

Mariusz Matyka

PRODUKCYJNE I EKONOMICZNE
ASPEKTY UPRAWY ROŚLIN
WIELOLETNICH NA CELE
ENERGETYCZNE

Rozprawa habilitacyjna

MONOGRAFIE
I ROZPRAWY
NAUKOWE

35

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND PLANT CULTIVATION
STATE RESEARCH INSTITUTE

Dyrektor: *prof. dr hab. Wiesław Oleszek*

Redaktor: *prof. dr hab. Janusz Podleśny*

Recenzent: *prof. dr hab. Stefan Szczukowski*

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Katarzyna Mikulska*

ISBN 978-83-7562-127-3

Nakład 150 egz., B-5, zam. 15/E/13
Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB w Puławach
tel. (81) 8863421 w. 301 i 307; fax (81) 8863421 w. 302
e-mail: duw@pulawy.pl; <http://www.iung.pulawy.pl>

Mariusz Matyka

PRODUKCYJNE I EKONOMICZNE ASPEKTY UPRAWY ROŚLIN
WIELOLETNICH NA CELE ENERGETYCZNE

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP.....	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY	8
3. CEL I METODYKA BADAŃ.....	17
3.1. CEL PRACY	17
3.2. METODYKA BADAŃ	17
3.2.1. Warunki prowadzenia doświadczeń	17
3.2.2. Ocena plonowania i cech biometrycznych roślin.....	22
3.2.3. Ocena jakości biomasy.....	23
3.2.4. Ocena efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji biomasy.....	24
4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA	31
4.1. PLONOWANIE BADANYCH GATUNKÓW ROŚLIN.....	31
4.1.1. Plonowanie wierzby w zależności od odmiany/klonu, jakości gleby i częstotliwości zbioru.....	31
4.1.2. Plonowanie miskanta w zależności od klonu i jakości gleby	39
4.1.3. Plonowanie ślazuwca pensylwańskiego w zależności od jakości gleby i obsady roślin	44
4.2. JAKOŚĆ BIOMASY BADANYCH GATUNKÓW ROŚLIN I JEJ PRZYDATNOŚĆ DO CELÓW ENERGETYCZNYCH	47
4.3. EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA PRODUKCJI BIOMASY	54
4.3.1. Możliwości poprawy efektywności ekonomicznej produkcji biomasy	69
4.4. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA PRODUKCJI BIOMASY	74
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	81
6. LITERATURA.....	83
STRESZCZENIE/SUMMARY	91

„Dopóki nie znajdziemy nowych źródeł energii to kraje przemysłowe będą raz po raz przeżywać bardzo ostre, być może nawet gwałtowne – jak w kuracji odwykowej – kryzysy, przy czym już same próby zastosowania nowych form energii będą przyspieszać przeobrażenia społeczne i polityczne.”

Alvin Toffler „Trzecia fala” 1980 r.

1. WSTĘP

Rolnictwo było jedną z pierwszych aktywności gospodarczych człowieka. To właśnie wiedza o uprawie roślin i hodowli zwierząt umożliwiła osiadły tryb życia, co dało podstawę do dalszego rozwoju społecznego, intelektualnego i technicznego cywilizacji ludzkiej. Na przestrzeni dziejów zmieniały się liczne uwarunkowania zewnętrzne funkcjonowania tego sektora gospodarki. Niemniej jednak rolnictwo pełniło nadrzędną funkcję, która polegała na dostarczaniu żywności i pasz. Była to również gałąź gospodarki, która stanowiła główne źródło utrzymania większości populacji. Jednak wraz z rozwojem społeczeństw znaczenie gospodarcze rolnictwa malało. Obecnie w krajach rozwiniętych udział rolnictwa w tworzeniu produktu krajowego brutto (PKB) nie przekracza kilku procent. Pomimo to pozostaje działalnością, która w dalszym ciągu pozwala na funkcjonowanie ludzkości i daje podstawę do rozwoju innych aktywności. Podobnie jak inne gałęzie gospodarki, również rolnictwo podlega ciągłej presji rozwoju gospodarczego, globalizacji i postępującej integracji. Uwarunkowania te zmieniły także sposób postrzegania rolnictwa oraz postawiły przed nim nowe cele i zadania.

Uważa się, że rolnictwo oprócz produkcji żywności i pasz powinno również dostarczać szeroko pojętych dóbr środowiskowych oraz stać się źródłem paliw i energii ze źródeł odnawialnych. Zadanie to określa się często mianem „nowego wyzwania”, przed którym stoi ten sektor. Krótka retrospektywa pozwala jednak stwierdzić, że jeszcze przed 70–80 laty rolnictwo całe swoje potrzeby energetyczne realizowało poprzez źródła odnawialne. Dotyczyło to zarówno energii wody i wiatru wykorzystywanej do napędu młynów, żywej siły pociągowej oraz biomasy, która była podstawowym źródłem energii cieplnej w gospodarstwach rolniczych. Nie ulega natomiast wątpliwości, że skala przedsięwzięcia, które pozwoli pokryć rosnący popyt na biomasę produkowaną na użytkach rolnych jest niewspółmiernie większa. Obecny popyt przerasta dotychczasowe możliwości zapewnienia odpowiednich ilości biomasy w postaci produktów ubocznych rolnictwa, np. słomy. Jest on w głównej mierze uwarunkowany istniejącymi na poziomie Unii Europejskiej regulacjami prawnymi związanymi ze zmianami klimatu i wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii (OZE). W związku z tym podejmowane są próby znalezienia rozwiązań umożliwiających produkcję odpowiedniego wolumenu biomasy na plantacjach zakładanych na użytkach rolnych. W tym celu poszukuje się nowych roślin i rozwiązań agrotechnicznych umożliwiających optymalną z produkcyjnego, ekonomicznego i energetycznego punktu widzenia uprawę roślin na cele energetyczne. Problem ten

rodzi jednak wiele kontrowersji, pytań i wątpliwości dotyczących potencjalnych następstw środowiskowych, wpływu na rynek żywności oraz racjonalności tego typu produkcji rolniczej.

Kwestie związane z produkcją i wykorzystaniem paliw oraz energii odnawialnej w rolnictwie i na obszarach wiejskich są również jednym z obszarów badawczych Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach. Zespół pracowników Instytutu, dostrzegając nowe wyzwanie, przed jakim staje rolnictwo oraz przyszłe dylematy z tym związane, podjął na początku bieżącego wieku prace nad tym zagadnieniem. Jednym z ich elementów było założenie doświadczeń polowych z uprawą wierzby, miskanta i ślázowca pensylwańskiego jako potencjalnego źródła biomasy. Baza ta pozwoliła na przeprowadzenie przedstawionych w monografii badań, za co w tym miejscu autor chce serdecznie podziękować wszystkim osobom zaangażowanym w jej tworzenie.

Pozostaje mieć nadzieję, że przedstawione w pracy metody badawcze i uzyskane wyniki pozwolą na dalsze wzbogacenie i usystematyzowanie wiedzy z zakresu produkcji biomasy na użytkach rolnych.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Rozwój cywilizacji ludzkiej od jej zarania związany jest z zaspokajaniem potrzeb żywnościowych i energetycznych. Czynniki te stanowią podstawową siłę sprawczą zapewniającą utrzymanie poziomu życia i rozwój intelektualny oraz gospodarczy społeczeństw. Jednak począwszy od drugiej połowy XX w. mamy do czynienia ze zjawiskami zakłócającymi rozwój cywilizacyjny, do których w pierwszej kolejności należy zaliczyć wyczerpywanie nieodnawialnych zasobów paliw kopalnych. W konsekwencji powoduje to wzrost ich cen oraz obawy o bezpieczeństwo energetyczne i uzależnienie państw od zewnętrznych dostaw surowców energetycznych (Khanna i in. 2008, Roszkowski 2008, Matyka 2011, Cornelissen i in. 2012). Synonimem wyczerpywania nieodnawialnych zasobów paliw jest koncepcja określana jako „peak oil”, co można tłumaczyć jako „szczytowy punkt wydobywania ropy naftowej”, po którym pozyskanie tego surowca ulegnie zmniejszeniu, co będzie niosło za sobą wymierne skutki gospodarcze. Teoria ta została zaprezentowana przez M. Kinga Huberta w odniesieniu do Stanów Zjednoczonych już w roku 1956. Niemniej jednak dopiero w 2002 r. zostało powołane Towarzystwo Badań nad Problemem Szczytu Wydobywania Ropy Naftowej i Gazu (Association for the Study of Peak Oil and Gas – ASPO). Uważa się, że „peak oil” jest raczej teorią rozwoju niż kryzysu i służy promowaniu racjonalnego wykorzystania paliw kopalnych, zachowaniu zasobów oraz rozwijaniu wykorzystania odnawialnych źródeł energii (Zhao i in. 2009). Jednocześnie znakomita większość analiz wykazuje, że niekorzystne zmiany klimatyczne powodowane są przede wszystkim wzrostem zużycia energii, co skutkuje zwiększoną emisją gazów cieplarnianych (Greenhouse gas – GHG) do atmosfery. Ponad 90% emisji

dwutlenku węgla powodowane jest wytworzeniem lub utylizacją energii z paliw kopalnych (Roszkowski 2008 i 2009). Ważnym czynnikiem przemawiającym na korzyść wykorzystania odnawialnych źródeł energii jest również potrzeba uniezależnienia się od zewnętrznych dostaw jej nośników, wzrost samowystarczalności energetycznej i poprawa bezpieczeństwa energetycznego (Turley 2008). Dotyczy to szczególnie UE, która około 50% swojego zapotrzebowania na energię realizuje poprzez import. Dostępne prognozy wskazują, że uzależnienie od zewnętrznych źródeł energii UE ma wzrosnąć do 70% w perspektywie roku 2030 (Frombo i in. 2009).

Oczekuje się, że biomasa stanie się nowoczesnym i czystym nośnikiem energii możliwym do łatwego wykorzystania w obecnym systemie zaopatrzenia społeczeństw w energię. Produkcja biomasy i jej wykorzystanie ma także na celu ograniczenie emisji do atmosfery gazów cieplarnianych, w szczególności dwutlenku węgla. Całość przedsięwzięć związanych z pozyskiwaniem i wykorzystaniem biomasy ma natomiast służyć rozwojowi społecznemu i ekonomicznemu, szczególnie w ujęciu lokalnym oraz poprawie konkurencji gospodarki europejskiej (Hoogwijk i in. 2009). Zakładanie plantacji trwałych roślin uprawianych na cele energetyczne postrzegane jest także jako jedno z działań służących łagodzeniu niekorzystnych następstw zmian klimatu (Yemshanov i McKenney 2008).

Przypomnieć należy, że biomasa jest najstarszym, znanym człowiekowi od ponad 400 tys. lat, źródłem energii. Jeszcze pod koniec XVIII w. około 90% potrzeb energetycznych ludzkości pokrywało drewno, a 300 lat temu cała używana energia pochodziła ze źródeł odnawialnych (Węgrzyn i Zając 2008, Plieninger i in. 2009).

Przełomowym momentem w podejściu do rosnącego wykorzystania paliw kopalnych i ich niekorzystnego oddziaływania na środowisko były ustalenia Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu z 1997 r. określane jako Protokół z Kioto (Dz.U. Nr 203, poz. 1683 i 1684, 2005). Czynniki te skłoniły również UE do podjęcia działań zmierzających do zwiększenia wykorzystania odnawialnych źródeł energii w ogólnym jej zużyciu (Berggren i in. 2008).

Aktualnie wykorzystanie OZE na poziomie UE sankcjonuje uchwalona w dniu 23 kwietnia 2009 r. przez Parlament Europejski i Radę dyrektywa 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. Dokument ten jest jednym z elementów pakietu klimatyczno-energetycznego, który obliguje państwa członkowskie UE w perspektywie 2020 r. do realizacji następujących celów:

- zmniejszenie o 20% emisji gazów cieplarnianych w stosunku do poziomu z 1990 r.,
- wzrost do 20% udziału energii ze źródeł odnawialnych w całkowitym zużyciu energii,
- wzrost o 20% efektywności wykorzystania energii, m.in. poprzez zmniejszenie jej zużycia.

Osiągnięcie 20% udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto do 2020 r. dotyczy całej UE, a poszczególne kraje członkowskie założyły cele indywidualne. W przypadku Polski cel wynosi 15% i jest realizowa-

ny zgodnie z przyjętym harmonogramem. Ponadto wszystkie państwa członkowskie UE zobowiązano do osiągnięcia 10% udziału energii ze źródeł odnawialnych w strukturze końcowego zużycia energii w transporcie.

W związku z wprowadzonymi regulacjami prawnymi zapotrzebowanie na odnawialne surowce energetyczne wzrasta zarówno w Polsce, Europie, jak i na całym świecie. Jednym z ich znaczących źródeł jest biomasa pozyskiwana z wysoko wydajnych roślin, wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej i ciepła (Nagel 2000, Błaszak i Harasimowicz-Hermann 2008, Hastings i in. 2008, Mola-Yudego i Aronsson 2008, Li i in. 2010, Igliński i in. 2011, Cornelissen i in. 2012). Rozwój uprawy roślin na cele energetyczne staje się niezbędnym działaniem umożliwiającym realizację celów polityki energetycznej UE w zakresie wykorzystania odnawialnych źródeł energii (Gańko i Rosenqvist 2009). Wielu autorów podkreśla jednak, że główną funkcją rolnictwa pozostaje nadal zaspokajanie potrzeb żywnościowych ludzkości (Faber 2009, Jasiulewicz 2010b). Poszukuje się więc roślin oraz rozwiązań agrotechnicznych i technologicznych, które umożliwią wykorzystanie do uprawy na cele energetyczne gruntów marginalnych o niskiej przydatności do produkcji żywności i pasz (Stolarski i in. 2011b).

Z dostępnych danych wynika, że obecnie około 10% energii pierwotnej zużywanej na świecie pochodzi z biomasy (Rakowski 2012). Biomasa stała ma szczególnie duże znaczenie w Polsce, ponieważ w 2010 r. jej udział w strukturze pozyskania energii ze źródeł odnawialnych wynosił 85,6%, zaś w UE-27 był znacznie niższy i wynosił 48,5% (GUS 2012). Jasiulewicz (2010a i 2010b) stwierdził, że potencjał biomasy w Polsce należy do jednych z największych wśród państw UE (tuż za Niemcami i Francją), jednak dotychczasowe jego wykorzystanie jest niewielkie. Największy potencjał spośród źródeł energii odnawialnej w Polsce istnieje w postaci biomasy stałej, ale jest on w znacznym stopniu zróżnicowany regionalnie. Ważnym działaniem jest natomiast optymalizacja jej wykorzystania w układach rozproszonych i systemach kogeneracyjnych. Zdaniem Kusia i Fabera (2009) realizacja przyjętych zobowiązań będzie wymagała, w perspektywie roku 2020, przeznaczenia 500 tys. ha pod plantacje trwałe roślin zbieranych na biopaliwa stałe. Według nowszych prognoz powierzchnia użytków rolnych niezbędnych do przeznaczenia na ten cel może wynosić nawet ponad 1 mln ha (Faber 2012). Jednak warunkiem rozwoju plantacji trwałych roślin energetycznych są ceny biomasy zapewniające jej opłacalność produkcji (Matyka 2008, Faber i in. 2012).

Wyprodukowanie odpowiedniej ilości biomasy na rynek wymaga opracowania i wdrożenia efektywnej technologii jej produkcji i pozyskiwania, z uwzględnieniem wysoko produkcyjnych odmian i gatunków roślin (Styszko i in. 2009). Lista gatunków roślin potencjalnie przydatnych do produkcji biomasy na cele energetyczne jest szeroka i obejmuje:

- drzewa i krzewy szybko rosnące: wierzba krzewiasta, topola, robinia akacjowa, klon jesionolistny;
- byliny trwałe: ślazier pensylwański, różnik przerośnięty, słonecznik bulwiasty, rdestowiec sachaliński;

- trawy wieloletnie: miskant, spartina preriowa, palczatka Gerarda, proso różgowe, mozga trzcinowata, perz wydłużony (Kołodziej i Matyka 2012, Szczukowski i in. 2012).

Wybór gatunku rośliny do uprawy na cele energetyczne, technologii pozyskiwania biomasy oraz ewentualnego jej uszlachetniania będzie zależał od potrzeb rynku (Stolarski i in. 2008c). Największy potencjał rozwojowy i znaczenie gospodarcze mają obecnie plantacje trwale wierzby krzewiastej, miskanta i ślazowca pensylwańskiego (Dubas i Tomczyk 2005, Stolarski i in. 2006, Faber i in. 2007, Kuś i in. 2008, Budzyński i in. 2009, Igliński i in. 2009, Kuś i Faber 2009, Gajewski 2010, Stolarski i in. 2011a, Cao 2012).

Rodzaj wierzba (*Salix* spp.) dzieli się na trzy podrodzaje, z których ważne gospodarczo są *Salix* i *Vetrix*. Rodzaj ten obejmuje ponad 450 gatunków rosnących w klimacie umiarkowanym i chłodnym na północnej półkuli, a kilka z nich występuje również na półkuli południowej. W Polsce rodzaj *Salix* jest reprezentowany przez 28 gatunków i liczne mieszańce, często trudne do określenia. Wierzby należą do roślin szybko rosnących i światłolubnych, zwykle rosną na glebach wilgotnych, chociaż niektóre gatunki występują na glebach suchych i piaszczystych. Większość gatunków to krzewy różnej wysokości, tylko wierzba biała i wierzba krucha z gatunków krajowych przyjmują pokrój drzewiasty (Szczukowski i in. 2012).

Rośliny wierzby reagują bardzo wyraźnie na warunki pogodowe panujące od połowy czerwca do końca sierpnia. Opady i umiarkowanie wysoka temperatura powietrza w tym czasie wpływają korzystnie na plon biomasy, natomiast susza może skutkować zmniejszeniem plonów nawet o 50%. Wierzba do intensywnego wzrostu i rozwoju potrzebuje co najmniej 500–550 mm opadów. Duże znaczenie dla wierzby, oprócz wody z opadów atmosferycznych, ma wilgoć nagromadzona w glebie po zimie oraz odpowiednio wysoki (1–2 m) poziom wody gruntowej (Pudełko i Faber 2010, Szczukowski 2012).

Właściwy wybór gleby i jej żyzność decydują często o sukcesie uprawy wierzby na cele energetyczne. Na glebach żyznych, zasobnych w wodę rośliny wierzby wytwarzają dużą masę nadziemną, liczne pędy, które w ciągu roku dorastają do 4 m wysokości. Natomiast na glebach ubogich w materię organiczną, składniki pokarmowe i przy niedostatku wody wysokość pędów i ich masa są znacznie zredukowane. Na glebach organicznych, w porównaniu z glebami mineralnymi, należy liczyć się z możliwością szybszego wypadania roślin, skrócenia czasu użytkowania plantacji oraz z trudnościami w zmechanizowaniu prac polowych. Plantacje wierzby można zakładać również na terenach okresowo podmokłych lub zalewowych. Gatunek ten charakteryzuje się znaczną tolerancją na tego typu warunki siedliskowe (Fillion i in. 2009, Szczukowski 2012).

Gleba pod połową plantację wierzby energetycznej powinna być przygotowana tak jak pod inne rośliny rolnicze. Szczególnie skutecznie należy ograniczać występowanie chwastów na plantacji wierzby; jest to element często decydujący o powodzeniu uprawy. Odmiany wierzby wykorzystywane do zakładania plantacji powinny charakteryzować się tolerancją roślin na choroby i szkodniki, dobrą mrozoodporno-

ścią, wysoką produktywnością i dobrą jakością biomasy. Ponadto powinny cechować się szybkim odrastaniem pędów po zbiorze roślin (Kuś i Matyka 2010, Szczukowski i in. 2012, Szczukowski 2012).

