę korozji występującej na powierzchni wymienników ciepła i rur grzewczych (3).

Można przypuszczać, że rośliny energetyczne charakteryzują się silnym współdziałaniem środowisko x genotyp. Współdziałanie to wpływa na zawartość popiołu i składników mineralnych, włókna, cukrów fermentujących oraz wartość opałową. Tezę tę potwierdziły badania C a s l e r a i B o e (10), którzy wykazali, że odmiany prosa różgowatego w zależności od miejsca uprawy i terminu zbioru znacznie różnią się przydatnością biomasy do spalania, gazyfikacji czy przerobu na paliwa płynne.

Liście wielu roślin energetycznych charakteryzują się większą zawartością popiołu niż organy reprodukcyjne i pędy. W związku z tym zmiana terminu zbioru może w istotny sposób wpłynąć na jakość biomasy. Badania Monti i in. (47) wykazały, że liście 6 gatunków roślin energetycznych (4 trawy wieloletnie + 2 gatunki sorga) zawsze charakteryzowały się najwyższą zawartością popiołu, prawie dwukrotnie wyższą w porównaniu z pędami i o 50% wyższą niż w częściach reprodukcyjnych (wiechy sorga). W liściach stwierdzono najwyższą koncentrację Al i Fe oraz wspólnie z wiechami sorga najwyższą zawartość N, Ca, Mg, S i Si.

Analizując zależność pomiędzy terminem zbioru, wielkością plonu i jakością biomasy należy pamiętać, że zależy ona od gatunku rośliny. W przypadku rdestowca liście stanowią 40% biomasy (Chołuj i Podlaski – dane niepublikowane), dla sorga 20% (44), podczas gdy dla prosa różgowatego straty w wyniku opadania liści sięgają tylko kilku procent.

Oprócz utraty liści w trakcie wegetacji roślin zachodzi proces translokacji składników mineralnych z pędów do rizomów, co w istotny sposób poprawia jakość zebranej biomasy. Badania Lewandowskiego i Kircherera (35) wykazały, że zastosowanie nawozów potasowych na plantacjach miskantusa zwiększyło zawartość popiołu i potasu w biomacie. Zbiór miskantusa w lutym zamiast w grudniu poprawił jakość biomasy i obniżył zawartość chloru, potasu i popiołu w wyniku opadania liści i wymycia części składników.

Podsumowanie

Ocena cech biologicznych roślin energetycznych pod kątem ich przydatności do produkcji energii jest bardzo trudna na obecnym etapie wiedzy. Wynika to z dużej interakcji genotypu i środowiska, jaki jest typowy dla wielu słabo udomowionych roślin. Prawdopodobnie w przeciętnych polskich warunkach agroklimatycznych (gleba klasy IIIa, kompleks przydatności rolniczej – pszenno-dobry) trawy C-4, takie jak miskantus czy spartina mogą okazać się lepsze niż rośliny C-3, np. wierzba lub róża. Trudno jednoznacznie określić przydatność biomasy różnych gatunków roślin do spalania. Spowodowane jest to ujemną korelacją, jaka zachodzi pomiędzy zmniejszaniem się plonu biomasy w okresie jesieni i zimy a poprawą jej jakości w wyniku opadania liści oraz wymywania części składników z pędów oraz ich translokacji do części podziemnej roślin. W związku z tym warunki wzrostu roślin, termin ich zbioru oraz pogoda w czasie zimy w istotny sposób mogą wpływać na jakość biomasy.

Literatura

1. Adegbi H. G., Volk T. A., White E. H., Adrahamsen L. P., Briggs R. B., Bickelhaupt D. H.: Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass & Bioenergy*, 2001, **20**: 6.
2. Antek A.: Nie tylko wierzba – w róży też znajdziemy energię. *Czysta Energia*, 2004, **5**: 23.
3. Baxter L. I., Miles T. R., Miules Jr. T. R., Jenkins B. M., Oden L. L.: The behavior