Wierzbę krzewiastą rozmnaża się wegetatywnie za pomocą zrzewów (sazzonek, sztobrów), tzn. fragmentów pędu, które po posadzeniu do gleby ukorzeniają się i wypuszczają nowe pędy, tworząc rośliny. Długość zrzewów powinna wynosić 20–25 cm, a ich średnica 8–12 mm. Sadzenie zrzewów przeprowadza się najczęściej wczesną wiosną, ale można sadzić je również jesienią, choć ten termin jest uzależniony od lokalnych warunków pogodowych i organizacyjnych. Sadzenie zrzewów wykonuje się przy użyciu sadzarek mechanicznych 2–4-rzędowych lub na mniejszych plantacjach sadi się je ręcznie. Na towarowych plantacjach zrzezy wierzby zaleca się wysadzać pasowo w podwójnych rzędach. Odległość pomiędzy rzędami w pasie powinna wynosić 0,75 m, a pomiędzy pasami 1,5 m. W rzędach zrzezy wysadza się najczęściej co 0,5 m, co daje obsadę około 18 tys. roślin na powierzchni 1 hektara. Stosowane w Polsce i innych krajach zagęszczenie zrzewów na plantacjach produkcyjnych w tym systemie wynosi od 10–20 tys. szt. \cdot ha⁻¹ (Tubby i Armstrong 2002, Kuś i Matyka 2010, Caslin i in. 2011, Szczukowski i in. 2012, Szczukowski 2012). Plantacje większe obszarowo zaleca się zakładać, sadząc kilka odmian. Z doświadczeń przeprowadzonych w północnej Irlandii wynika, że plony suchej biomasy na tego typu plantacjach są nawet o 40% wyższe od osiągniętych na plantacji wierzby, na której wysadzono tylko jedną odmianę (Begley i in. 2009).

W roku zakładania plantacji wierzby, przed wysadzeniem zrzewów, po uwzględnieniu zasobności gleby należy zastosować dawkę startową azotu około 30 kg N \cdot ha⁻¹. Dawki fosforu i potasu powinny wynosić: 20 kg P₂O₅ i 40 kg K₂O \cdot ha⁻¹. Pierwszy rok wegetacji w uprawie wierzby jest traktowany jako faza wstępna. Po zakończeniu tego okresu, od końca listopada do połowy marca, pędy wierzby powinny być wycięte, co stymuluje rozwój silnych i licznych pędów na karpie w drugim roku wegetacji. Od drugiego roku uprawy prowadzi się trzyletni cykl produkcyjny, po czym pędy są zbierane. Z karp w roku następującym po zbiorze w szybkim tempie z pąków śpiących wyrastają pędy i rozpoczyna się kolejną trzyletnią rotację (1 rok wstępny i do 7 rotacji trzyletnich, produkcyjnych).

Drugi rok uprawy wierzby jest praktycznie pierwszym sezonem produkcyjnym. Aktualnie zaleca się stosowanie nawożenia roślin wierzby raz na 3 lata (rotację) w dawkach: N – 90, P₂O₅ – 30, K₂O – 90 kg \cdot ha⁻¹. Wykazano, że przy produkcji 10 ton suchej masy drewna z ha rośliny wierzby krzewiastej pobierają 60 kg N, 8 kg P₂O₅ i 43 kg K₂O. Do nawożenia plantacji wierzby wykorzystać można również osady ściekowe i popiół drzewny, co znacznie obniża jego koszty (Adler i in. 2008, Kuś i Matyka 2010, Szczukowski 2012).

Zbiory roślin wierzby w celu pozyskania biomasy prowadzi się po opadnięciu liści w rotacji 3- lub 4-letniej, przy zastosowaniu kombajnu, który wycina i rozdrabnia pędy w jednej operacji. Końcowy produkt w postaci zrębków może być dostarczany do ostatecznego odbiorcy. Możliwy jest również zbiór całych pędów wierzby,

ich sezonowanie w pryzmach i rozdrabnianie rębakami. Do zbioru pędów wierzby można użyć również pras ścinająco-prasujących. W trakcie jednego przejazdu pędy wierzby są ścinane i prasowane w bele w kształcie walca. Masa takiej beli, przy wilgotności wierzby 44–51%, wynosi 283–623 kg, średnica 0,9–1,5 m, a wysokość około 1,2 m (Lisowski 2010).

W pracach badawczych IUNG już 40 lat temu (Szypuła-Gądor 1968) wskazywano na przydatność biomasy wierzby jako potencjalnego źródła energii cieplnej na bezleśnych obszarach wiejskich.

Miskant jest wieloletnią trawą pochodzącą z ciepłych obszarów południowo-wschodniej Azji. Rodzaj *Miscanthus* spp. obejmuje ponad 20 gatunków o dużej zmienności morfologicznej. Wytwarzają one podziemne kłącza oraz silnie rozbudowany system korzeniowy sięgający nawet do głębokości 2,5 m. Trawy te tworzą duże kępy, a plon użytkowy stanowią źdźbła o wysokości 2–4 m i średnicy do 10 mm. Wypełnione są one gąbczastym rdzeniem. Liczba źdźbeł z rośliny waha się od kilkunastu do nawet dwustu i zależy ona od gatunku, gęstości sadzenia i wieku karpki. W Japonii trawy z rodzaju *Miscanthus* spp. wykorzystywano na paszę dla zwierząt jak również do krycia dachów. W 1930 r. sprowadzono do Europy kilka gatunków miskanta. W latach 80. XX w. w Danii uzyskano miskanta olbrzymiego (*Miscanthus* × *giganteus*) w wyniku skrzyżowania tetraploidalnego miskanta cukrowego (*M. sacchariflorus*) i diploidalnego miskanta chińskiego (*M. sinensis*). Charakteryzuje się on intensywnym wzrostem i dużym potencjałem plonowania (Clifton-Brown i Lewandowski 2000, Clifton-Brown i in. 2001, Podleśny 2005). W ostatnich latach uzyskano również mieszańce innych gatunków miskanta, które uprawia się także na cele energetyczne. Prace hodowlane ukierunkowane są głównie na podniesienie plonowania roślin miskanta. Przy krzyżowaniu międzygatunkowym miskanta hodowcy muszą wybierać rozwiązanie kompromisowe pomiędzy dobrym jego przystosowaniem do warunków środowiskowych (woda, temperatura, światło) lub wysoką wydajnością biomasy (Deuter i Jeżowski 2002).

Miskant jest rośliną ciepłolubną typu C₄. Optymalna temperatura wzrostu roślin wynosi 28–32°C. Przy temperaturze poniżej 6°C jego wegetacja całkowicie ustaje. Pomimo wysokich wymagań termicznych miskanta olbrzymiego również w warunkach klimatu umiarkowanego można uzyskać względnie duże plony biomasy. Czynnikiem zwiększającym ryzyko uprawy miskanta olbrzymiego jest niebezpieczeństwo wymarzenia roślin, szczególnie w pierwszym roku po założeniu plantacji. Miskant olbrzymi charakteryzuje się efektywnym wykorzystaniem wody; jego współczynnik transpiracji jest niski i wynosi 250–340 l·kg⁻¹ s.m. Jednak z uwagi na osiąganą duże plony roczna suma opadów nie powinna być niższa niż 500–600 mm. Ze względu na obfite ulistnienie i dużą biomasę części nadziemnych większość opadów letnich jest zatrzymywana na liściach (intercepcja) miskanta olbrzymiego i nie dociera do gleby (Lewandowski 2006, Kuś i Matyka 2012). Pod uprawę miskanta najbardziej przydatne są gleby średnio zwięzłe i lżejsze, łatwo nagrzewające się (Kuś i Faber 2009).

W roku poprzedzającym założenie plantacji miskanta olbrzymiego ważne jest staranne odchwaszczenie pola oraz wykonanie analiz chemicznych gleby.

Miskant olbrzymi jest nieplodny i dlatego jest rozmnażany wegetatywnie przez sadzonki korzeniowe (rhizomy) lub sadzonki produkowane metodą *in vitro* (kultury tkankowe). Jedynie niektóre klony z gatunku *M. sinensis* wytwarzają nasiona i możliwe jest zakładanie ich plantacji z siewu (Nixon i in. 2001, Atkinson 2009, Kotecki 2010). Zakładanie plantacji miskanta olbrzymiego możliwe jest również z sadzonek korzeniowych (kłączowych) pozyskanych z 3–4-letniej plantacji matecznej (rozmnożeniowej). Sadzonki korzeniowe miskanta olbrzymiego wysadza się w końcu kwietnia lub na początku maja. Wczesny termin ich sadzenia warunkuje lepsze wschody, dzięki korzystnym warunkom wilgotnościowym w glebie. Rośliny miskanta olbrzymiego rozwijają wówczas silne rhizomy, co sprzyja dobremu przezimowaniu. Optymalna głębokość sadzenia rhizomów wynosi 8–12 cm (większa na lżejszych glebach).

Sadzonki produkowane metodą *in vitro* wysadza się do gleby po późnowiosennych przymrozkach, zwykle w drugiej połowie maja. Obsada roślin miskanta olbrzymiego, niezależnie od użytego materiału rozmnożeniowego, powinna wynosić od 12 do 15 tys. roślin·ha⁻¹. Zaleca się, aby rozstawa rzędów wynosiła 0,75–1,0 m, a odległość roślin w rzędzie 0,6–1,0 m (Christian i in. 2005, Caslin i in. 2010, Kuś i Matyka 2010, Szczukowski i in. 2012). W roku założenia plantacji miskanta olbrzymiego należy zastosować około 30 kg N·ha⁻¹ po przyjęciu się sadzonek oraz 20 kg P₂O₅ i 40 kg K₂O·ha⁻¹ przed uprawkami wiosennymi. W następnych latach dawki nawozów zależą głównie od wielkości przewidywanego plonu biomasy. Z plonem 16 t·ha⁻¹ s.m. miskanta zbieranego w okresie grudzień–styczeń wywożono z powierzchni jednego hektara: 75 kg N, 8 kg P₂O₅ i 118 kg K₂O. Na glebach o średniej zasobności zalecane dawki nawozów powinny wynosić: 90–120 kg N, 30 kg P₂O₅ i 100–140 kg K₂O·ha⁻¹ i przy oczekiwanych plonach około 15 t·ha⁻¹ suchej masy (Kotecki 2010, Szczukowski i in. 2012, Kuś i Matyka 2012). W roku założenia plantacji podstawowy problem stanowi ograniczanie zachwaszczenia. Powolny początkowy wzrost oraz mała obsada roślin miskanta olbrzymiego powodują, że jest on mało konkurencyjny w stosunku do chwastów. W następnych latach zagęszczenie roślin miskanta olbrzymiego jest duże i skutecznie konkurują one z chwastami, dlatego nie ma już potrzeby ich zwalczania. W pierwszym roku wskazana jest ochrona roślin miskanta olbrzymiego przed wymarzeniem. Dobrym rozwiązaniem może być ścięcie odrostów miskanta z pierwszego roku przed zimą na wysokości 8–10 cm nad powierzchnią gruntu i pozostawienie ich na powierzchni pola w formie mulczu. Możliwe jest również ściółkowanie plantacji miskanta olbrzymiego słomą zbożową, ale jest to rozwiązanie kosztowne. W następnych latach, gdy rośliny miskanta olbrzymiego rozbudują karpki korzeniowe, niebezpieczeństwo ich wymarzenia jest mniejsze (Kuś i Matyka 2012). Aktualnie na plantacjach tej rośliny nie zaobserwowano większego nasilenia występowania chorób i szkodników. Uprawa miskanta olbrzymiego jest jednak typową monokulturą, zatem należy oczekiwać możliwego

pojawienia się chorób i szkodników w przyszłości (Remlein-Starosta 2007, Nijak 2008). Rośliny miskanta olbrzymiego można zbierać począwszy od późnej jesieni do wiosny. W okresie jesienno-zimowym do zbioru roślin miskanta olbrzymiego stosuje się sieczkarnie polowe (silosokombajny), które podczas jednego przejazdu koszą i rozdrabniają biomasa oraz podają ją na przyczepy (zbiór jednofazowy). Zbiór roślin miskanta olbrzymiego wiosną wykonuje się, gdy wilgotność gleby umożliwia wjazd maszyn rolniczych na pole. Stosuje się wówczas zbiór dwufazowy: w pierwszym przejeździe roboczym rośliny ścina się kosiarką rotacyjną z kondycjonerem w równe pokosy. Po ewentualnym dosuszeniu biomasy na pokosach do około 20% prasowana jest ona prasami wysokiego stopnia zgniotu (Nolan i in. 2009, Lisowski 2010, Kuś i Matyka 2012).

Rodzaj *Sida* spp. wywodzi się z subtropikalnych stref kuli ziemskiej, gdzie występuje w warunkach naturalnych, ale można go także spotkać w rejonach pustynnych i półpustynnych Afryki oraz Australii (Grabiński i in. 2006). Ślázowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita* Rusby) został sprowadzony do Europy w latach 30. XX w. Początkowo w niektórych rejonach Ukrainy prowadzono szeroko zakrojone badania nad jego wykorzystaniem jako rośliny włóknistej, pastewnej i miododajnej. W Polsce w latach 50. XX w. w Akademii Rolniczej w Lublinie podjęto badania nad możliwością jego uprawy na paszę. Ślázowiec pensylwański jest rośliną wieloletnią o silnym systemie korzeniowym, intensywnie rozrastającym się od drugiego roku wegetacji. Ślázowiec pensylwański może być rozmnażany generatywnie i wegetatywnie. Rośliny tego gatunku rozmnażane generatywnie wykształcają palowy system korzeniowy sięgający do 3 m głębokości. Natomiast rozmnażane wegetatywnie tworzą płytki system korzeniowy, rozmieszczony horyzontalnie, sięgający do 2 m głębokości. Liście umiejscowione są na łodydze naprzemiennie. Blaszki liści mają kształt dłoniasto-klapowany (3–7 kłap z nieregularnie ząbkowaną krawędzią) o długości dochodzącej nawet do 36 cm i szerokości sięgającej 28 cm. Liście ślázowca pensylwańskiego cechują się dużą zmiennością w zakresie wielkości, intensywności zabarwienia, głębokości wcięć i omszenia (Styk 1984, Szczukowski i in. 2012). Ślázowiec pensylwański ma zdolność do silnego odrastania z pąków znajdujących się na korzeniach w strefie przyłodygowej. Liczba łodyg odrastających w ten sposób może, po kilku okresach wegetacji, przekroczyć 30–40 sztuk. Łodygi osiągają wysokość 2–4 m i średnicę 5–30 mm, zasychają jesienią po zakończeniu wegetacji. Wymagania klimatyczne i glebowe ślázowca pensylwańskiego nie są duże. Można go uprawiać praktycznie na wszystkich typach gleb, ale na glebach piaszczystych tylko pod warunkiem dobrego ich uwilgotnienia. Na glebach żyznych ślázowiec pensylwański wytwarza większą masę nadziemną niż na ubogich, ale różnice te w pewnym stopniu mogą być niwelowane zwiększeniem obsady roślin na plantacji zlokalizowanej na słabym stanowisku (Grabiński i in. 2006, Kuś i Matyka 2010, Matyka i Kuś 2012, Szczukowski i in. 2012).

Przygotowanie roli pod uprawę ślázowca pensylwańskiego powinno być staranne, gdyż w kolejnych latach możliwa jest już tylko płytka pielęgnacja międzyrzędzi.

Przed założeniem plantacji ważne jest dokładne odchwaszczenie pola oraz wykonanie analiz chemicznych gleby. Najmniej pracochłonną metodą zakładania plantacji ślazuwca pensylwańskiego jest rozmnażanie generatywne z nasion wysiewanych bezpośrednio do gruntu. Metoda ta obciążona jest jednak dużym ryzykiem, ponieważ w niesprzyjających warunkach wschody siewek są bardzo słabe. Możliwa jest również produkcja rozsady ślazuwca pensylwańskiego i następnie jej wysadzanie na pole. Jest to sposób rozmnażania dużo bardziej pracochłonny niż siew nasion bezpośrednio do gruntu, ale obciążony mniejszym ryzykiem. Wegetatywny sposób rozmnażania ślazuwca pensylwańskiego polega na użyciu sadzonek korzeniowych uzyskanych z podziału 3-letnich karp. W roku założenia plantacji potrzeby nawozowe ślazuwca pensylwańskiego są małe. Zaleca się zastosować 20 kg P_2O_5 i 40 kg $K_2O \cdot ha^{-1}$ przed uprawkami wiosennymi oraz 30 kg $N \cdot ha^{-1}$ już po wschodach roślin lub przyjęciu się sadzonek. Zalecane od drugiego roku uprawy dawki NPK na ha wynoszą: 90 kg N, 30 kg P_2O_5 i 80 kg $K_2O \cdot ha^{-1}$. Podstawowy problem stanowi ograniczenie zachwaszczenia w roku założenia plantacji (Borkowska 2006, Kuś i Matyka 2010, Matyka i Kuś 2012, Szczukowski i in. 2012). Duże szkody na plantacjach ślazuwca pensylwańskiego może wyrządzać zgnilizna twardzikowa powodowana przez grzyb *Sclerotinia sclerotiorum* zasiedlający również inne gatunki roślin uprawnych, np. rzepak. Coraz częściej na roślinach ślazuwca pensylwańskiego w dużym nasileniu występują również choroby liści powodowane m.in. przez grzyby: *Colletotrichum*, *Phoma* i *Botrytis* (Remlein-Starosta i Nijak 2007). Biomasa ślazuwca pensylwańskiego przeznaczoną do spalania można zbierać od późnej jesieni poprzez okres bezśnieżnej zimy do przedwiośnia przy pomocy typowych sieczkarni połowych (Lisowski 2010).

Ślazuwiec pensylwański wymaga dalszych prac hodowlanych, których celem powinno być wyselekcjonowanie odmian o jednolitych właściwościach i wysokiej produktywności. Istotne jest również uzyskanie form, których nasiona charakteryzowałyby się wysoką zdolnością kiełkowania (Denisiuk 2005).

Rozwój uprawy roślin na cele energetyczne może się również wiązać z pewnymi zagrożeniami. Wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej do ich uprawy może być jedną z przyczyn zmian relacji podaży-popytu na rynku żywności, co będzie się przekładać na wzrost jej cen (Krasowicz 2008, Roszkowski 2008). Zagrożenia mogą wynikać również z powstawania znacznych powierzchni upraw roślin monokulturowych przeznaczanych na cele energetyczne. W skali świata rozwój tej nowej gałęzi produkcji na użytkach rolnych może skutkować także zwiększeniem „wylesiania” oraz koniecznością wzrostu intensywności produkcji żywności i pasz (Field i in. 2008). Istnieje również ryzyko związane z inwazyjnością wprowadzanych do uprawy nowych gatunków roślin z innych stref geograficznych (Firbank 2008).

Podstawowym warunkiem rozwoju produkcji biomasy stałej na użytkach rolnych jest jej wysoka efektywność produkcyjna, ekonomiczna i energetyczna. Potencjalni producenci będą zakładać plantacje roślin wieloletnich na cele energetyczne, gdy będą one przynosić odpowiednie nadwyżki finansowe. Produkcja ta powinna być

także konkurencyjna w stosunku do roślin rolniczych uprawianych na cele żywnościowe (Khanna i in. 2008). Ważne jest również, aby była ona prowadzona zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Wiąże się to z racjonalnym stosowaniem przemysłowych środków produkcji, a w konsekwencji ograniczeniem niekorzystnego oddziaływania uprawy na środowisko. Istotna jest również maksymalizacja efektywności energetycznej uprawy i pozyskiwania biomasy (Alluvione i in. 2011).

Uprawa roślin na cele energetyczne jest więc dużą szansą, ale również związane z tym są zagrożenia. Z tego powodu istnieje ciągła potrzeba kontynuowania badań, które pozwolą na wypracowanie i wdrożenie strategii umożliwiającej osiągnięcie jak największych efektów produkcyjnych, ekonomicznych i energetycznych.

Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania, w hipotezie badawczej założono, że uprawa wierzby krzewiastej, miskanta olbrzymiego i ślazuwca pensylwańskiego na cele energetyczne może być efektywna pod względem produkcyjnym, ekonomicznym i energetycznym. Założono również, że wartość ocenianych wskaźników będzie różnicowana w zależności od gatunku rośliny i technologii produkcji.

3. CEL I METODYKA BADAŃ

3.1. CEL PRACY

Celem pracy było określenie plonu biomasy wybranych gatunków roślin wieloletnich oraz analiza efektywności ekonomicznej i energetycznej ich produkcji. Porównano również efektywność produkcyjną, ekonomiczną i energetyczną w zależności od gatunku uprawianej rośliny i stosowanej technologii.

3.2. METODYKA BADAŃ

3.2.1. Warunki prowadzenia doświadczeń

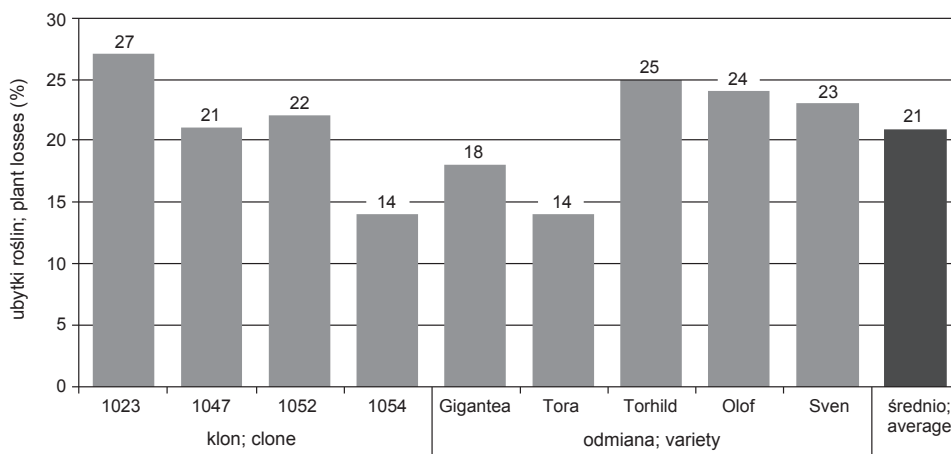
Badania polowe przeprowadzono w latach 2008–2011 na plantacjach doświadczalnych założonych w 2003 i 2004 roku. W związku z tym w momencie rozpoczęcia badań karpy roślin wchodziły w 6–7 rok wegetacji, co warunkowało osiągnięcie pełnego potencjału ich plonowania. Doświadczenia były zlokalizowane w trzech siedliskach:

- na glebie ciężkiej – czarna ziemia o składzie granulometrycznym gliny ciężkiej, kompleks 8 – zbożowo-pastewny mocny, klasa III b, w Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Osinach, w woj. lubelskim (N: 51°28'16,37", E: 22°3'5,11");
- na glebie średniej – gleba płowa wytworzona z piasku gliniastego mocnego przechodzącego na głębokości 40–60 cm w glinę lekką, kompleks 4 – żytni bardzo dobry, klasa IV a, w Zakładzie Doświadczalnym IUNG-PIB w Grabowie, w woj. mazowieckim (N: 51°21'3,36", E: 21°39'45,77");

- na glebie lekkiej – gleba płowa wytworzona z piasków gliniastych lekkich przechodzących na głębokości 70–80 cm w glinę lekką, kompleks 5 – żytні dobry, klasa IV b, w Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Osinach, w woj. lubelskim (N: 51°28'21,34", E: 22°3'7,65").

Badaniami zostały objęte następujące gatunki, odmiany i klony¹ roślin:

Wierzba krzewiasta (*Salix* spp.), w tym 4 klony z hodowli Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie oznaczone numerami: 1023, 1047, 1052, 1054 oraz 4 odmiany szwedzkie: Tora, Torhild, Olof, Sven i 1 odmiana duńska Gigantea. Gęstość nasadzeń wierzby wynosiła 40 tys. roślin·ha⁻¹, a zbiór roślin prowadzono w cyklu jednorocznym i trzyletnim. Określono rzeczywistą obsadę roślin w stosunku do obsady wyjściowej oraz ubytki roślin (rys. 1). Plon suchej masy określono z iloczynu plonu świeżej masy i jej wilgotności.



Rys. 1. Ubytki roślin wierzby krzewiastej w stosunku do obsady wyjściowej według odmian
Losses of willow plants in relation to the initial plant density of varieties

Trawy z rodzaju *Miscanthus*. Sadzonki miskanta wyprodukowane metodą *in vitro* zakupiono w firmie Timplant Biotechnik and Pflanzenvermehrung GmbH (Niemcy) i wysadzono w obsadzie 15 tys. roślin·ha⁻¹. W badaniach uwzględniono siedem klonów na glebie ciężkiej w Osinach i pięć klonów na glebie średniej w Grabowie:

1. *Miscanthus* × *giganteus*,
2. *Miscanthus sinensis* Gofal (M-07),
3. *Miscanthus sinensis* Silver Feather (M-40),
4. *Miscanthus sinensis* (M-105),
5. Mieszaniec *Miscanthus sacchariflorus* Robustus × *M. sinensis* (M-115).

¹ W literaturze dla roślin niebędących zarejestrowanymi odmianami spotyka się również określenia genotyp lub mieszańiec. W celu ujednoczenia słownictwa w niniejszej pracy używane jest określenie klon.

6. *Miscanthus sacchariflorus* Robustus (M-114),

7. Mieszaniec *Miscanthus sacchariflorus* × *M. sinensis* (M-117).

Ślazoiec pensylwański (*Sida hermaphrodita* Rusby). Ukorzenione w doniczkach sadzonki ślazoeca wysadzono w polu w połowie maja 2003 r.; przygotowano je w IUNG-PIB, wykorzystując nasiona pozyskane z plantacji AR w Lublinie. Obsada na glebach kompleksów 4 i 8 wynosiła 10 tys. roślin·ha⁻¹, a w 2004 roku włączono do badań obiekty na glebach kompleksów 5 i 8 z obsadą 20 tys. roślin·ha⁻¹. Doświadczenia założono metodą losowanych bloków, a powierzchnia bloku wynosiła na glebie ciężkiej 700 m², zaś na glebach średniej i lekkiej po 200 m².

Dane meteorologiczne uzyskano ze zlokalizowanych w miejscu prowadzenia doświadczeń stacji meteorologicznych prowadzonych przez Zakład Agrometeorologii i Zastosowań Informatyki IUNG-PIB.

Warunki pogodowe w 2008 r. były znacznie zróżnicowane w zależności od lokalizacji (tab. 1 i 2). W Osinach średnia miesięczna suma opadów w większości okresu wegetacyjnego była zbliżona lub wyższa od średniej z wielolecia. Jedynie w czerwcu wystąpił deficyt opadów, który mógł być częściowo skompensowany większą ich ilością w pozostałych miesiącach. Średnia miesięczna temperatura powietrza, szczególnie w okresie czerwiec–sierpień, była wyższa od średniej z wielolecia. Mniej korzystnie kształtowały się natomiast warunki pogodowe w 2008 r. w Grabowie. Pomimo tego, że roczna suma opadów przewyższała średnią z wielolecia to odnotowano znaczny ich deficyt w czerwcu i sierpniu. Niekorzystne warunki do wzrostu roślin wynikające z mniejszej ilości opadów ulegały nasileniu w wyniku wyższych temperatur powietrza w 2008 r. niż w wieloleciu. Należy przypuszczać, że w tych warunkach zwiększeniu uległo tempo ewapotranspiracji, a przez to pogorszyły się warunki wzrostu i gromadzenia biomasy roślin.

Przebieg pogody w 2009 r. charakteryzował się dużą zmiennością w okresie wegetacji. Okres poprzedzający rozpoczęcie wegetacji (I–III) cechował się większą niż średnia w wieloleciu ilością opadów, co wpływało na uzupełnienie zapasów wody glebowej. Szczególnie niekorzystne warunki do wzrostu roślin wystąpiły w miesiącu kwietniu, gdy odnotowano niewielką ilość opadów, a temperatura powietrza przekraczała o niemal 3°C średnią jej wartość z wielolecia. W maju ilość opadów w Osinach była wyższa od średniej z wielolecia, a w Grabowie pozostawała nadal na niższym poziomie. Korzystniej kształtowały się natomiast w tym okresie warunki pogodowe w dalszej części okresu wegetacyjnego. W miesiącach VI–VIII sumy opadów oraz średnia miesięczna temperatura powietrza znacznie przewyższały średnie z wielolecia. Natomiast we wrześniu w obu obiektach odnotowano ponownie znaczny deficyt opadów. Pomimo tego, że w obydwu lokalizacjach występowały okresy bardzo suche to roczna suma opadów przekraczała średnią z wielolecia.

W 2010 r. warunki pogodowe dla plonowania roślin wieloletnich były zróżnicowane i niekorzystne. Opady w maju w Osinach i Grabowie były prawie dwukrotnie większe od średnich z wielolecia. Deficyt opadów, który wystąpił w czerwcu i lipcu w tych lokalizacjach rośliny kompensowały zapasami wody glebowej uzupełnio-

nymi przez opady w sierpniu i wrześniu. Deficyt opadów w czerwcu i lipcu był dodatkowo wzmacniany wyższą o około 2°C od średniej wieloletniej temperaturą powietrza, co niekorzystnie oddziaływało na wzrost roślin.

Tabela 1

Sumy opadów atmosferycznych (mm)
Sums of atmospheric precipitation (mm)

Rok; Year	Miesiąc; Month								Suma roczna; Annual sum
	I–III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X–XII	
Osiny									
2008	96	43	83	42	94	72	61	97	588
2009	113	2	63	96	69	98	22	161	624
2010	67	22	133	66	54	120	111	82	655
2011	56	27	61	54	250	36	3	57	544
1951–2006	86	41	54	75	81	67	54	117	569
Grabów									
2008	132	72	88	51	85	54	71	138	691
2009	130	1	58	118	118	75	32	218	749
2010	74	21	114	51	53	155	136	95	699
2011	74	36	75	52	299	36	4	63	639
1951–2006	98	48	62	81	85	71	58	124	637

Tabela 2

Średnia dobowa temperatura powietrza
Mean daily air temperature

Rok; Year	Miesiąc; Month								Średnia roczna; Annual mean
	I–III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X–XII	
Osiny									
2008	2,5	9,4	13,5	18,2	18,8	18,6	12,5	5,5	9,6
2009	-0,4	11,0	13,7	16,6	20,1	18,4	14,8	3,7	8,7
2010	-2,3	9,3	14,0	17,7	21,7	20,3	12,3	2,5	8,1
2011	-0,5	10,5	13,8	18,5	18,2	18,6	15,0	4,3	8,8
1951–2006	-1,0	8,1	13,8	17,1	18,7	17,9	13,3	3,6	8,1
Grabów									
2008	2,3	9,0	13,1	17,6	18,9	18,9	12,5	5,3	9,4
2009	-0,7	10,7	13,5	16,4	19,7	18,1	14,9	3,6	8,5
2010	-2,6	9,0	13,9	17,6	21,5	19,9	12,1	2,0	7,7
2011	-0,6	10,3	13,9	18,5	18,4	18,8	14,7	4,1	8,8
1951–2006	-0,8	8,0	13,7	16,6	18,4	17,8	13,0	3,4	8,0

Zróznicowanym przebiegiem pogody charakteryzował się również rok 2011. W miesiącach IV i VI średnia miesięczna suma opadów w Osinach i Grabowie była

niższa od średniej z wielolecia. Natomiast w miesiącu lipcu w obu lokalizacjach wystąpiły intensywne opady, które ponad 3-krotnie przekraczały tę wartość z analogicznego okresu w wieloleciu. Dzięki temu znacznemu zwiększeniu uległy zasoby wód gruntowych, które mogły zostać wykorzystane w kolejnych miesiącach okresu wegetacyjnego, który cechował się deficytem opadów. Roczna suma opadów w 2011 r. w Osinach była niższa, a w Grabowie zbliżona do wartości z wielolecia. Natomiast średnia temperatura powietrza w obu lokalizacjach w poszczególnych miesiącach, poza lipcem, była wyższa od średniej wieloletniej.

Na plantacjach doświadczalnych wykonano zabiegi agrotechniczne. Nawożenie mineralne w 2008 r. zastosowano w dawkach: 80 kg N, 72 kg P₂O₅ i 72 kg K₂O·ha⁻¹. W latach 2009–2011 dawki nawozów mineralnych wynosiły: 80 kg N, 60 kg P₂O₅ i 90 kg K₂O·ha⁻¹. W 2010 roku dodatkowo zastosowano wapno tlenkowe o 60% zawartości Ca, w dawce 800 kg·ha⁻¹.

Na plantacjach przeprowadzono pielęgnację chemiczną i mechaniczną. Do zwalczania chwastów jednoliściennych w łanach wierzby i ślazuca pensylwańskiego wykorzystano Fusilade Forte 150 EC w dawce 1 l·ha⁻¹. W przypadku miskanta zastosowano natomiast selektywne herbicydy zwalczające chwasty dwuliścienne i rumianowate, tj. Starane 250 EC w dawce 1 l·ha⁻¹, Lintur 70 WG w dawce 180 g·ha⁻¹ i Aminopielik D 450 SL w dawce 3 l·ha⁻¹. W 2010 roku, po zbiorze roślin wierzby, wykonano dodatkowo odchwaszczanie mechaniczne międzyrzędzi przy pomocy glebogryzarki sekcyjnej (fot. 1).



Fot. 1. Mechaniczne odchwaszczanie plantacji wierzby (fot. autor)
Mechanical weeding of willow plantation (photo author)

Na plantacji ślazuca zastosowano chemiczną ochronę roślin preparatem Horizon 250 EW w dawce $1 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ przed zgnilizną twardzikową powodowaną przez grzyb *Sclerotinia sclerotiorum*. Natomiast na plantacji wierzby zwalczano krytoryjka olchowca (*Cryptorhynchus lapathi* L.) i niekreślankę wierzbowkę (*Earias chlo-rana* L.) przy użyciu preparatu Mospilan 20 SP w dawce $125 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$. Opryski na plantacji ślazuca pensylwańskiego wykonano w drugiej dekadzie maja, a wierzby w pierwszej dekadzie czerwca. W przypadku wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim zabieg wykonany był jedynie w roku następującym po zbiorze roślin.

Próby materiału roślinnego do badań pobrano każdego roku w okresie od 15 listopada do 28 lutego. Zbiór roślin pozostałych po pobraniu prób był wykonany w okresie od 1 grudnia do 15 marca. Do zbioru roślin ślazuca pensylwańskiego użyto siewkarni zawieszanej do kukurydzy marki KUHN MC 90 S Twin, natomiast wierzbę zebrano przy pomocy ręcznych podkaszarek. Rośliny miskanta były zbierane dwuetapowo; w pierwszym przejeździe były koszone na pokos, a następnie prasowane przy pomocy pras wykorzystywanych do zbioru słomy.

3.2.2. Ocena plonowania i cech biometrycznych roślin

Każdego roku określono plon biomasy i cechy biometryczne roślin. Po zakończeniu wegetacji pobrano próbki po 20 roślin każdej odmiany/klonu wierzby oraz po 10 roślin każdego klonu miskanta i ślazuca pensylwańskiego, w 5 powtórzeniach z każdego poletka. Zbiór był wykonany ręcznie. Po zbiorze roślin określono plon świeżej masy. Pobrano reprezentatywne próbki roślin do oznaczenia suchej masy. Wilgotność biomasy określono metodą suszarkową w temperaturze 80°C przez okres 14 dni. Plon suchej masy określono z iloczynu plonu świeżej masy i jej wilgotności. Plon z powierzchni 1 ha obliczono z iloczynu obsady rzeczywistej i jednostkowej masy roślin.

Wykonano pomiary biometryczne badanych roślin. Zrobiono oznaczenia: liczby pędów z rośliny, średnicy pędów roślin na wysokości 15 cm (mm) i wysokości pędów (m).

Wyniki badań zestawiono w tabelach oraz przedstawiono na rysunkach w sposób dynamiczny, obrazujący zmienność w latach. Analizy statystyczne wykonano z użyciem programu Statistica 10, zgodnie z przyjętymi w literaturze metodami (Zieliński 1999, Kala 2005, Luszniwicz i Słaby 2008).

Przed przystąpieniem do eksploracji i analizy baza danych została sprawdzona i zweryfikowana pod kątem wartości błędnych, nietypowych i ekstremalnych.

W dalszej kolejności przy pomocy testów Shapiro-Wilk i Kołmogorowa-Smirnowa przebadano normalność rozkładu. Niestety zdecydowana większość z badanych cech charakteryzowała się rozkładem odbiegającym od normalnego. W związku z tym podjęto próby transformacji danych w celu przybliżenia rozkładu zmiennych do rozkładu normalnego, stosując następujące przekształcenia: \sqrt{x} , $\log x$ i $\log[x/(1-x)]$, gdzie x – wartość empiryczna.

Jednak podjęte działania nie przyniosły oczekiwanego efektu, ponieważ dla części danych w dalszym ciągu nie udało się uzyskać rozkładu normalnego. Natomiast w przypadku pozostałych cech weryfikacja hipotezy zakładającej jednorodność wariancji przy użyciu testu Browna i Forsythe'a zakończyła się jej odrzuceniem.

W związku z tym do oceny istotności różnic użyto testów nieparametrycznych: ANOVA rang Kruskal-Wallisa dla porównania wielu grup zmiennych niezależnych i U Manna-Whitneya dla porównania dwóch grup zmiennych niezależnych.

W przypadku miskanta i wierzby, ze względu na zróżnicowanie badanych odmian/klonów wykonano analizę skupień metodą *k-średnich*. Obliczenia przeprowadzono, wykorzystując łączną bazę wyników dla gatunku z badanych siedlisk. Wstępne centra skupień ustalono na podstawie losowego wyboru *k* obserwacji przy zastosowaniu standaryzowanej miary odległości (odległość euklidesowa). Do wyznaczenia liczby skupień zastosowano *V*-krotny sprawdzian krzyżowy. W przypadku miskanta sugerowana liczba skupień (4) była zbyt duża w porównaniu do liczby badanych klonów (7), dlatego zdecydowano o podziale zbiorowości na dwa skupienia.

Z wydzielonych skupień wybrano po jednej odmianie/klonie i dla każdego z nich wygenerowano równanie regresji wielorakiej opisujące zależność wielkości plonu suchej masy od cech biometrycznych roślin. Kryterium wyboru odmiany/klonu było jak największe podobieństwo wartości badanych cech do ich średnich wartości w skupieniu. Równanie regresji generowano metodą krokową z krokiem w tył (backward selection).

3.2.3. Ocena jakości biomasy

Materiał roślinny do analiz składu chemicznego biomasy pobrano w latach 2008 i 2009. Określono zawartości składników mineralnych w biomacie w zależności od jakości gleby i gatunku rośliny (w podziale na odmiany/klony). Dodatkowo w przypadku miskanta analizy chemiczne zostały wykonane oddzielnie dla liści i łodyg. Materiał roślinny wierzby przeznaczony do oznaczeń składu chemicznego pobrano w cyklu zbioru corocznego.

W przygotowanym materiale roślinnym oznaczono zawartość: N, P, K, Na, Ca, Mg, Cd, Cu, Pb, Zn oraz węgla całkowitego ($C_{\text{całk.}}$).