- of inorganic material in biomass fired power boilers: field and laboratory experiences. *Fuel Process. Technol.*, 1998, **54**: 47-78.
4. Beale C. V., Long S. P.: Seasonal dynamics of nutrient accumulation and partitioning in the perennial C₄-grass *Miscanthus x giganteus* and *Spartina cynosuroides*. *Biomass & Bioenergy*, 1997, **12**: 419-428.
 5. Beale C. V., Morison J. I. L., Long S. P.: Water use efficiency of C-4 perennial grasses in a temperate climate. *Agricult. Forest Meteorology*, 1999, **96**: 103-115.
 6. Borkowska H.: Zmiany zawartości suchej masy w plonie biomasy wierzby krzewiastej (wikliny) i ślazuwca pensylwańskiego w zależności od terminu zbioru. *Ann. UMCS, sec. E*, 2005, **60**: 155-161.
 7. Borkowska H., Styk B.: Ślazuwec pensylwański – cenny gatunek energetyczny. *Czysta Energia*, 2003, **9**: 23-13.
 8. Borkowska H., Styk B.: Ślazuwec pensylwański (*Sida hermaphrodita* Rusby). Uprawa i wykorzystanie. Wyd. II popr. i uzupełnione. AR Lublin, 2006.
 9. Budzyński W., Bielski S.: Surowce energetyczne pochodzenia rolniczego. Cz. II. Biomasa jako paliwa stałe. *Asta Sci. Pol., Agricultura*, **2004**, **3(2)**: 15-26.
 10. Casler M. D., Boe A. R.: Cultivar x environment interactions in switchgrass. *Crop Sci.*, 2003, **43**: 2226-2233.
 11. Cassida A., Muir J. P., Hussey M. A., Read J. C., Venuto B. C., O'Connell W. R.: Biofuel component concentration and yield of switchgrass in south central US environments. *Crop Sci.*, 2005, **45**: 682-92.
 12. Christou M.: Growth and productivity of *Miscanthus* under three irrigation levels in Southern Europe (Greece and Italy). *European Miscanthus Productivity Network*, 1999, 1-5
 13. Clifton-Brown J. C., Lewandowski I.: Water use efficiency and biomass partitioning of three different *Miscanthus* genotypes with limited and unlimited water supply. *Ann. Botany* **2000**, **86**: 191-200.
 14. Conde J. R., Tonatio J. L., Rodriguez-Maribona B., Lansac R., Ayerbe L.: Tuber yield of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) in relation to water stress. *Biomass & Bioenergy*, **1991**, **1**: 137-142.
 15. Demirbas A.: Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in energy and combustion science*, 2004, Doi:10.1016/j.pecs.2003.10.004.
 16. Ercoli L., Mariotti M., Masoni A., Bonari E.: Effect of irrigation fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of *Miscanthus*. *Field Crops Res.*, 1999, **63**: 3-11.
 17. Foti S., Cosentino S. L., Patane C., Copani V., Sanzone E.: Plants indicators of available soil water in the perennial herbaceous crop *Miscanthus x giganteus* Greef et Deu. *Agronomie*, **2003**, **23**: 29-36.
 18. Grzesiuk S.: Plon i plonowanie. W: *Fizjologia plonowania roślin*. Red. R. Górecki i S. Grzesiuk. UWM Olsztyn, 2002, 13-26.
 19. Grzesiuk S.: Fizjologiczna asymilacja węgla (CO₂), wody i światła w tworzeniu plonów. W: *Fizjologia plonowania roślin*. Red. R. Górecki i S. Grzesiuk. UWM Olsztyn, 2002, 160-185.
 20. Heaton E., Clifton-Brown J., Voigt T., Jones M. B., Long S. P.: Biomass crops as a source of renewable energy: European experience with *Miscanthus* and projections for Illinois. *International Conference on Climate Change and Environmental Policy*. Illinois at Urbana-Champaign, November 11-12. 2002.
 21. Hallam A., Anderson I. C., Buxton D. R.: Comparative economic analysis of perennial, annual and intercrops for biomass production. *Biomass & Bioenergy*, 2001, **21(6)**: 407-424.
 22. Heckathorn E. H., Delucia S. A.: Retranslocation of shoot nitrogen to rhizomes and roots in prairie grasses may limit loss of N to grazing and fire during drought. *Funct. Ecology*, 1996, **10**: 396-400.
 23. Himken M., Lammel J., Neukirchen D., Czypionka-Krause U., Olf H. W.: Cultivation of *Miscanthus* under West European conditions: Seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant Soil*, 1997, **189**: 117-126.