Badania laboratoryjne wykonano przy wykorzystaniu następujących metod analitycznych:

- zawartość azotu (N), fosforu (P), potasu (K), sodu (Na), wapnia (Ca) i magnezu (Mg) – mineralizacja prób na drodze mokrej (stężony H_2SO_4 + perhydrol) i następnie oznaczenie:
 - azotu (N) – metoda spektrometrii przepływowej – PB 48.1, wyd. I, 24.06.2002;
 - fosforu (P) – metoda spektrometrii przepływowej – PB 48.1, wyd. I, 24.06.2002;
 - potasu (K) – metoda emisyjnej spektrometrii płomieniowej – PB 49.1, wyd. I, 11.06.2002;

- sodu (Na) – metoda emisyjnej spektrometrii płomieniowej – PB 49.1, wyd. I, 11.06.2002;
- wapnia (Ca) – metoda spektrometrii absorpcji atomowej – PB 49.1, wyd. I, 11.06.2002;
- magnezu (Mg) – metoda spektrometrii absorpcji atomowej – PB 49.1, wyd. I, 11.06.2002;
- zawartość kadmu (Cd), miedzi (Cu), ołowiu (Pb), cynku (Zn) – mineralizacja prób na sucho w piecu muflowym i roztwarzanie kwasem azotowym, a następnie oznaczenie każdego z metali metodą spektrometrii absorpcji atomowej – PB 9.1, wyd. III, 24.06.2002;
- węgiel całkowity ($C_{\text{całk.}}$) – analiza elementarna, wysokotemperaturowe spalanie w tlenie i oznaczenie na detektorze przewodności cieplnej – PB 107.1, wyd. I, 25.02.2009.

Analizy chemiczne materiału roślinnego przeprowadzono w Głównym Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG-PIB w Puławach.

3.2.4. Ocena efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji biomasy

Ocenę efektywności ekonomicznej i energetycznej wykonano na podstawie wyników badań prowadzonych w IUNG-PIB, danych literaturowych i bieżących informacji rynkowych (Muzalewski 2010b). Analizy efektywności ekonomicznej i energetycznej wykonano na poziomie *loco* pole. Kalkulacje sporządzono dla wierzby zbieranej w cyklu co trzy lata oraz dla ślazuwca, miskanta i wierzby zbieranych corocznie. Założenia przyjęte do obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

Ocenę ekonomiczną przeprowadzono w cenach bieżących 2012 roku. Przyjęto, że plony w warunkach produkcyjnych będą o 30% niższe od uzyskiwanych w doświadczeniach prowadzonych na glebie kompleksu 8.

Założono, że grunty, na których zostanie założona plantacja są własnością rolnika i utrzymane są w dobrej kulturze. W efekcie nie ma konieczności ponoszenia dodatkowych kosztów związanych z zakupem gruntu, dzierżawą i przywracaniem ich do użytkowania.

Dyskontową ocenę efektywności ekonomicznej wykonano dla plantacji o hipotetycznych powierzchniach: 25, 50, 100, 200, 400 i 800 ha.

Wartość stopy dyskontowej (realna stopa procentowa) przyjęta do obliczeń równa się 2%, przy założeniu, że wskaźnik inflacji kształtuje się na poziomie 4%, a oprocentowanie kredytów inwestycyjnych wynosi 14%.

Ponadto w ocenie ekonomicznej przeanalizowano trzy warianty realizacji przedsięwzięcia dla każdego z omawianych gatunków (tab. 4).

Tabela 3

Założenia przyjęte do kalkulacji efektywności ekonomicznej i energetycznej
Assumptions used to calculate the economic and energy efficiency

Wyszczególnienie; Specification	Wierzba krzewiasta; Willow		Miskant; Miscanthus	Ślázowiec pensylwański; Virginia mallow
	zbiór co 3 lata; harvest every 3 years	zbiór coroczny; harvest each year		
Obsada (tys. roślin·ha ⁻¹); Density (thous. plants·ha ⁻¹)	20	30	13	20
Plon (t s.m.·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Yield (t DM·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	16,5	12,4	14,8	10,0
Liczba zbiorów; Number of harvests	5	15		
Nawożenie (NPK kg·ha ⁻¹); Fertilization (NPK kg·ha ⁻¹)	75-30-80 (co 3 lata; every 3 years)	75-30-80 (corocznie; each year)		
Okres użytkowania plantacji (lat); Time of plantation utilization (years)	17			
Odchwaszczanie chemiczne; Chemical weed control	tak; yes			
Ochrona chemiczna; Chemical protection	tak; yes		brak; no	tak; yes
Wilgotność w momencie zbioru; Humidity in harvest time (%)	50		25	15
Ciepło spalania (MJ kg·s.m. ⁻¹); Heat of combustion (MJ kg·DM ⁻¹)	18,0		17,5	17,1
Cena sprzedaży biomasy; Sale price of biomass (zł·GJ ⁻¹)	18			

Tabela 4

Warianty prowadzenia plantacji uwzględnione w analizie ekonomicznej
 Variants of plantation keeping considered in the economic analysis

Oznaczenie; Symbol	Wariant technologii; Variant of technology
W ₁ U	wierzba zbierana corocznie, uprawa usługowa w pełni zmechanizowana; willow harvested each year, fully mechanized serviced cultivation
W ₁ Uw	wierzba zbierana corocznie, uprawa usługowa z udziałem prac ręcznych; willow harvested each year, serviced cultivation with handwork
W ₁ M	wierzba zbierana corocznie, uprawa w pełni zmechanizowana, maszyny własne; willow harvested each year, fully mechanized cultivation, own machinery
WU	wierzba zbierana co 3 lata, uprawa usługowa w pełni zmechanizowana; willow harvested every 3 years, fully mechanized serviced cultivation
WUw	wierzba zbierana co 3 lata, uprawa usługowa z udziałem prac ręcznych; willow harvested every 3 years, serviced cultivation with handwork
WM	wierzba zbierana co 3 lata, uprawa w pełni zmechanizowana, maszyny własne; willow harvested every 3 years, fully mechanized cultivation, own machinery
MU	miskant, uprawa usługowa w pełni zmechanizowana; miscanthus, fully mechanized serviced cultivation
MUw	miskant, uprawa usługowa z udziałem prac ręcznych; miscanthus, serviced cultivation with handwork
MM	miskant, uprawa w pełni zmechanizowana, maszyny własne; miscanthus, fully mechanized cultivation, own machinery
SU	ślazowiec, uprawa usługowa w pełni zmechanizowana; virginia mallow, fully mechanized serviced cultivation
SUw	ślazowiec, uprawa usługowa z udziałem prac ręcznych; virginia mallow, serviced cultivation with handwork
SM	ślazowiec, uprawa w pełni zmechanizowana, maszyny własne; virginia mallow, fully mechanized cultivation, own machinery

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Matyka (2012)

Source: Own study based on Matyka (2012)

Dla poprawy czytelności tabel i wykresów w opracowaniu zastosowano skróty odpowiadające analizowanym wariantom technologii:

U – plantacja prowadzona przy maksymalnym usługowym wykorzystaniu maszyn, gdzie koszty pracy związane są jedynie z pracami pomocniczymi. Maszyny wykorzystywane na plantacji cechują się dużą wydajnością i maksymalnie ograniczają udział pracy ręcznej.

Uw – plantacja prowadzona przy większym udziale pracy ręcznej i usługowym korzystaniu z maszyn. Wybrane zabiegi prowadzone są przy zwiększonych nakładach pracy ręcznej, np.: sadzenie roślin, pielnie, zbiór wierzby przy pomocy pilarek spalinyowych i rozdrabnianie biomasy w rębaku. Pozostałe prace wykonywane są w ramach usługowego wykorzystania maszyn.

M – plantacja prowadzona przy wykorzystaniu maszyn własnych, gdzie koszty pracy związane są z obsługą maszyn i pracami pomocniczymi. Maszyny wykorzy-

stywane na plantacji cechują się dużą wydajnością i maksymalnie ograniczają udział pracy ręcznej. Realizacja tego wariantu jest uzasadniona ekonomicznie jedynie w przypadku dużych plantacji, gdzie możliwe jest coroczne wykorzystanie maszyn na powierzchni co najmniej 200 ha.

W kalkulacji wyróżniono części kosztową i przychodową z podziałem w przypadku części kosztowej na następujące etapy: przygotowanie pola, założenie plantacji, bieżąca pielęgnacja i eksploatacja plantacji (w tym zbiór) oraz likwidacja plantacji.

Dodatkowo przeanalizowano strukturę kosztów według głównych nośników: użycie maszyn i narzędzi, zużycie materiałów (nawozy, środki ochrony roślin, sadzonki), praca ludzka i pozostałe koszty, np.: podatek gruntowy, OC, koszty analiz agrochemicznych gleby.

Określono również poziom nakładów finansowych na wytworzenie jednostki energii w biomase ($\text{zł}\cdot\text{GJ}^{-1}$) w zależności od gatunku rośliny i stosowanej technologii produkcji.

W części przychodowej uwzględniono wartość produkcji oraz płatności bezpośrednio przysługujące do uprawy porównywanych gatunków roślin. Wartość produkcji została obliczona zgodnie ze wzorem:

$$W_p = (P \times C_s) \times C$$

gdzie: W_p – wartość produkcji ($\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$),

P – plon suchej masy ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$),

C_s – ciepło spalania ($\text{GJ}\cdot\text{t s.m.}^{-1}$),

C – cena zbytu ($\text{zł}\cdot\text{GJ}^{-1}$).

Efektywność ekonomiczną uprawy badanych roślin oceniono przy pomocy wybranych wskaźników.

Jednym z nich jest wynik finansowy warunkujący zysk lub stratę z produkcji biomasy danego gatunku przy zastosowanej technologii produkcji. Wskaźnik ten pozwala na bezwzględną ocenę efektów ekonomicznych produkcji biomasy w odniesieniu do jednostki powierzchni (ha) i jednostki produktu (t).

Zgodnie ze wzorem przedstawionym poniżej obliczono również wskaźnik opłacalności, który wyraża stopień pokrycia wartością produkcji kosztów poniesionych na jej wytworzenie (Józwiak 1998).

$$O_p = \frac{W_p}{K} \times 100\%$$

gdzie: O_p – opłacalność produkcji (%),

W_p – produkcja końcowa brutto (zł),

K – koszty produkcji ogółem (zł).

Ze względu na niską wartość wskaźnika opłacalności oraz wysokie nakłady na wytworzenie jednostki energii ($\text{zł}\cdot\text{GJ}^{-1}$) z dalszych analiz ekonomicznych wykluczo-

no wariant uprawy wierzby w cyklu zbioru corocznego. Powyższe założenie uzasadniają także dostępne wyniki badań, które wskazują na niższą efektywność ekonomiczną produkcji wierzby zbieranej w cyklu corocznym od prowadzonej w cyklu trzyletnim (Stolarski 2009, Kuś i Matyka 2010).

Biorąc pod uwagę, że założenie plantacji roślin wieloletnich uprawianych na cele energetyczne jest przedsięwzięciem długookresowym, podjęto również próbę oceny jej efektywności przy pomocy dyskontowych (dynamicznych) mierników oceny efektywności inwestycji (Rutkowski 2000, Kowalczyk i Kusak 2006, Felis 2007).

Jednym z nich jest wartość bieżąca netto (NPV – ang. Net Present Value), która jest miarą nadwyżki sumy zdyskontowanych wpływów nad sumą zdyskontowanych wydatków. Wskaźnik umożliwia porównanie nakładów przewidywanych na realizację inwestycji z sumą spodziewanych nadwyżek pieniężnych możliwych do osiągnięcia z projektowanego przedsięwzięcia w kolejnych okresach jego eksploatacji. Przyszła wartość jest sprowadzana do aktualnego poziomu (zdyskontowana) z uwzględnieniem kosztu zaangażowanego kapitału (wymaganej stopy zwrotu). Wartość NPV obliczono przy wykorzystaniu formuły:

$$NPV = -I_0 + \frac{CF_1}{1+r} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n}$$

$$NPV = -I_0 + \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i}$$

gdzie: CF_i – wielkość gotówki w i -tym okresie (przepływ pieniężny i -tego okresu),

r – stopa dyskontowa w okresie (wymagana stopa zwrotu = koszt kapitału dla przedsięwzięcia),

I_0 – początkowe wydatki inwestycyjne (przepływy pieniężne okresu zerowego),

n – okres eksploatacji inwestycji.

Drugim z dyskontowych mierników oceny efektywności inwestycji wykorzystanym w pracy jest wewnętrzna stopa zwrotu (IRR – ang. Internal Rate of Return), przez którą rozumie się krytyczną wartość stopy dyskontowej, dla której wartość bieżąca netto (NPV) jest równa zero. Inaczej mówiąc, wewnętrzną stopą zwrotu jest taka stopa dyskontowa, przy której zaktualizowana wartość wpływów pieniężnych równa się zaktualizowanej wartości wydatków pieniężnych. A zatem IRR jest swoistą graniczną procentową stopą zwrotu z projektowanej inwestycji, przy której projekt nie przyniesie nadwyżek strumieni gotówkowych, ale także nie pochłonie więcej wydatków niż wpływów. Tę krytyczną wartość stopy dyskontowej $r = IRR$ można wyznaczyć, przyrównując do zera formułę na NPV:

$$-I_0 + \frac{CF_1}{1+r} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} = 0$$

Jeśli w miejsce dowolnej stopy dyskontowej (r) wstawi się szukaną wartość IRR, równanie przybierze postać:

$$-I_0 + \frac{CF_1}{1 + IRR} + \frac{CF_2}{(1 + IRR)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1 + IRR)^n} = 0$$

W celu określenia możliwości poprawy efektywności ekonomicznej uprawy roślin na cele energetyczne wykonano analizę następujących scenariuszy zmian obejmujących: wzrost plonów o 20%, wzrost cen biomasy o 20% i zmniejszenie kosztów produkcji o 20%.

Analizę wpływu scenariuszy na zmiany wartości dyskontowych wskaźników efektywności ekonomicznej wykonano dla hipotetycznej plantacji o powierzchni 100 ha.

Analizę efektywności energetycznej przeprowadzono na podstawie metodyk opracowanych w Instytucie Technologiczno-Przyrodniczym w Falentach, Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie i Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowym Instytucie Badawczym w Puławach (Szeptycki i Wójcicki 2003, Bochniarz 2004, Wójcicki 2005, Harasim 2006, Stolarski 2009, Gromadzki 2010, Grzybek 2010).

Efektywność energetyczną obliczono dla roślin uprawianych według technologii w pełni zmechanizowanej z usługowym wykorzystaniem maszyn.

Nakłady energetyczne podzielono zgodnie z głównymi etapami funkcjonowania plantacji, tj.: założenie, bieżąca eksploatacja, likwidacja. W analizie uwzględniono następujące strumienie energii: bezpośrednie nośniki energii (paliwa), surowce i materiały (nawozy mineralne, środki ochrony roślin, sadzonki), środki inwestycyjne (zużycie maszyn i narzędzi, części zamienne) i praca żywa.

Do obliczenia nakładów energetycznych w MJ przyjęto następujące współczynniki:

- nawozy mineralne N 40 MJ·kg⁻¹
- P₂O₅ 14 MJ·kg⁻¹
- K₂O 10 MJ·kg⁻¹
- Ca 6 MJ·kg⁻¹
- środki ochrony roślin (substancja aktywna) 300 MJ·kg⁻¹
- sadzonki 200 MJ·1000 szt.⁻¹
- olej napędowy (1 kg = 1,2 l) 45 MJ·kg⁻¹
- zużycie ciągników i maszyn rolniczych 112 MJ·kg⁻¹
- części zamienne 80 MJ·kg⁻¹
- materiały do napraw 30 MJ·kg⁻¹
- praca żywa 40 MJ·rbh⁻¹

Wartość energetyczną plonu biomasy obliczono według wzoru:

$$P_{\text{epI}} = Q_i^r \times M_p$$

gdzie: P_{epI} – wartość energetyczna plonu ($\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$),
 Q_i^r – ciepło spalania biomasy ($\text{GJ} \cdot \text{t s.m.}^{-1}$),
 M_p – plon suchej masy ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Wskaźnik energochłonności produkcji energii w biomase charakteryzujący nakłady energii na jej wytworzenie w plonie obliczono według wzoru:

$$E_e = \frac{N_{\text{epb}}}{P_{\text{epI}}}$$

gdzie: E_e – wskaźnik energochłonności produkcji biomasy,
 P_{epI} – wartość energetyczna plonu ($\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$),
 N_{epb} – skumulowane nakłady energetyczne poniesione na produkcję biomasy ($\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Zgodnie ze wzorem przedstawionym poniżej obliczono również wskaźnik efektywności energetycznej produkcji biomasy, który wyraża stopień pokrycia energią zawartą w biomase nakładów energetycznych poniesionych na jej wytworzenie.

$$E_{\text{epb}} = \frac{P_{\text{epI}}}{N_{\text{epb}}}$$

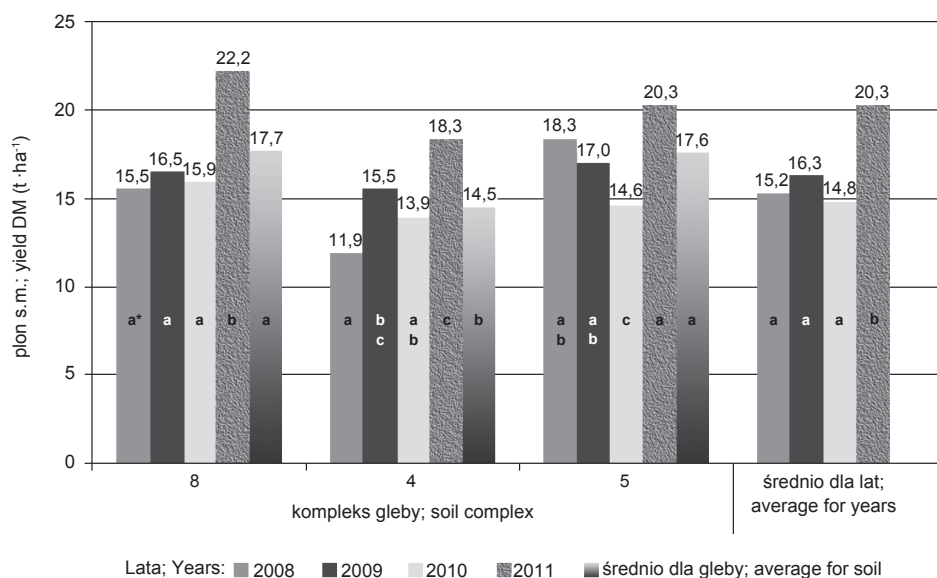
gdzie: E_{epb} – wskaźnik efektywności energetycznej produkcji biomasy,
 P_{epI} – wartość energetyczna plonu ($\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$),
 N_{epb} – skumulowane nakłady energetyczne poniesione na produkcję biomasy ($\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$).

4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

4.1. PLONOWANIE BADANYCH GATUNKÓW ROŚLIN

4.1.1. Plonowanie wierzby w zależności od odmiany/klonu, jakości gleby i częstotliwości zbioru

Plon suchej masy wierzby zbieranej corocznie, niezależnie od odmiany/klonu, średnio w latach 2008–2011 wahał się od 14,5 t·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4 do 17,7 t·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8 (rys. 2, tab. 5).



* Dane oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie przy $\alpha = 0,05$; istotność różnic obliczono oddzielnie w obrębie danego kompleksu przydatności rolniczej oraz dla wartości średnich (dla gleb i lat);

Data marked with the same letter do not differ significantly at $\alpha = 0,05$; the significance of differences was calculated separately for a complex of agricultural suitability and for the mean values (for soil and years).

Rys. 2. Plon suchej masy wierzby zbieranej w cyklu corocznym na różnych glebach (średnio dla wszystkich uprawianych odmian/klonów)

Dry matter yield of willow harvested in each year on different soils (mean for all cultivated varieties/clones)

Plonowanie wierzby w analizowanym okresie kształtowało się na zbliżonym poziomie na glebach ciężkiej (kompleks 8) i lekkiej (kompleks 5), było natomiast istotnie niższe na glebie średniej (kompleks 4). Brak zróżnicowania plonów pomiędzy glebą lekką i ciężką mógł być spowodowany wysokim poziomem wód grunto-

wych (2,0–2,5 m) na glebie lekkiej. Również warunki pogodowe, a szczególnie ilość i rozkład opadów (tab. 1 i 2), w latach prowadzenia badań ograniczały potencjalny wpływ jakości gleby na zróżnicowanie plonowania wierzby. Zmienność plonowania wierzby w latach uzależniona była głównie od warunków atmosferycznych i jakości siedliska. W roku 2008 w efekcie mniejszej ilości opadów w miesiącach VI–VIII oraz wyższej w tym okresie niż średnia wieloletnia temperatury powietrza plony wierzby na glebie kompleksu 4 były istotnie niższe niż w pozostałych latach. Również w roku 2010, charakteryzującym się zmiennymi i okresowo niekorzystnymi warunkami pogodowymi, plony uzyskane na glebie kompleksów 4 i 5 były niższe niż w pozostałych latach. Natomiast na glebie kompleksu 8 w latach 2008–2010 wierzba plonowała na zbliżonym poziomie.

Tabela 5

Plon biomasy i cechy biometryczne roślin wierzby zbieranej corocznie na różnych glebach
(średnia dla lat 2008–2011)
Yield of biomass and biometric features of willow plants harvested each year
in different soils (mean for 2008–2011 years)

Odmiana/klon; Variety/clone	Plon s.m. (t·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Yield DM (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Liczba pędów na roślinie; Number of shoots per plant	Długość pędu; Shoot length (m)	Średnica pędu; Shoot diameter (mm)
kompleks; complex 8**				
1023	13,8 d*	9 cde	2,3 ab	9,9 c
1047	17,4 abe	11 ae	2,1 acd	9,9 c
1052	16,5 bcd	10 ad	2,1 ad	10,1 c
1054	16,2 bd	14 f	2,1 d	8,0 d
Gigantea	21,7 a	11 a	2,2 ad	10,6 ac
Tora	20,6 ab	8 bcd	2,4 b	11,2 ab
Torhild	20,8 ac	9 ac	2,3 bc	12,0 b
Olof	16,0 ad	7 b	2,5 b	12,2 b
Sven	15,9 de	7 bc	2,5 b	12,3 b
Średnia; Mean	17,7	10	2,3	10,7
kompleks; complex 4				
1023	11,0 cd	8 ac	2,1 b	9,1 b
1047	14,0 ac	9 c	2,0 b	9,6 b
1052	11,6 cd	8 ac	2,0 b	9,6 b
1054	13,2 ac	10 c	2,0 b	7,9 c
Gigantea	17,2 ab	8 ac	2,3 a	11,1 a
Tora	21,5 b	6 b	2,6 a	11,9 a
Torhild	13,4 ac	6 ab	2,4 a	11,4 a
Olof	17,5 ab	7 ab	2,5 a	12,0 a
Sven	11,5 ad	5 b	2,4 a	12,4 a
Średnia; Mean	14,5	7	2,3	10,6

cd. tab. 5

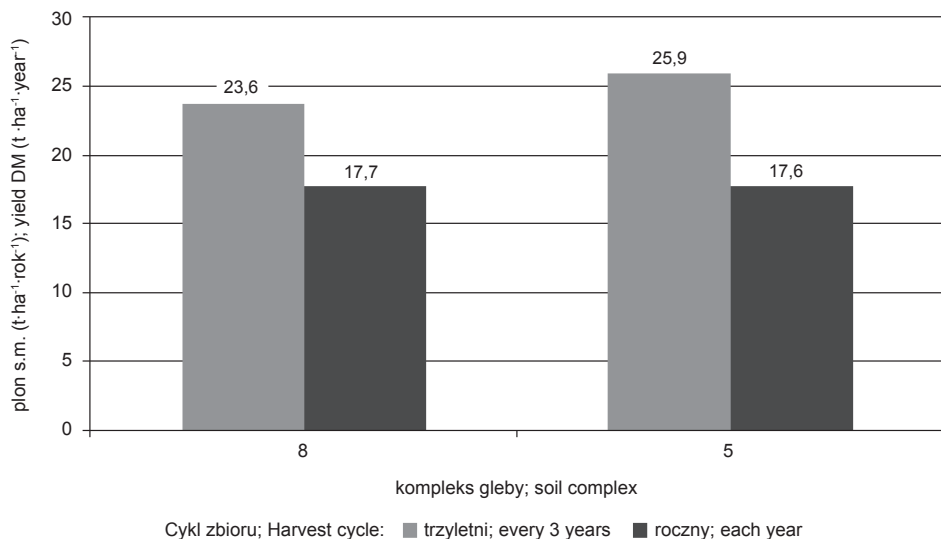
Odmiana/klon; Variety/clone	Plon s.m. (t·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Yield DM (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Liczba pędów na roślinie; Number of shoots per plant	Długość pędu; Shoot length (m)	Średnica pędu; Shoot diameter (mm)
kompleks; complex 5				
1023	20,5 a	16 c	2,1 a	9,1 a
1047	15,6 b	10 a	2,1 a	9,8 a
1052	17,2 ab	10 a	2,2 a	10,2 a
Gigantea	17,8 ab	11 a	2,2 a	9,9 a
Tora	18,3 ab	9 b	2,4 b	11,8 b
Torhild	16,2 b	8 b	2,4 b	11,5 b
Olof	15,3 b	9 b	2,3 b	11,3 b
Sven	19,8 a	8 b	2,5 b	12,0 b
Średnia; Mean	17,6	10	2,3	10,7

* dane oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie przy $\alpha = 0,05$;
data marked with the same letter do not differ significantly at $\alpha = 0,05$

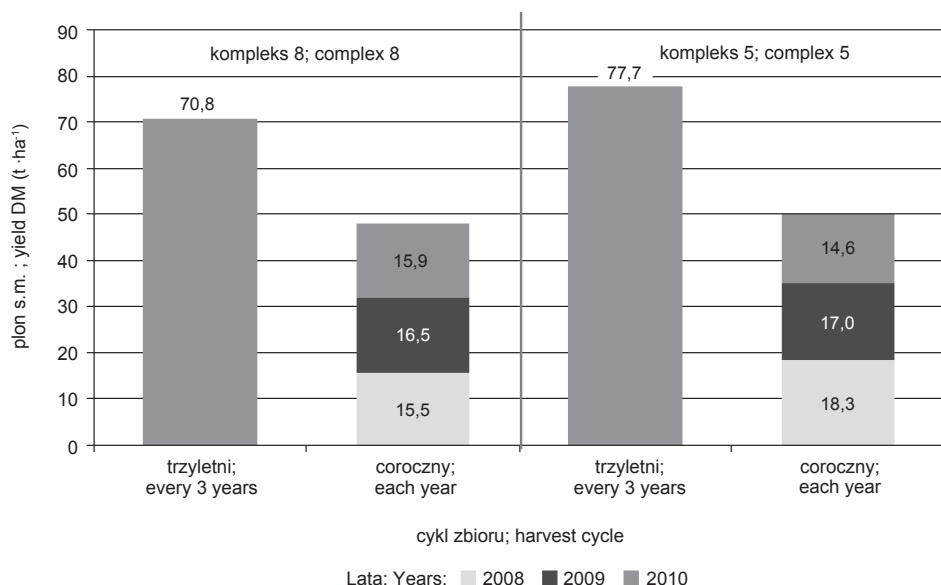
** istotność różnic obliczono oddzielnie w obrębie danego kompleksu przydatności rolniczej;
the significance of differences was calculated separately for a complex of agricultural suitability

Niezależnie od jakości siedliska istotnie najwyższe plony uzyskano w 2011 r. Spowodowane to było głównie znaczną ilością opadów w lipcu, które przekraczały ponad trzykrotnie ich średnią wielkość z analogicznego okresu wielolecia. Zaznaczyć należy, że plony wierzby uprawianej na glebie kompleksu 8 były mniej zmienne w latach niż w pozostałych siedliskach. Pomimo braku różnic w plonach biomasy wierzby (średnia z lat) uprawianej na glebie lekkiej i ciężkiej jakość siedliska determinuje stabilność plonowania i w efekcie ogranicza ryzyko produkcyjne.

Plon suchej masy (t·ha⁻¹·rok⁻¹) wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim był wyższy w porównaniu z cyklem jej zbioru co roku o 47% na glebie lekkiej i 33% na glebie ciężkiej (rys. 3). Sumaryczny plon biomasy wierzby zbieranej corocznie w latach 2008–2010 był znacznie niższy od zebranego w cyklu trzyletnim. Różnica ta wynosiła 22,9 t s.m.·ha⁻¹·3 lata⁻¹ na glebie lekkiej i 27,8 t s.m.·ha⁻¹·3 lata⁻¹ na glebie ciężkiej (rys. 4). W przypadku zbioru w cyklu trzyletnim wierzba plonowała istotnie wyżej na glebie kompleksu 5 niż 8. Wynikać to mogło, podobnie jak w przypadku zbioru corocznego, z korzystnych warunków pogodowych oraz wysokiego poziomu wód gruntowych. Dodatkowo na glebie lekkiej przy wystarczającej ilości opadów korzystniej mogły układać się stosunki wodno-powietrzne i termiczne. Uzyskane wyniki wskazują, że istotnie wyższy plon biomasy wierzby uzyskano w trzyletnim cyklu zbioru niż w przypadku zbioru corocznego.



Rys. 3. Plon średnioroczny suchej masy wierzby w zależności od cyklu zbioru na różnych glebach (średnio dla wszystkich odmian/klonów)
 Average annual dry mass yield of willow depending harvest cycle on different soils (mean for all varieties/clones)



Rys. 4. Sumaryczny plon biomasy wierzby zbieranej corocznie na tle plonu ze zbioru w cyklu trzyletnim (średnio dla wszystkich odmian/klonów)
 Total yield of willow biomass harvested each year on the background of yield from 3 year cycle harvest (mean for all varieties/clones)

Plony biomasy wierzby zbieranej w cyklu jednorocznym na podobnym poziomie ($14\text{--}16\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) jak w doświadczeniu własnym uzyskali również Chołuj i in. (2010). W doświadczeniach zlokalizowanych na glebie kompleksu 2 – pszennego dobrze plony wierzby zbierane w cyklu corocznym wynosiły u produktywnych klonów $13,1\text{--}18,2\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$. Natomiast w cyklu zbioru trzyletnim plony średnioroczne biomasy tych klonów były wyższe o $25\text{--}57\%$ i wynosiły $19,0\text{--}22,8\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ (Szcukowski i in. 2012). Plony biomasy wierzby uzyskiwane w innych krajach europejskich są na zróżnicowanym poziomie. W Szwecji plony biomasy wierzby wahały się w granicach od 8 do $10\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$, w Wielkiej Brytanii pomiędzy $6,4$ a $20\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$, w Danii $7\text{--}8\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$, we Włoszech $15\text{--}20\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$, natomiast w Irlandii w ekstensywnej uprawie wyniosły tylko $5\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Luger 1996, Hinton-Jones i Valentine 2008, El Bassam 2010). W Ameryce Północnej plon biomasy wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim wahał się w zależności od klonu od $5,3$ do $27,8\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Volk i in. 2011). Spośród 30 ocenianych w doświadczeniach klonów 4 osiągały plony biomasy przekraczające $24\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$ i są one rekomendowane do komercyjnego wykorzystania. Znaczne zróżnicowanie plonów biomasy wierzby wskazuje, że nie można ich w prosty sposób przenosić do praktyki. Duże plony biomasy uzyskano na ogół w doświadczeniach polowych charakteryzujących się wysokim poziomem agrotechniki. Należy więc oczekiwać, że podobnie jak w przypadku roślin wykorzystywanych na cele żywnościowe plony biomasy wierzby w warunkach produkcyjnych będą niższe od tych uzyskiwanych w doświadczeniach.

Odmiany/klony wierzby zbierane w cyklu jednorocznym różniły się pomiędzy sobą zarówno poziomem uzyskiwanych plonów biomasy, jak i cechami biometrycznymi (tab. 5). Na glebie kompleksu 8 najwyżej plonowały (średnio z czterech lat) rośliny odmian: Gigantea, Tora, Torhild i klon 1047; na glebie kompleksu 4 odmian: Tora, Olof i Gigantea; na glebie kompleksu 5 klony 1023 i 1052 oraz rośliny odmian: Gigantea, Sven i Tora. Można więc stwierdzić, że odmiany wierzby hodowli szwedzkiej i duńskiej w porównaniu z polskimi klonami na glebie kompleksów 8 i 4 cechowały się wyższym poziomem plonowania. Natomiast na glebie lekkiej (kompleks 5) najwyższy plon biomasy ($20,5\text{ t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}$) uzyskano z polskiego klonu 1023. Szczególnie przydatne do uprawy w cyklu zbioru corocznego są odmiany Gigantea i Tora, które niezależnie od jakości siedliska cechowały się wysokim plonowaniem.

W przypadku cyklu zbioru trzyletniego badane odmiany wierzby różniły się poziomem plonów i cechami biometrycznymi (tab. 6). Na glebie kompleksu 8 wysoko plonowała wierzba odmian: Gigantea, Tora i Torhild oraz klony 1052 i 1047. Natomiast na glebie kompleksu 5 najwyższe plony biomasy uzyskano z polskich klonów 1023 i 1047 oraz odmian Tora i Olof. Najwyższe plony suchej masy w cyklu trzyletnim zbioru, niezależnie od jakości gleby, uzyskano z klonu 1047 i odmiany Tora.

Badane odmiany wierzby cechowały się zwiększeniem poziomu plonowania ($\text{t s.m.}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$) wraz z wydłużeniem cyklu zbioru z jednorocznego do trzyletniego. Dynamika tego procesu była jednak zróżnicowana i wahała się od 122% u odmiany wierzby Gigantea uprawianej na glebie kompleksu 8 do 187% u odmiany wierzby

Olof uprawianej na glebie kompleksu 5 (tab. 6). Wydłużenie cyklu zbioru na glebie ciężkiej (kompleks 8) skutkowało najwyższym relatywnym przyrostem plonu biomasy u klonów: 1023, 1047 i 1052, natomiast na glebie lekkiej u klonów 1023 i 1047 oraz odmian Tora i Olof. Większość odmian reagowała wyższym przyrostem plonu biomasy wraz z wydłużeniem cyklu zbioru na glebie lekkiej niż ciężkiej. Tłumaczyć to należy większymi możliwościami wykorzystania wiosennych zasobów wody glebowej i w efekcie większą dynamiką przyrostu biomasy w drugim i trzecim roku następującym po zbiorze roślin wierzby. W przypadku wierzby zbieranej corocznie rośliny wiosną rozpoczynają proces regeneracji karp i tworzenia pędów oraz w okresie tym wolno przyrastają. Jest to szczególnie istotne w latach charakteryzujących się deficytem opadów w okresie wegetacyjnym.

Podsumowując, można stwierdzić, że spośród wszystkich badanych odmian największą przydatnością do uprawy, niezależnie od cyklu zbioru i jakości stanowiska, cechowała się odmiana wierzby Tora. Biorąc jednak pod uwagę znaczną zmienność plonów uzyskaną w badaniach, można stwierdzić, że plantacje komercyjne w celu ograniczenia ryzyka produkcyjnego powinny być zakładane z kilku odmian/klonów. Efektywna pod względem produkcyjnym uprawa wierzby powinna być prowadzona z rekomendacją szwedzkich odmian Tora i Olof oraz polskich klonów 1023 i 1047 w trzyletnim cyklu zbioru.

Ocena cech biometrycznych roślin wierzby wykazała, że pozyskiwane w cyklu jednorocznym odmiany szwedzkie cechowały się mniejszą liczbą pędów na roślinie niż klony polskie (tab. 5). Pędy tych odmian były natomiast dłuższe i miały większą średnicę. Niezależnie od jakości stanowiska klony hodowli polskiej wykształcały od 8 do 16 pędów na roślinie, o długości 2,0–2,3 m i średnicy 7,9–10,2 mm. Natomiast odmiany zagraniczne wierzby wykształcały od 5 do 11 pędów na roślinie, o długości 2,2–2,6 m i średnicy 9,9–12,4 mm. Wartości średnie ocenianych cech biometrycznych były podobne na glebach kompleksów 8 i 5. Jedynie na glebie średniej (kompleks 4) rośliny wierzby miały mniejszą liczbę pędów z karp. Wykazano, że kilka odmian/klonów przejawiało tendencje do zwiększania liczby pędów oraz zmniejszania ich średnicy na glebie lekkiej w stosunku do wartości tych cech na glebie ciężkiej (tab. 5). Cechy biometryczne odmian wierzby, podobnie jak miało to miejsce w przypadku plonów biomasy, ulegają zmniejszeniu wraz z wydłużeniem cyklu zbioru roślin z jednorocznego do trzyletniego. Pomimo to zależności pomiędzy odmianami hodowli krajowej i zagranicznej stwierdzone w zakresie cech biometrycznych u roślin pozyskiwanych co roku znajdują także odzwierciedlenie u wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim; zaobserwowano tendencję do zwiększania liczby pędów oraz zmniejszania ich średnicy na glebie lekkiej w stosunku do gleby ciężkiej. Jedyny wyjątek stanowiły rośliny odmiany Tora, które zarówno w jednorocznym, jak i trzyletnim cyklu zbioru na glebie lekkiej wykształciły mniej pędów, ale o większej długości i średnicy niż na glebie ciężkiej (tab. 6).

Tabela 6

Plon biomasy i cechy biometryczne roślin wierzby zbieranej w cyklu co 3 lata (2010)
Yield of biomass and biometric features of willow plants harvested
every 3 years (2010)

Odmiana/klon; Variety/clone	Plon s.m. (t·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Yield DM (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Liczba pędów na roślinie; Number of shoots per plant	Długość pędu; Shoot length (m)	Średnica pędu; Shoot diameter (mm)	Plon względny w stosunku do zbioru corocznego; Relative yield in comparison of harvest in each year (%)
kompleks; complex 8**					
1023	21,2 ad*	9 b	3,4 b	14,9 abeh	154
1047	25,2 bcd	7 bcd	3,8 a	17,8 bceh	145
1052	25,9 bcd	5 ac	4,3 a	20,4 ad	157
1054	20,2 a	9 b	3,4 a	14,3 ab	125
Gigantea	26,5 b	5 ad	4,1 a	20,4 ad	122
Tora	27,1 b	7 bc	3,8 a	18,5 cg	132
Torhild	26,7 b	4 ad	5,0 a	25,3 bfg	128
Olof	21,2 ac	5 ac	4,4 a	22,5 abe	133
Sven	19,7 a	4 a	4,8 a	25,2 fgh	124
Średnia; Mean	23,6	6	4,1	19,9	134
kompleks; complex 5					
1023	30,2 a	8 a	4,1 ab	20,2 ab	147
1047	29,2 a	7 ab	4,1 ab	20,4 ab	187
1052	22,0 b	7 ab	3,9 ab	19,4 ac	128
Gigantea	22,5 b	8 ab	3,6 a	17,4 a	126
Tora	28,3 a	6 ab	4,3 b	23,4 bc	155
Torhild	22,4 b	6 ab	3,9 ab	21,7 bc	138
Olof	28,6 a	7 ab	4,4 b	24,9 b	187
Sven	26,0 ab	5 b	4,0 ab	23,8 b	131
Średnia; Mean	25,9	7	4,0	21,3	147

* dane oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie przy $\alpha = 0,05$;
data marked with the same letter do not differ significantly at $\alpha = 0,05$

** istotność różnic obliczono oddzielnie w obrębie danego kompleksu przydatności rolniczej;
the significance of differences was calculated separately for a complex of agricultural suitability

Analiza skupień potwierdziła, że badane odmiany wierzby różnicują się pod względem poziomu uzyskiwanych plonów biomasy i cech biometrycznych na klonach hodowli polskiej i odmiany zagraniczne. Dotyczy to głównie oceny zbioru roślin wierzby w cyklu jednorocznym. W trzyletnim cyklu zbioru mimo wydzielenia dwóch skupień plon biomasy był niemal identyczny (tab. 7). Duńska odmiana wierzby Gigantea w warunkach zbioru corocznego znajduje się w skupieniu z odmianami szwedzkimi, a w cyklu zbioru roślin co 3 lata z klonami polskimi (tab. 7).