24. Jabłoński R.: Ciepło pachnące różą. *Agroenergetyka*, 2003, **3(9)**: 30.
25. Jabłoński R.: Rośliny energetyczne – wyniki badań energetyczności. *Czysta Energia*, 2004, **10(36)**: 33-34.
26. Jenkins B. M., Baxter L. L., Miles Jr. T. R., Miles T. R.: Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 1998, **54**: 17-46.
27. Jensen N.: Prairie cordgrass (*Spartina pectinata*). Plant Guide. Plant Materials Center, Bismarck, North Dakota, USDA-NRC, 2004, 4.
28. Jeżowski S.: Energia w trawie. *Czysta Energia*, 2004, **5(33)**:15.
29. Kays S. J., Nottingham S. F.: Biology and chemistry of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, **2008**.
30. Kosaric N., Cosentino G. P., Wieczorek A., Duvnjak Z.: The Jerusalem artichoke as an agricultural crop. *Biomass*, 1984, **5**: 1-36.
31. Kościk B., Kowalczyk-Juśko A., Kościk K.: Plantacje energetyczne traw wieloletnich. *Wieś Jutra*, 2004, **3**: 56-57.
32. Kowalczyk - Juśko A., Kościk B.: Technologia uprawy i wykorzystanie na cele energetyczne wybranych gatunków traw wieloletnich. *Mat. Konf.: „Nowe aspekty hodowli i technologii uprawy buraka cukrowego oraz traw na cele energetyczne”*. Bydgoszcz, 2004, 18.
33. Kuś J.: Produkcja biomasy na cele energetyczne (możliwości i ograniczenia). *Biul. Inf. Lubelskiego Oddz. PAN*, 2002, **7**.
34. Lewandowski I., Clifton-Brown J. C., Scurlock J. M. O., Huismann W.: *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass & Bioenergy*, 2000, **19**: 209-227.
35. Lewandowski I., Kicherer A.: Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. *Europ. J. Agron.*, 1997, **6**: 163-167.
36. Lewandowski I., Scurlock J. M., Lindvall E., Christou M.: The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass & Bioenergy*, 2003, **25**: 335-361.
37. Liu M. Z., Jiang G. M., Li Y. G., Gao L. M., Niu S. L., Ciu H. X., Ding L.: Gas exchange, photochemical efficiency, and leaf water potential in three *Salix* species. *Photosynthetica*, 2003, **41**: 393-398.
38. Long S. P.: C₄ photosynthesis at low temperature. *Plant Cell Environ.*, 1983, **6**: 345-363.
39. Łoboda T.: Ekologiczne uwarunkowania fotosyntetycznej produktywności agrobiocenoz. W: *Fizjologia plonowania roślin*. Red. R. Górecki i S. Grzesiuk. UWM Olsztyn, 2002, 186-220.
40. Majtkowski W.: Potencjał upraw energetycznych. *Mat. Semin. pt. „Badania właściwości i standaryzacji biopaliw stałych”*. Warszawa, 2003.
41. Majtkowski W.: Rośliny energetyczne – przegląd. *Czysta Energia*, 2003, **10**: 33-34.
42. Majtkowski W., Podyma W., Góral S.: Gatunki roślin do rekultywacji terenów zdegradowanych przez przemysł i gospodarkę komunalną. W: *Nowe rośliny uprawne na cele spożywcze, przemysłowe i jako odnawialne źródła energii*. SGGW Warszawa, 1996, 136-148.
43. McLaurin W. J., Kays S. J.: Substantial leaf shedding: a consistent phenomenon among high-yielding sweet potato cultivars. *Hort. Sci.*, 1993, **28**: 826-827.
44. McLaurin W. J., Somda Z. C., Kays S. J.: Jerusalem artichoke growth, development, and field storage. I. Numerical assessment of plant development and dry matter acquisition and allocation. *J. Plant Nutrition*, 1999, **22**: 1303-1313.
45. McLaughlin S. B., Walsh M. E.: Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy. *Biomass & Bioenergy*, 1998, **14**: 317-324.
46. Monti A., Amaducci M. T., Venturi G.: Growth response, leaf gas exchange and fructans accumulation of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as affected by different water regimes. *Europ. J. Agron.*, 2005, **23**: 136-145.
47. Monti A., di Virgilio N., Venturi G.: Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass & Bioenergy*, 2008, **32**: 216-223.