Tabela 7

Plon biomasy i cechy biometryczne roślin wierzby w wydzielonych skupieniach
Yield of biomass and biometric features of willow plants in separated clusters

Skupienie; Cluster	Odmiana/klon; Variety/clone	Plon s.m. (t·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Yield DM (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Liczba pędów na roślinie; Number of shoots per plant	Długość pędu; Shoot length (m)	Średnica pędu; Shoot diameter (mm)
zbiór coroczny; harvest each year					
1	Gigantea, Tora, Torhild, Olof, Sven	17,9	8	2,4	11,6
2	1023, 1047, 1052, 1054	15,1	11	2,1	9,3
zbiór co trzy lata; harvest every 3 years					
1	Tora, Torhild, Olof, Sven	24,9	6	4,3	23,2
2	1023, 1047, 1052, 1054, Gigantea	24,2	8	3,8	17,9

Z badań Stolarskiego (2009) wynika, że odmiany/kłony wierzby wykazywały znaczne zróżnicowanie pod względem poziomu uzyskiwanych plonów i cech biometrycznych. Liczba pędów wierzby zmniejszała się na roślinie wraz z wydłużaniem cyklu produkcyjnego z jednorocznego do trzyletniego, co znalazło potwierdzenie w badaniach własnych.

Badania przeprowadzone w Walii, gdzie porównywano 19 odmian wierzby, wykazały znaczne zróżnicowanie plonu biomasy i cech biometrycznych. Wierzba odmiany Tordis plonowała najwyżej, a odmian Tora i Inger plonowały podobnie – znacznie wyżej od średniej wartości dla badanej zbiorowości (Hinton-Jones i Valentine 2008).

Analiza regresji wielorakiej wykazała, że plon suchej masy wierzby odmiany Gigantea i klonu 1052 ze skupień 1 i 2 w warunkach cyklu zbioru corocznego uzależniony był od wszystkich analizowanych cech biometrycznych (tab. 8). Wysoka wartość wskaźnika R^2 pozwala stwierdzić, że przedstawione równanie dość dobrze opisuje omawianą zależność. W przypadku zbioru roślin wierzby co 3 lata plon biomasy klonu 1052 ze skupienia 2 warunkowany był głównie liczbą i średnicą pędów, a mniejsze znaczenie miała ich długość. Natomiast plon odmiany Torhild ze skupienia 1 uzależniony był od wszystkich analizowanych cech biometrycznych.

Stolarski (2009) wykazał, że plon suchej masy wierzby był istotnie dodatnio skorelowany głównie z wysokością roślin i średnicą pędów, a ujemnie z ich liczbą na karpie. Natomiast Borek (2008) szacował plony suchej masy wierzby na podstawie modeli z równaniami regresji jednokrotnej. Opisywały one zależność liniową pomiędzy plonem suchej masy wierzby a wysokością roślin i średnicą pędów.

Przeprowadzone symulacje i weryfikacja modeli wykazały, że większą przydatnością do szacowania wielkości plonu biomasy wierzby cechuje się równanie regresji uwzględniające wysokość roślin. Natomiast model wykorzystujący średnicę pędów wyjaśnił zaledwie 18,5% zmienności plonu i charakteryzował się dużym błędem szacunkowym, co czyniło go nieprzydatnym do użycia.

Tabela 8

Równania regresji opisujące zależność plonu suchej masy wybranych odmian/klonów wierzby od badanych cech biometrycznych

Equation of regression describing the dependence of dry matter yield of selected varieties/clones of willow from examined biometric characteristics

Odmiana/klon; Variety/clone	Równanie; Equation	R ²
zbiór coroczny; harvest each year		
1052	$y = -30,05 + 1,51x_1 + 5,44x_2 + 1,95x_3$	0,78
Gigantea	$y = -36,56 + 1,85x_1 + 3,89x_2 + 2,69x_3$	0,80
zbiór co trzy lata; harvest every 3 years		
1052	$y = -33,67 + 2,64x_1 + 2,10x_3$	0,59
Torhild	$y = -33,05 + 2,85x_1 + 4,51x_2 + 0,96x_3$	0,48

gdzie; where: y – plon (t s.m.·ha⁻¹); yield (t DM·ha⁻¹),

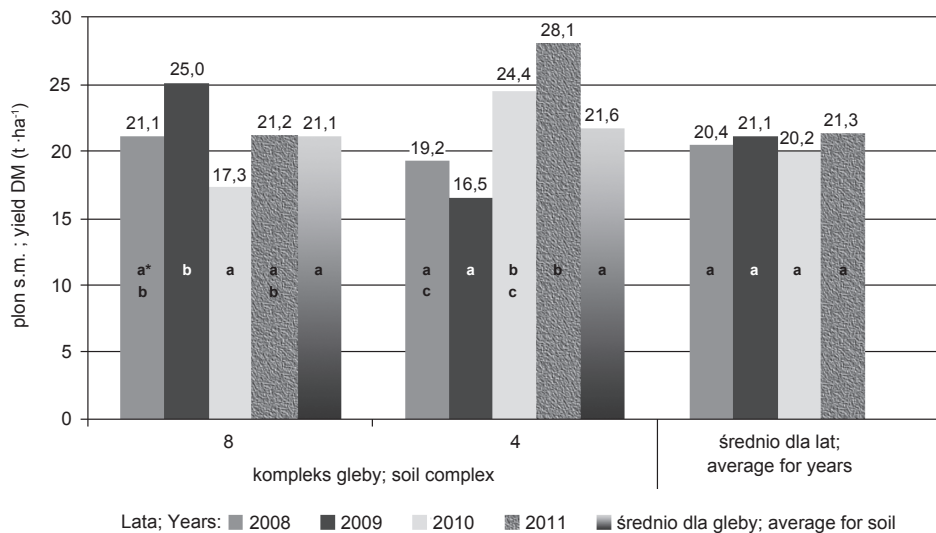
x_1 – liczba pędów na roślinie (szt.·roślinę⁻¹); numer of shoots per plant (pcs·plant⁻¹),

x_2 – długość pędu; shoot length (m),

x_3 – średnica pędu; shoot diameter (mm).

4.1.2. Plonowanie miskanta w zależności od klonu i jakości gleby

Plony suchej masy miskanta, niezależnie od klonu, średnio w latach 2008–2011 wynosiły 21,6 t·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4 i 21,1 t·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8. Różnice w plonach pomiędzy omawianymi kompleksami nie zostały potwierdzone statystycznie (rys. 5). Plony suchej masy badanych klonów miskanta w ramach danego siedliska były zróżnicowane w latach. Na glebie kompleksu 8 najwyższy plon uzyskano w 2009 r., który charakteryzował się naprzemiennym występowaniem intensywnych opadów i okresów suchych. Jednak w przypadku gleby kompleksu 4, gdzie amplituda tych zdarzeń była większa, a roczna suma opadów znacznie przekraczała średnią z wielolecia rośliny plonowały istotnie niżej. Na tej podstawie można stwierdzić, że badane klony miskanta (roślina C₄) dobrze znosiły okresowe niedobory wody. Należy liczyć się z tym, że plon biomasy może ulec zmniejszeniu w wyniku występowania długich okresów nadmiernego uwilgotnienia. Tezę tę potwierdza również analiza plonowania klonów miskanta w 2010 r. na glebie kompleksu 8. Uzyskano wtedy najniższy plon suchej masy, mimo że roczna suma opadów przekraczała średnią z wielolecia o 86 mm.



* Dane oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie przy $\alpha = 0,05$; istotność różnic obliczono oddzielnie w obrębie danego kompleksu przydatności rolniczej oraz dla wartości średnich (dla gleb i lat);
Data marked with the same letter do not differ significantly at $\alpha = 0,05$; the significance of differences was calculated separately for a complex of agricultural suitability and for the mean values (for soil and years)

Rys. 5. Plon suchej masy miskanta na różnych glebach (średnio dla wszystkich uprawianych klonów)
Dry matter yield of miscanthus on different soils (mean for all cultivated clones)

Najwyższy plon suchej masy miskanta na glebie kompleksu 4 uzyskano w 2011 r., który charakteryzował się wyższą temperaturą i umiarkowanymi opadami w okresie wiosennym. W lipcu wystąpiły bardzo intensywne opady (tab. 1 i 2), które łagodziły ich deficyt w następnych miesiącach. Taki przebieg warunków pogodowych sprzyjał gromadzeniu biomasy przez rośliny miskanta. Plony suchej masy miskanta nie różniły się istotnie średnio dla lat, niezależnie od lokalizacji. W trakcie obserwacji fenologicznych stwierdzono, że rośliny miskanta na glebie lżejszej wcześniej rozpoczynały wegetację w okresie wiosennym, co może wynikać z szybszego ogrzewania podłoża. W wyniku tego oraz przy korzystnych warunkach termicznych i odpowiedniej ilości opadów w dalszej części okresu wegetacyjnego plony suchej masy miskanta w tym siedlisku były wyższe niż na glebie ciężkiej.

W doświadczeniach prowadzonych przez Chołuj i in. (2010) plony suchej masy miskanta olbrzymiego były niższe i wahały się w latach 2007–2009 od około 10 do 14 t·ha⁻¹. Natomiast Kotecki (2010) w doświadczeniu założonym na glebie lekkiej (mada rzeczna bardzo lekka na piasku luźnym i żwirze piaszczystym) należącej do klasy bonitacyjnej V uzyskał w latach 2007–2009 plony suchej masy miskanta olbrzymiego w granicach 23,4–29,9 t·ha⁻¹. Według symulacji przeprowadzonych dla Europy Wschodniej plony suchej masy miskanta możliwe do uzyskania na gle-

bach bardzo dobrych mogą wahać się w granicach 17,7–21,8 t·ha⁻¹ (Fischer i in. 2005). Natomiast na glebach dobrych plony suchej masy mogą wynosić od 12,9 do 17,1 t·ha⁻¹. Zróżnicowany potencjał produkcyjny miskanta olbrzymiego potwierdzają również wyniki doświadczeń prowadzonych w Danii (5–15 t s.m.·ha⁻¹), Niemczech (4,0–33,5 t s.m.·ha⁻¹), Wielkiej Brytanii (10–15 t s.m.·ha⁻¹), Szwajcarii (13–19 t s.m.·ha⁻¹), Austrii (22 t s.m.·ha⁻¹) i Hiszpanii (14–34 t s.m.·ha⁻¹). Najwyższe plony miskanta olbrzymiego osiągnęto na plantacjach nawadnianych; wynosiły one 30–32 t s.m.·ha⁻¹ we Włoszech, 44 t s.m.·ha⁻¹ w Grecji, 28 t s.m.·ha⁻¹ w Turcji oraz 49 t s.m.·ha⁻¹ we Francji (Lewandowski i in. 2000, Kahle i in. 2001, Aravindhakshan i in. 2010, Szczukowski i in. 2012). W Stanach Zjednoczonych plony miskanta olbrzymiego wahały się w granicach 9,3–16,0 t s.m.·ha⁻¹ (Zub i Brancourt-Hulmel 2009). Badania przeprowadzone w Niemczech wykazały, że miskant olbrzymi niżej plonuje na glebach ciężkich (Kahle i in. 2001). W cytowanym doświadczeniu najwyższe plony uzyskano na czarnoziemiu i glebie płowej. Najniższe plony suchej masy zebrano w większości lat badań na rędzinie właściwej, która zawierała w swym składzie najwięcej gliny i ilu, a najmniej piasku.

W doświadczeniu własnym porównywane klony miskanta na glebie kompleksu 8 różniły się pomiędzy sobą zarówno poziomem uzyskiwanych plonów biomasy, jak i cechami biometrycznymi (tab. 9). W tych warunkach glebowych najwyżżej plonowały klony *Miscanthus* × *giganteus* i M-115 (*M. sacchariflorus* Robustus × *M. sinensis*), a najniższe plony wydały klony M-114 (*M. sacchariflorus* Robustus) i M-105 (*M. sinensis*). Najmniejszą liczbą pędów na roślinie i zarazem względnie małym udziałem liści w plonie suchej masy oraz największą średnicą i długością pędów cechowały się klony *Miscanthus* × *giganteus* i M-117 (*M. sacchariflorus* × *M. sinensis*). Natomiast klony, które wyselekcjonowane zostały bezpośrednio z gatunku *M. sinensis* (M-07, M-40, M-105) charakteryzowały się około dwukrotnie większą liczbą pędów z rośliny, wyższym udziałem liści w plonie suchej masy oraz mniejszą średnicą i wysokością pędów (tab. 9).

Na glebie kompleksu 4 nie stwierdzono istotnych różnic w plonach suchej masy pomiędzy porównywanymi klonami. Natomiast podobnie jak na glebie kompleksu 8 różniły się one charakterystykami biometrycznymi. *Miscanthus* × *giganteus* wykształcił najmniej pędów na roślinie, ale o większej średnicy i wysokości, a zarazem cechował się najmniejszym udziałem liści w plonie suchej masy. Występowała również tendencja różnicowania pokroju roślin w zależności od jakości gleby. Większość z ocenianych klonów na glebie ciężkiej wytwarzyła więcej pędów na roślinie, miały one jednak mniejszą średnicę i wysokość. Większy był również w tym siedlisku udział liści w plonie suchej masy (tab. 9). Uzyskane wyniki dotyczące zróżnicowania cech biometrycznych znajdują również potwierdzenie w innych pracach (Borzęcka-Walker 2008).

Tabela 9

Plon biomasy i cechy biometryczne roślin miskanta (średnia dla lat 2008–2011)
Yield of biomass and biometric features of miscanthus plants (mean for years 2008–2011)

Klon; Clone	Plon s.m. (t·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Yield DM (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Liczba pędów na roślinie; Number of shoots per plant	Długość pędu; Shoot length (m)	Średnica pędu; Shoot diameter (mm)	Udział liści w plonie suchej masy; Share of leaves in DM yield (%)
kompleks; complex 8**					
Giganteus	24,9 a *	56 a	2,5 a	7,9 a	24 a
M-105	17,8 bc	88 ab	1,8 b	5,1 bc	46 b
M-115	23,7 a	97 b	2,2 ac	5,3 bd	34 c
M-40	21,0 abc	107 b	2,0 bc	4,7 c	44 bc
M-7	21,8 ab	118 b	1,9 b	4,9 bc	47 b
M-117	21,3 abc	59 a	2,3 ac	7,4 ad	35 ac
M-114	16,2 c	82 ab	2,1 ab	5,0 bc	38 bc
Średnia; Mean	21,1	87	2,1	5,7	38
kompleks; complex 4					
Giganteus	19,1 a	26 a	2,8 a	9,5 a	22 a
M-105	22,6 a	79 b	2,3 ab	6,0 b	39 b
M-115	22,6 a	74 b	2,2 b	5,7 b	38 b
M-40	21,5 a	83 b	2,3 b	5,5 b	38 b
M-7	21,7 a	85 b	2,2 b	5,8 b	40 b
Średnia; Mean	21,6	71	2,3	6,4	33

* dane oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie przy $\alpha = 0,05$;
data marked with the same letter do not differ significantly at $\alpha = 0,05$

** istotność różnic obliczono oddzielnie w obrębie danego kompleksu przydatności rolniczej;
the significance of differences was calculated separately for a complex of agricultural suitability

Analiza skupień potwierdziła, że *Miscanthus* × *giganteus* i M-117 (*M. sacchariflorus* × *M. sinensis*) różniły się od pozostałych badanych klonów (tab. 10). Cechowały się wyższym plonem suchej masy, mniejszą liczbą pędów z karpą, ale o większej średnicy i długości. Ważną cechą klonów w skupieniu 1 był niższy udział liści w plonie, co w efekcie warunkuje mniejsze straty plonu powodowane ich opadaniem. Dotyczy to szczególnie praktykowanego w warunkach produkcyjnych zbioru roślin miskanta w okresie zimowym i wiosennym. Opóźnienie terminu zbioru z jesiennego do zimowego skutkuje zmniejszeniem plonu o około 10%, a do wiosennego o około 18–25% (Lewandowski i in. 2003, Kotecki 2010, Kuś i Matyka 2010).

Tabela 10

Plon biomasy i cechy biometryczne roślin miskanta w wydzielonych skupieniach
Yield of biomass and biometric features of miscanthus plants in separated clusters

Skupienie; Cluster	Klon; Clone	Plon s.m. (t·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Yield DM (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Liczba pędów na roślinie; Number of shoots per plant	Długość pędu; Shoot length (m)	Średnica pędu; Shoot diameter (mm)	Udział liści w plonie suchej masy; Share of leaves in DM yield (%)
1	<i>Miscanthus × giganteus</i> , M-117	21,9	51	2,5	8,0	29
2	M-105, M-115, M-40, M-7, M-114	20,5	90	2,1	5,3	40

Analiza równania regresji wielorakiej wykazała, że plon suchej masy klonu *Miscanthus × giganteus* reprezentującego skupienie 1 był warunkowany głównie liczbą pędów z karpki i ich długością (tab. 11). Natomiast plon biomasy klonu M-115 (*M. sacchariflorus* Robustus × *M. sinensis*) zaliczonego do skupienia 2 zależał głównie od liczby pędów z karpki i ich średnicy.

Tabela 11

Równania regresji opisujące zależność plonu suchej masy wybranych klonów miskanta od badanych cech biometrycznych
Equation of regression describing the dependence of dry matter yield of selected clones of miscanthus from examined biometric characteristics

Klon; Clone	Równanie; Equation	R ²
<i>Miscanthus × giganteus</i>	$y = -22,63 + 0,29x_1 + 12,27x_2$	0,64
M-115	$y = -44,52 + 0,19x_1 + 9,35x_3$	0,50

gdzie; where: y – plon (t s.m.·ha⁻¹); yield (t DM·ha⁻¹),

x₁ – liczba pędów na roślinie (szt.·roślinę⁻¹); numer of shoots per plant (pcs·plant⁻¹),

x₂ – długość pędu; shoot length (m),

x₃ – średnica pędu; shoot diameter (mm).

Cechy biometryczne w znacznym stopniu determinują również przydatność technologiczną klonów z rodzaju *Miscanthus*. Klony cechujące się większą liczbą pędów o mniejszej średnicy w większym stopniu narażone są na przedzbiorowe wyleganie roślin, co znacznie utrudnia zbiór i może prowadzić do dodatkowych strat plonu biomasy. Przeprowadzone w trakcie badań obserwacje wskazują, że największą przydatnością technologiczną do zbioru charakteryzował się klon *Miscanthus × giganteus*.

Jeżowski (2008) w badaniach nad różnymi klonami z rodzaju *Miscanthus* wykazał, że plon suchej masy był istotnie dodatnio skorelowany ze średnicą karpki i pośrednio z liczbą pędów, a wartość współczynnika korelacji zwiększała się wraz z wiekiem roślin z około 0,8 do 0,9. Angelini i in. (2009) w ponad 10-letnich badaniach określili również istotny związek pomiędzy wielkością plonu suchej masy *Miscanthus* × *giganteus* i liczbą pędów z karpki, dla którego wartość współczynnika korelacji wynosiła 0,75.