48. Neukirchen D., Himken M., Lammel J., Czypionka-Krause U., Olf H. W.: Spatial and temporal distribution of root system and root nutrient content of an established *Miscanthus* crop. *Europ. J. Agron.*, 1999, **11**: 301-309.
49. Patton L., Jones M. B.: Some relationships between leaf anatomy and photosynthetic characteristics of willow. *New Phytologist*, 1989, **111**: 657-661.
50. Reumerman P. J., Van der Berg D.: Reduction of fouling slagging and corrosion characteristics of miscanthus. EC contract FAIR 98-3571. 2002.
51. Rogulska M.: Energy crops production in Poland. In: Alternative crops for sustainable agriculture. Workshop, Turku, Finland, Cost 814: Crop development for the cool and wet regions of Europe. European Commission, 1999, **EUR 19227**, 156-162.
52. Roszewski R.: Miskant olbrzymi – *Miscanthus sinensis x giganteus*. W: Nowe rośliny uprawne na cele spożywcze, przemysłowe i jako odnawialne źródła energii. SGGW Warszawa, 1996, 122-135.
53. Salwowska M.: Wzrost i rozwój miskantusa olbrzymiego (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu) powstałych z nasadzenia kłaczy jesiennych i wiosennych. Praca magisterska wykonana w Katedrze Fizjologii Roślin, SGGW Warszawa, 2002.
54. Schwarz H., Liebhard P.: Fertilization effects on production of *Miscanthus sinensis giganteus*. W: Mat. 8 E.C. Konf.: Biomass for energy environment and industry. Wiedeń, Austria, 1994, 412-420.
55. Soja G., Hounold E.: Leaf gas exchange and tuber field in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) cultivars. *Field Crop Res.*, 1991, **26**: 41-252.
56. Stanhill G.: Water use efficiency. *Adv. Agron.*, 1986, **39**: 53-85.
57. Starck Z.: Transport i dystrybucja substancji pokarmowych a wytwarzanie plonu rolniczego. W: Fizjologia plonowania roślin. Red. R. Górecki i S. Grzesiuk. UWM Olsztyn, 2002, 282-312.
58. Stolarski M. J.: Produktywność i pozyskiwanie biomasy wierzby energetycznej. *Czysta Energia*, 2004, **10(36)**: 30-31.
59. Swanton C. J.: Ecological aspects of growth and development of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). Ph.D. thesis, University Western Ontario, London, Ontario, 1986, 181.
60. Tayot X., Chartier M., Varlet-Grancher C., Lamaire G.: Potential above-ground dry matter production of *Miscanthus* in North-center France compared to sweet sorghum. In: Biomass for energy environment and industry. Mat. 8 E.C. Konf. Wiedeń, Austria, 1994, 556-564.
61. Tworkowski J., Szczukowski S., Stolarski M.: Produktywność i wartość energetyczna wierzby. *Czysta Energia*, 2005, **9(49)**: 17-19.
62. Venturi P., Venturi C.: Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass & Bioenergy*, 2003, 235-255.
63. Waryło B.: Wpływ pokroju i masy rizomów na wzrost, rozwój i plonowanie roślin miskanta olbrzymiego (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu). Praca magisterska wykonana w Katedrze Fizjologii Roślin, SGGW, 2003.
64. www.ibiblio.org. *Rosa multiflora*. A plants for a future. Database search results.

Adres do korespondencji:

dr Danuta Choluj
Wydział Rolnictwa i Biologii
SGGW
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa
tel. (+48 22) 59 32 535
e-mail: danuta_choluj@sggw.pl