4.1.3. Plonowanie ślázowca pensylwańskiego w zależności od jakości gleby i obsady roślin

Plon suchej masy ślázowca pensylwańskiego zależał głównie od obsady roślin (tab. 12). Przy obsadzie 20 tys. roślin·ha⁻¹ był on niemal dwukrotnie wyższy niż przy gęstości 10 tys. roślin·ha⁻¹. Plon średnio w latach badań przy niższej obsadzie nie różnił się istotnie w zależności od jakości stanowiska i wynosił 8,9 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8 oraz 8,2 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4. Natomiast przy obsadzie 20 tys. roślin·ha⁻¹ wyższe plony suchej masy (18,5 t s.m.·ha⁻¹) uzyskano na glebie kompleksu 5 niż 8. Również w kolejnych latach badań plony ślázowca pensylwańskiego przy obsadzie 10 tys. roślin·ha⁻¹ nie różniły się istotnie pomiędzy porównywanymi kompleksami gleb. Natomiast w przypadku wyższej obsady roślin jakość stanowiska wpływała we wszystkich latach badań na plon suchej masy ślázowca pensylwańskiego, który na ogół był wyższy na glebie kompleksu 5 niż na pozostałych porównywanych kompleksach gleb. Zmienność plonów suchej masy ślázowca pensylwańskiego w latach w głównej mierze wynikała z przebiegu pogody oraz stopnia rozwoju chorób grzybowych na roślinach. Najniższe plony suchej biomasy uzyskano na glebach kompleksów 8 i 4 w 2008 r., w którym stwierdzono dużą ilość opadów w okresie wiosennym. Ponadto wyższa w tym okresie od średniej z wielolecia temperatura powietrza w kwietniu sprzyjała rozwojowi na roślinach chorób grzybowych ograniczających ich plonowanie. Niższe plony przy obsadzie 20 tys. roślin·ha⁻¹ na glebie kompleksu 5 uzyskano w 2011 r., który również charakteryzował się dużą ilością opadów w lipcu. Niekorzystny wpływ na plony biomasy ślázowca pensylwańskiego w tych latach zwiększały występujące naprzemiennie z intensywnymi opadami okresy suszy. Podkreślić należy, że w 2011 r. plony suchej masy ślázowca pensylwańskiego uprawianego w mniejszej obsadzie były wysokie pomimo intensywnych opadów. Spowodowane to było prawdopodobnie mniejszą gęstością łanu, co umożliwiała lepsze jego przewietrzanie oraz ograniczało rozwój chorób grzybowych na roślinach. Wpływ jakości gleby i przebiegu warunków pogodowych na plonowanie ślázowca pensylwańskiego przy obsadzie 20 tys. roślin·ha⁻¹ najlepiej obrazuje porównanie danych z lat 2009 i 2010. W roku 2009 sucha wiosna ograniczała rozwój chorób grzybowych na roślinach ślázowca pensylwańskiego, zaś w kolejnych miesiącach występowały intensywne opady oraz okresy suszy. W warunkach tych ślázowiec pensylwański na glebie ciężkiej (kompleks 8), która miała

większe zapasy wody glebowej, plonował najwyżej. Zaś na glebie lekkiej (kompleks 5), przepuszczalnej, okresowe niedobory opadów ograniczyły jego plonowanie. Z kolei w 2010 r., pomimo suchej wiosny, późniejsze opady przekraczające około dwukrotnie średnią z wielolecia spowodowały znaczne obniżenie plonów biomasy ślazuwca pensylwańskiego na glebie kompleksu 8. Średnio ze wszystkich lat badań ślazuwec plonował najwyżej na glebie kompleksu 5.

W badaniach innych autorów (Chołuj i in. 2010) ślazuwec pensylwański przy obsadzie 12,5 tys. roślin·ha⁻¹ plonował w zależności od roku od około 4 do 7 t s.m.·ha⁻¹. Natomiast Borkowska i Styk (2003) oraz Majtkowski i in. (2010) na glebie kompleksu 2 (pszennego dobrego) uzyskali plony w zakresie 13,8–17,8 t s.m.·ha⁻¹. Potencjalne plony tego gatunku mogą wynosić nawet 30 t s.m.·ha⁻¹ (Budzyński i in. 2009, Borkowska i Molas 2012).

Tabela 12

Plon (t·ha⁻¹) suchej masy ślazuwca pensylwańskiego w zależności od jakości gleby i obsady roślin

Dry matter yield (t·ha⁻¹) of virginia mallow depending on soil quality and plants density

Gleba; Soil	Obsada (tys. roślin·ha ⁻¹); Density (thous. plants·ha ⁻¹)	2008	2009	2010	2011	Średnia dla kompleksu; Mean for complex
Kompleks 8; Complex 8	10	6,8 a *	10,5 bc	7,6 abc	11,1 b	8,9 a
	20	11,8 a	20,4 b	12,2 ac	13,2 ad	14,3 a
Kompleks 4; Complex 4	10	6,9 ac	7,2 ac	10,3 bc	9,8 ab	8,2 a
Kompleks 5; Complex 5	20	19,1 bd	18,1 bcd	19,3 bd	17,3 ab	18,5 b
Średnia **; Mean **	10	6,8 a	8,7 ab	9,0 b	10,9 b	8,6 a
	20	15,3 a	19,3	15,5 a	15,1 a	16,2 b

* dane oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie, $\alpha = 0,05$;
data marked with the same letter do not differ significantly at $\alpha = 0,05$

** dla wartości średnich i wariantów gęstości różnice są obliczone oddzielnie;
for mean values and variants of plants, density significance of differences is calculated separately

W badaniach własnych stwierdzono, że cechy biometryczne roślin ślazuwca pensylwańskiego różnicowały się głównie w zależności od jakości gleby (tab. 13). Przy obsadzie 10 tys. roślin·ha⁻¹ istotnie większą liczbę pędów z rośliny, ale o mniejszej ich wysokości i średnicy wykształciły rośliny ślazuwca pensylwańskiego na glebie kompleksu 8 w porównaniu z wartościami tych cech na glebie kompleksu 4. Podobną zależność tych cech stwierdzono przy obsadzie 20 tys. roślin·ha⁻¹ u roślin ślazuwca pensylwańskiego uprawianych na glebie kompleksu 5 w stosunku do 8, gdzie jedyny wyjątek stanowiła średnica pędów. Różnica pomiędzy średnimi wartościami badanych cech dla danego wariantu obsady roślin nie przekraczała błędu eksperymentalnego.

Analiza regresji wielorakiej wykazała, że plon suchej masy ślázowca pensylwańskiego przy obsadzie 10 tys. roślin·ha⁻¹ był uzależniony od wszystkich badanych cech biometrycznych (tab. 14). Natomiast przy obsadzie 20 tys. roślin·ha⁻¹ plon suchej masy zależał głównie od liczby pędów z rośliny i ich średnicy.

Tabela 13

Cechy biometryczne roślin ślázowca pensylwańskiego w zależności od jakości gleby i obsady roślin (średnia dla lat 2008–2011)
Biometric features of virginia mallow plants depending on soil quality and plants density (mean for years 2008–2011)

Gleba; Soil	Obsada (tys. roślin·ha ⁻¹); Density (thous. plants·ha ⁻¹)	Liczba pędów na roślinie; Number of shoots per plant	Długość pędu; Shoot length (m)	Średnica pędu; Shoot diameter (mm)
Kompleks 8; Complex 8	10	21 a*	2,6 a	13,0 a
	20	15 a	2,9 a	13,6 a
Kompleks 4; Complex 4	10	15 b	3,2 b	14,6 b
Kompleks 5; Complex 5	20	22 b	2,8 b	13,2 a
Średnia**; Mean**	10	18 a	2,9 a	13,8 a
	20	18 a	2,8 a	13,4 a

* dane oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie, $\alpha = 0,05$;
data marked with the same letter are not differ significantly at $\alpha = 0,05$

** dla wartości średnich i wariantów gęstości różnice są obliczone oddzielnie;
for mean values and variants of plants density significance of differences is calculate separately

Tabela 14

Równania regresji opisujące zależność wielkości plonu suchej masy ślázowca od badanych cech biometrycznych przy zróżnicowanej obsadzie roślin
Equation of regression describing the dependence of dry matter yield of virginia mallow from examined biometric characteristics for different plants density

Obsada (tys. roślin·ha ⁻¹); Density (thous. plants·ha ⁻¹)	Równanie; Equation	R ²
10	$y = -14,03 + 0,44x_1 + 1,33x_2 + 0,79x_3$	0,82
20	$y = -26,51 + 0,79x_1 + 2,1x_3$	0,71

gdzie; where: y – plon (t s.m.·ha⁻¹); yield (t DM·ha⁻¹),

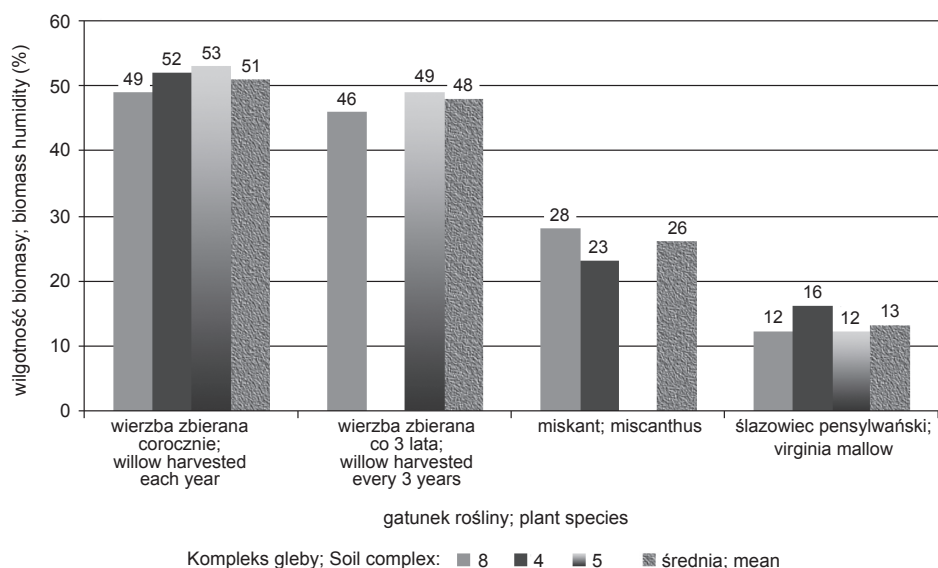
x_1 – liczba pędów na roślinie (szt.·roślinę⁻¹); numer of shoots per plant (pcs·plant⁻¹),

x_2 – długość pędu; shoot length (m),

x_3 – średnica pędu; shoot diameter (mm).

4.2. JAKOŚĆ BIOMASY BADANYCH GATUNKÓW ROŚLIN I JEJ PRZYDATNOŚĆ DO CELÓW ENERGETYCZNYCH

Czynnikiem decydującym o wartości biomasy roślin wieloletnich jako surowca energetycznego jest jej wilgotność, wysoce ujemnie skorelowana z wartością opałową. Spośród gatunków roślin badanych w doświadczeniu największą wilgotnością cechowała się biomasa wierzby, znacznie mniejszą natomiast biomasa klonów miskanta i ślázowca pensylwańskiego (rys. 6). Biomasa wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim miała o 3% większy udział suchej masy niż zbierana w cyklu corocznym. W przypadku tego gatunku zaobserwowano zmniejszenie wilgotności biomasy wraz poprawą jakości gleby.



Rys. 6. Wilgotność biomasy w zależności od gatunku rośliny i jakości gleby (średnia dla lat 2008–2011)

Biomass humidity depending on plant species and soil quality (mean for years 2008–2011)

Wilgotność biomasy wierzby zbieranej w cyklu corocznym wahała się w granicach od 54% u odmiany Olof do 50% u klonu 1023. W biomacie klonów hodowli polskiej oznaczono wilgotność średnio o 3% niższą niż w drewnie odmian zagranicznych. Również w cyklu zbioru co 3 lata największą wilgotność miała biomasa odmiany Olof (51%), a niższą klony 1052 i 1054 (46%).

Zróznicowanie wilgotności biomasy stwierdzono również w badanych klonach traw z rodzaju *Miscanthus*. Najniższą wilgotność (23%) oznaczono w biomacie klonów M-114 (*M. sacchariflorus* Robustus) i M-40 (*M. sinensis* Silver Feather), a najwyższą (40%) w biomacie M-117 (*M. sacchariflorus* × *M. sinensis*). Wilgotność biomasy klonu *Miscanthus* × *giganteus* średnio dla lat badań wynosiła 31%.

Klony cechujące się najmniejszą wilgotnością miały także wysoki udział liści w plonie suchej masy ogółem, które w okresie jesiennym zasychały najwcześniej. Natomiast klony, których biomasa miała większą wilgotność w trakcie zbioru miały mniej zdrewniałe pędy, a udział liści w plonie suchej masy był niski. Można więc przypuszczać, że termin zbioru i cechy morfologiczne roślin miały wpływ na uzyskane wyniki.

Obsada roślin ślazuca pensylwańskiego tylko w nieznacznym stopniu wpływała na wilgotność zbieranej biomasy, która przy gęstości 10 tys. roślin·ha⁻¹ wynosiła 14%, a przy zagęszczeniu 20 tys. roślin·ha⁻¹ – 12%. Biomasa ślazuca pensylwańskiego, niezależnie od jakości gleby, cechowała się najniższą wilgotnością spośród wszystkich porównywanych w doświadczeniu gatunków roślin.

W badaniach przeprowadzonych przez Stolarskiego (2009) wilgotność biomasy wierzby wynosiła średnio 51,7% i była istotnie zróżnicowana w zależności od cyklu zbioru i odmiany. Wilgotność biomasy pędów jednorocznych wynosiła 53,5%, a pędów 3-letnich – 50,5%.

Wilgotność robocza biomasy miskanta olbrzymiego wahała się natomiast w granicach 26–56%, a ślazuca pensylwańskiego w zależności od terminu zbioru roślin 20–44% (Stolarski i in. 2008a).

Jednym z ważniejszych parametrów oceny surowców energetycznych jest ciepło spalania, które w absolutnie suchej biomacie wynosi u wierzby 17,9–18,0 MJ·kg⁻¹, miskanta olbrzymiego 16,3–18,6 MJ·kg⁻¹ i ślazuca pensylwańskiego 16,8–17,4 MJ·kg⁻¹ (Wandrasz i Wandrasz 2006, Kuś i Matyka 2010, Kotecki 2010, Winnicka i in. 2010).

W suchej biomacie całych pędów (drewno i kora) wierzby zbieranej corocznie oznaczono (niezależnie od jakości gleby i odmiany/klonu) 44,5% węgla całkowitego, 0,7% azotu, 0,3% potasu, 0,01% fosforu, 0,33% wapnia i 0,06% magnezu (tab. 15 i 16). Zawartość makroskładników w niewielkim stopniu różnicowała się w zależności od jakości gleby i odmiany/klonu, niemniej jednak najmniejszą ich koncentracją cechowała się biomasa wierzby uprawianej na glebie kompleksu 8 oraz pochodząca z odmiany Olof i klonu 1023. Na glebie kompleksu 8 odnotowano tendencję do większego gromadzenia w biomacie wierzby kadmu. Nieco większe ilości tego składnika stwierdzono również w biomacie klonów 1052 i 1047, a mniej w biomacie roślin należących do odmian Olof i Gigantea. Największe ilości miedzi i cynku w biomacie gromadziła wierzba uprawiana na glebie kompleksu 4, a ołowiu na glebie kompleksu 5. Tendencją do gromadzenia w biomacie większych ilości badanych metali ciężkich cechowały się klony: 1023, 1052 i 1047, najmniej gromadziły natomiast rośliny odmian: Olof, Gigantea i Torhild (tab. 15 i 16).

Porównując skład chemiczny biomasy wierzby z niemiecką normą jakościową DIN 51731 dla peletu drzewnego, należy stwierdzić, że zawartość azotu i kadmu przekracza wartości progowe, które wynoszą odpowiednio <0,3% N oraz <0,5 mg Cd·kg⁻¹ suchej masy (Normy dla pelletów 2011). Może to w znacznym stopniu ograniczać możliwość wykorzystania zrębków pozyskiwanych z jednorocznych pędów

wierzby do produkcji peletu. Rozwiązaniem tego problemu może być przygotowanie surowca do produkcji peletu poprzez mieszanie biomasy wierzby i drzew leśnych.

Tabela 15

Skład chemiczny biomasy wierzby* w zależności od jakości gleby
Chemical composition of willow* biomass depending on soil quality

Gleba; Soil	Zawartość w suchej masie; Content in dry matter										
	%						mg·kg ⁻¹				
	N	P	K	Na	C – całk.; total	Ca	Mg	Cd	Cu	Pb	Zn
Kompleks 8; Complex 8	0,69	0,08	0,29	0,006	44,5	0,34	0,05	1,71	3,05	0,38	68,0
Kompleks 4; Complex 4	0,71	0,10	0,30	0,007	44,6	0,30	0,06	1,07	3,41	0,31	79,8
Kompleks 5; Complex 5	0,67	0,10	0,31	0,008	44,4	0,36	0,06	0,79	3,14	0,41	49,1

* dla cyklu zbioru corocznego; for each year cycle harvest

Tabela 16

Skład chemiczny biomasy wierzby* w zależności od odmiany/klonu (średnio dla gleb)
Chemical composition of willow* biomass depending on variety/clone (average for soil)

Odmiana/klon; Variety/clone	Zawartość w suchej masie; Content in dry matter										
	%						mg·kg ⁻¹				
	N	P	K	Na	C – całk.; total	Ca	Mg	Cd	Cu	Pb	Zn
1023	0,62	0,08	0,25	0,007	44,5	0,38	0,07	1,31	3,48	0,45	74,1
1054	0,71	0,11	0,34	0,007	44,6	0,29	0,06	1,24	3,26	0,25	64,3
1052	0,69	0,11	0,32	0,007	44,1	0,34	0,06	1,48	3,32	0,36	73,7
1047	0,72	0,10	0,33	0,007	44,3	0,30	0,06	1,58	3,23	0,46	78,3
Torhild	0,74	0,09	0,27	0,007	44,6	0,36	0,05	1,09	2,90	0,35	65,7
Sven	0,72	0,09	0,32	0,007	44,6	0,31	0,05	1,02	3,25	0,39	63,6
Tora	0,69	0,10	0,31	0,007	44,6	0,31	0,05	1,33	3,33	0,34	70,9
Olof	0,63	0,08	0,25	0,007	44,8	0,37	0,05	0,90	2,95	0,33	50,1
Gigantea	0,70	0,09	0,31	0,007	44,5	0,30	0,06	0,93	3,13	0,33	55,3
Średnia; Mean	0,69	0,10	0,30	0,007	44,5	0,33	0,06	1,21	3,20	0,36	65,7

* dla cyklu zbioru corocznego; for each year cycle harvest

Wpływ jakości gleby na skład chemiczny biomasy pozyskiwanej z łodyg miskanta średnio dla wszystkich badanych genotypów był niewielki (tab. 17). Sucha biomasa miskanta zawierała średnio 43,4% węgla całkowitego, 0,4% azotu i 0,6% potasu, 0,04% fosforu, 0,16% wapnia i 0,08% magnezu. Tendencję do gromadzenia większych ilości makroskładników miały klony M-07 (*M. sinensis* Gofal)

i M-117 (*M. sacchariflorus* × *M. sinensis*), mniejszych natomiast M-105 (*M. sinensis*), M-40 (*M. sinensis* Silver Feather) i *Miscanthus* × *giganteus*. Najmniej węgla całkowitego zawierała biomasa klonu M-07 (*M. sinensis* Gofal), a najwięcej klonu *Miscanthus* × *giganteus* (tab. 18).

Tabela 17

Skład chemiczny biomasy pozyskanej z łodyg miskanta w zależności od jakości gleby
Chemical composition of miscanthus biomass acquired from shoots depending on soil quality

Gleba; Soil	Zawartość w suchej masie; Content in dry matter										
	%					mg·kg ⁻¹					
	N	P	K	Na	C – całk.; total	Mg	Ca	Cd	Cu	Pb	Zn
Kompleks 8; Complex 8	0,41	0,04	0,67	0,007	43,3	0,08	0,15	0,10	2,43	0,32	14,5
Kompleks 4; Complex 4	0,36	0,04	0,50	0,007	43,4	0,07	0,16	0,10	2,14	0,21	18,5

Tabela 18

Skład chemiczny biomasy pozyskanej z łodyg miskanta w zależności od klonu
Chemical composition of miscanthus biomass acquired from shoots depending on clone

Klon; Clone	Zawartość w suchej masie; Content in dry matter										
	%					mg·kg ⁻¹					
	N	P	K	Na	C – całk.; total	Mg	Ca	Cd	Cu	Pb	Zn
<i>Miscanthus</i> × <i>giganteus</i>	0,34	0,03	0,58	0,007	44,1	0,07	0,10	0,18	1,74	0,28	15,7
M-115	0,40	0,04	0,56	0,007	43,3	0,04	0,06	0,06	2,35	0,23	12,8
M-105	0,31	0,04	0,51	0,007	43,5	0,07	0,16	0,12	1,90	0,18	13,1
M-40	0,29	0,04	0,52	0,007	43,7	0,09	0,17	0,12	2,52	0,38	25,5
M-07	0,51	0,06	0,80	0,007	42,6	0,09	0,19	0,08	3,00	0,29	19,8
M-117	0,45	0,04	0,79	0,007	43,4	0,06	0,10	0,05	2,30	0,21	8,8
M-114	0,51	0,032	0,6	0,007	43,2	0,14	0,42	0,07	2,45	0,41	11,9
Średnio; Mean	0,40	0,04	0,62	0,007	43,4	0,08	0,17	0,10	2,32	0,28	15,4

Biomasa łodyg miskanta uprawianego na glebie kompleksu 8 gromadziła większe ilości miedzi i ołowiu, a pochodząca z gleby kompleksu 5 – cynku. Tendencją do gromadzenia większych ilości metali ciężkich cechował się klon M-40 (*M. sinensis* Silver Feather), najmniej gromadził natomiast klon M-117 (*M. sacchariflorus* × *M. sinensis*). Najwięcej kadmu w łodygach gromadził klon *Miscanthus* × *giganteus*, miedzi – M-07 (*M. sinensis* GOFAL), ołowiu – M-114 (*M. sacchariflorus* Robustus), a cynku – M-40 (*M. sinensis* Silver Feather).

Niewielkie różnice w zawartości makroskładników i metali ciężkich w liściach miskanta stwierdzono w zależności od jakości gleby i klonu (tab. 19 i 20). Liście miskanta zawierały średnio 42% węgla całkowitego, 0,54% azotu, 0,52% potasu, 0,05% fosforu, 0,09% wapnia i 0,35% magnezu w suchej masie. Stwierdzono mniejszą zawartość azotu i potasu w liściach miskanta uprawianego na lekkiej glebie (kompleks 4) niż na glebie ciężkiej (kompleks 8). Tendencję do gromadzenia większych ilości makroskładników w liściach miał klon M-07 (*M. sinensis* Gofal) i M-117 (*M. sacchariflorus* × *M. sinensis*), natomiast mniejszych – M-105 (*M. sinensis*), M-114 (*M. sacchariflorus* Robustus) i *Miscanthus* × *giganteus*. Najmniej węgla całkowitego zawierała biomasa klonu M-114 (*M. sacchariflorus* Robustus), najwięcej natomiast klonu M-115 (*M. sacchariflorus* Robustus × *M. sinensis*).

Tabela 19

Skład chemiczny liści miskanta w zależności od jakości gleby
Chemical composition of miscanthus leaves in depending on soil quality

Gleba; Soil	Zawartość w suchej masie; Content in dry matter										
	%					mg·kg ⁻¹					
	N	P	K	Na	C – całk; total.	Ca	Mg	Cd	Cu	Pb	Zn
Kompleks 8; Complex 8	0,58	0,04	0,54	0,007	41,5	0,10	0,36	0,07	2,86	0,59	19,9
Kompleks 4; Complex 4	0,50	0,05	0,49	0,008	42,1	0,08	0,34	0,10	2,55	0,41	21,7

Tabela 20

Skład chemiczny liści miskanta w zależności od klonu
Chemical composition of miscanthus leaves depending on clone

Klon; Clone	Zawartość w suchej masie; Content in dry matter										
	%					mg·kg ⁻¹					
	N	P	K	Na	C – całk.; total	Mg	Ca	Cd	Cu	Pb	Zn
<i>Miscanthus</i> × <i>giganteus</i>	0,64	0,05	0,61	0,008	41,9	0,09	0,33	0,14	3,73	0,55	32,8
M-115	0,51	0,05	0,51	0,007	42,0	0,10	0,35	0,06	2,09	0,93	16,2
M-105	0,43	0,05	0,35	0,007	41,8	0,09	0,31	0,11	2,12	0,33	18,1
M-40	0,50	0,05	0,39	0,007	41,5	0,09	0,44	0,10	2,58	0,44	19,5
M-07	0,61	0,06	0,74	0,007	41,9	0,10	0,36	0,07	3,20	0,39	19,8
M-117	0,71	0,04	0,58	0,007	41,9	0,11	0,53	0,04	2,69	0,43	21,3
M-114	0,48	0,03	0,49	0,007	41,4	0,07	0,15	0,07	2,67	0,49	13,5
Średnio; Mean	0,55	0,05	0,52	0,007	41,8	0,09	0,35	0,08	2,73	0,51	20,2

Podobnie jak biomasa pozyskiwana z łodyg również liście miskanta uprawianego na glebie kompleksu 8 gromadziły większe ilości miedzi i ołowiu, a w biomacie pozyskiwanej z gleby kompleksu 4 – cynku. Tendencją do gromadzenia większych ilości metali ciężkich w liściach cechował się klon *Miscanthus × giganteus*, natomiast najmniej gromadził klon M-105 (*M. sinensis*).

Zawartość azotu zarówno w liściach, jak i biomacie pozyskiwanej z łodyg miskanta, poza klonem M-40 (*M. sinensis* Silver Feather), przekraczała wartość graniczną dla tego pierwiastka podaną w niemieckiej normie DIN 51731. Jednak w większości przypadków spełniała ona wymagania austriackiej normy ÖNORM M 7135 dla peletu z kory drzewnej, w której określono maksymalną zawartość azotu w suchej masie na poziomie $\leq 0,6\%$.

Biomasa ślazuca pensylwańskiego uprawianego na glebie kompleksu 4 charakteryzowała się najmniejszą, oprócz potasu, zawartością makroskładników i metali ciężkich oraz węgla całkowitego. Najwięcej z badanych makroskładników i metali ciężkich zawierała biomasa ślazuca pensylwańskiego uprawianego na glebie kompleksu 8 (tab. 21). Biomasa ślazuca pensylwańskiego spełniała potencjalne wymagania jakościowe dla peletu drzewnego zawarte w normie DIN 51731.

Tabela 21

Skład chemiczny biomasy ślazuca pensylwańskiego w zależności od jakości gleby
Chemical composition of virginia mallow biomass depending on soil quality

Gleba; Soil	Zawartość w suchej masie; Ontent in dry matter										
	%					mg·kg ⁻¹					
	N	P	K	Na	C – całk.; total	Ca	Mg	Cd	Cu	Pb	Zn
Kompleks 8; Complex 8	0,25	0,02	0,40	0,007	42,7	0,66	0,06	0,36	2,41	0,44	16,6
Kompleks 4; Complex 4	0,21	0,01	0,47	0,007	42,3	0,28	0,04	0,17	1,94	0,24	7,5
Kompleks 5; Complex 5	0,21	0,02	0,22	0,007	43,0	0,60	0,08	0,19	1,99	0,59	15,5
Średnio; Mean	0,22	0,02	0,36	0,007	42,7	0,51	0,06	0,24	2,11	0,42	13,2

Biomasa wierzby pozyskiwana z pędów zbieranych w cyklu jednorocznym zawierała najwięcej węgla (44,5%), zaś w biomacie miskanta i ślazuca jego udział wynosił około 42–43%. Zawartość azotu w biomacie wierzby również była znacznie wyższa niż w biomacie miskanta i ślazuca. Rośliny wierzby akumulowały zdecydowanie największe ilości metali ciężkich. W przypadku kadmu była to ilość około 12-krotnie większa niż w biomacie miskanta i niemal 5-krotnie wyższa niż w biomacie ślazuca pensylwańskiego. Ze względu na znaczną zawartość azotu i kadmu biomasa wierzby pozyskiwanej z jednorocznych pędów nie spełnia rygorystycznych norm jakościowych zawartych w niemieckiej normie DIN 51731 dla peletu

drzewnego, co może ograniczać możliwość jej wykorzystania do tego celu. Biomasa wierzby pozyskiwana z jednorocznych pędów zawierała również ponad 3–4-krotnie więcej cynku niż biomasa miskanta i ślazuwca pensylwańskiego. Jedynie w przypadku ołowiu jego zawartość była najwyższa w biomacie ślazuwca pensylwańskiego. Biomasa klonów miskanta cechowała się natomiast niemal dwukrotnie wyższą niż w przypadku biomasy wierzby i ślazuwca pensylwańskiego zawartością potasu.

W badaniach Stolarskiego (2009) zawartość pierwiastków (oprócz sodu) w biomacie wierzby była istotnie różnicowana przez odmianę i cykl zbioru. Zawierała ona średnio 0,42% azotu w suchej masie, co stanowiło około 40% mniej niż w badaniach własnych. W miarę wydłużania cyklu zbioru od jednorocznego do trzyletniego zawartość azotu w biomacie wierzby istotnie zmniejszała się. Zawartość fosforu w biomacie wierzby kształtowała się na zbliżonym – niskim poziomie, a potasu była ponad trzykrotnie niższa niż w badaniach własnych. Zawartość tych pierwiastków w biomacie wierzby również uległa zmniejszeniu wraz z wydłużeniem cyklu zbioru z jednorocznego do trzyletniego. Sód w biomacie wierzby oznaczono również w najniższych ilościach ze wszystkich badanych pierwiastków. Zawartość węgla wahała się w granicach 50–53% s.m. (Stolarki 2009). Wandrasz i Wandrasz (2006) podają, że zawartość węgla w biomacie wierzby wynosi: 47,1%, azotu – 0,5%, kadmu – 0,6 mg·kg⁻¹ s.m., miedzi – 3,22 mg·kg⁻¹ s.m., ołowiu – 0,1 mg·kg⁻¹ s.m., cynku – 67,7 mg·kg⁻¹ s.m. i oznaczone wartości są zbliżone do wyników uzyskanych w badaniach własnych.

W badaniach Koteckiego (2010) zawartość azotu w biomacie miskanta olbrzymiego w momencie zbioru wyniosła 0,65% suchej masy. W cytowanej pracy stwierdzono, że zróżnicowane nawożenie roślin miskanta olbrzymiego azotem w dawkach: 100, 150, 200 kg N·ha⁻¹ nie modyfikowało zawartości analizowanego pierwiastka w częściach nadziemnych. Zawartość fosforu kształtowała się na poziomie 0,1% s.m. z wahaniami w latach od 0,06 do 0,19%, a potasu była wyższa niż w badaniach własnych i wynosiła 0,9% s.m. Natomiast zawartość miedzi i cynku była zbliżona do wartości uzyskanych w badaniach własnych i wynosiła odpowiednio: 2,18 i 24,0 mg·kg⁻¹ s.m., zaś węgiel stanowił 49,8% suchej masy łodyg i 48,8% liści (Kotecki 2010).

Winnicka i in. (2010) podają, że biomasa ślazuwca pensylwańskiego zawiera 47,8–48,6% węgla w suchej masie, 0,34–0,45% azotu, 1,1–1,3% wapnia, 0,18–0,52% potasu. Zawartość metali ciężkich w biomacie tej rośliny wahała się w granicach: cynk 17–22 mg·kg⁻¹ s.m., miedź 4–14 mg·kg⁻¹ s.m., ołów 1,1–3,8 mg·kg⁻¹ s.m., kadm 0,2–1,0 mg·kg⁻¹ s.m. Również w badaniach Wiśniewskiej i Kalembasy (2011) biomasa łodyg ślazuwca pensylwańskiego zbieranego w grudniu zawierała znacznie więcej ołowiu (8,2 mg·kg⁻¹ s.m.) i kadmu (11,4 mg·kg⁻¹ s.m.) niż oznaczono w badaniach własnych. Znaczną rozbieżność wyników uzyskanych przez cytowanych autorów należy tłumaczyć tym, że materiał rośliny do badań pochodził ze zróżnicowanych geograficznie i jakościowo stanowisk glebowych.

4.3. EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA PRODUKCJI BIOMASY

Wykonanie kalkulacji przedwstępnych jest jednym z trudniejszych zadań, przed jakim staje ekonomika rolnictwa. Dotyczy to szczególnie nowych kierunków produkcji, do których należy zaliczyć uprawę roślin z przeznaczeniem na biomasa stałą. Brak jest w tym przypadku sprawdzonych metod oceny efektywności ekonomicznej, a dostępne bazy danych wyjściowych są bardzo skromne. Wiele analiz i opracowań opiera się w dużej mierze na założeniach teoretycznych, co nierzadko jest przyczyną znacznego zróżnicowania uzyskanych wyników. Przedstawiona w opracowaniu ocena efektywności ekonomicznej opiera się na wynikach badań własnych i wypracowanych na podstawie danych literaturowych założeniach autorskich.

Zabiegiem poprzedzającym założenie plantacji i w znacznej mierze warunkującym przyjęcie i właściwe ukorzenie sadzonek oraz ich prawidłowy wzrost jest odpowiednie przygotowanie pola. Głównym nośnikiem kosztów na etapie przygotowania pola jest użycie maszyn i narzędzi, które dla wariantu z usługowym wykorzystaniem maszyn stanowił 66% ogółu kosztów, a przy wykorzystaniu maszyn własnych 52% (tab. 22). Drugi co do udziału nośnik w strukturze stanowiły koszty materiałowe, spośród których dominowały nawozy mineralne.

Tabela 22

Koszty przygotowania pola do założenia plantacji roślin energetycznych
Costs of preparing the field to establish plantations of energy plants

Wyszczególnienie; Specification	Usługowe wykonanie prac; Service work performed		Maszyny własne; Own machines	
	zł·ha ⁻¹	%	zł·ha ⁻¹	%
Analiza gleby (pH, P, K, Mg); Analysis of soil (pH, P, K, Mg)	10	0,4	10	0,6
Koszty użycia maszyn i narzędzi; Costs of using machines and tools	1464	65,6	934	51,6
Koszty materiałowe (nawozy, herbicydy); Costs of materials (fertilizers, herbicides)	640	28,7	640	35,4
Wynagrodzenie za pracę; Payment for work	117	5,3	225	12,4
Razem; Total	2231	100	1809	100

Źródło; Source: Matyka 2012

Analizując koszty przygotowania pola do założenia plantacji roślin energetycznych, należy uwzględnić, że zakup maszyn własnych do wykonania tych czynności ma uzasadnienie ekonomiczne jedynie w przypadku, gdy będą one wykorzystywane w technologii produkcji innych roślin w gospodarstwie. W przeciwnym razie, gdy rolnik traktuje założenie plantacji jako przedsięwzięcie jednorazowe, jedynym

uzasadnionym ekonomicznie rozwiązaniem jest skorzystanie z usług maszynowych (Matyka 2012).

Najwyższe nakłady finansowe na założenie plantacji należy ponieść w przypadku miskanta olbrzymiego i wierzby krzewiastej uprawianej w corocznym cyklu zbioru. Koszty założenia plantacji miskanta olbrzymiego w zależności od wariantu jej prowadzenia wahają się od 13,3 do 17,0 tys. zł·ha⁻¹ (tab. 23). Główną ich składową stanowi koszt zakupu sadzonek, który wynosi aż 11,7 tys. zł·ha⁻¹. Koszty założenia plantacji miskanta olbrzymiego w zależności od wariantu technologii są wyższe o 46–67% niż wierzby uprawianej w cyklu zbioru co 3 lata i 82–154% niż ślázowca pensylwańskiego. Koszty założenia plantacji wierzby zbieranej corocznie wynoszą od 11,2 do 15,2 tys. zł·ha⁻¹, w tym zakup zrzesów (sadzonek) 9 tys. zł·ha⁻¹. Wysokie koszty w przypadku miskanta olbrzymiego i wierzby zbieranej corocznie warunkowane są głównie ceną i ilością materiału sadzonkowego. W warunkach zbioru wierzby w cyklu trzyletnim koszt sadzonek wynosi 6 tys. zł·ha⁻¹ i jest niższy o 50% niż przy jej zbiorze co roku. Koszty założenia plantacji wierzby przeznaczonej do zbioru w cyklu trzyletnim są wyższe w porównaniu do kosztów założenia plantacji ślázowca pensylwańskiego o 25–56%. Najniższe koszty ponoszone są na założenie plantacji ślázowca pensylwańskiego i w zależności od stosowanej technologii produkcji wynoszą od 5,2 do 9,4 tys. zł·ha⁻¹ (tab. 23). Wynika to z niskich kosztów materiału sadzonkowego (3 tys. zł·ha⁻¹). Wariantowa analiza zakładania i prowadzenia plantacji w pierwszym roku wegetacji wykazała, że w przypadku każdego badanego gatunku roślin najwyższe koszty ponoszono w wariantcie z większym udziałem nakładów pracy ręcznej (Uw). W wariantcie tym koszty pracy wahały się od 4,4 do 5,1 tys. zł·ha⁻¹, podczas gdy w przypadku technologii zmechanizowanej wynosiły od 0,1 do 0,3 tys. zł·ha⁻¹ (tab. 23).

Uzyskane wyniki wskazują, że najwyższe koszty bieżącej eksploatacji plantacji należy ponieść w przypadku wierzby zbieranej co roku. W wariantcie technologii z większymi nakładami pracy ręcznej koszty roczne eksploatacji plantacji wynoszą 3,5 tys. zł·ha⁻¹·rok⁻¹. Najniższe koszty bieżącej eksploatacji plantacji (1,6 tys. zł·ha⁻¹·rok⁻¹) wiążą się z uprawą wierzby w technologii w pełni zmechanizowanej i zbieranej co 3 lata (tab. 23). Roczne koszty eksploatacji plantacji miskanta olbrzymiego i ślázowca pensylwańskiego są zbliżone i wynoszą od 2,1 do 2,4 tys. zł·ha⁻¹·rok⁻¹. Relatywnie wysoki ich poziom wynika z tego, iż zbiór tych roślin wykonywany jest w cyklach corocznych. Ponadto w każdym roku konieczne jest ich nawożenie i ograniczenie występowania chwastów, chorób oraz szkodników. Zabiegi te generują koszty, które w przypadku wierzby uprawianej i zbieranej co 3 lata należy ponieść tylko w pierwszym roku cyklu produkcyjnego. Główny nośnik kosztów związanych z prowadzeniem plantacji roślin na cele energetyczne stanowią koszty użycia maszyn i narzędzi (40–65%) oraz koszty materiałowe (12–43%). Koszty pracy mają znaczny udział w rocznych kosztach eksploatacji plantacji (28–32%) jedynie w przypadku wierzby uprawianej w technologii z dużymi nakładami pracy ręcznej w stosunku do innych badanych gatunków i wariantów technologii.

Tabela 23

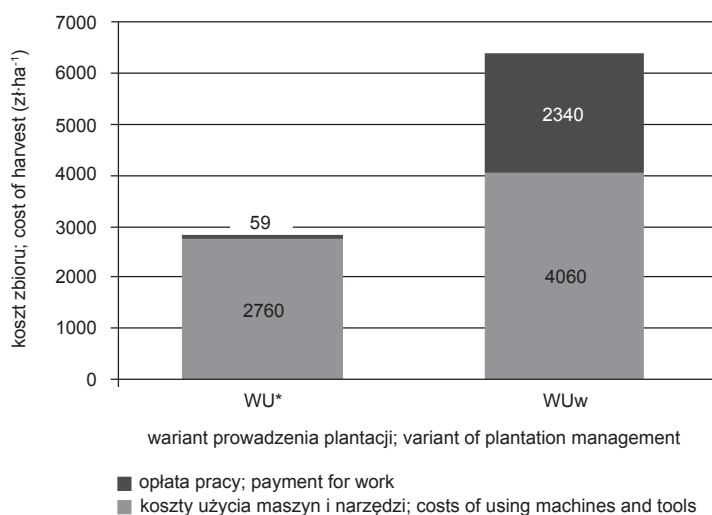
Koszty założenia, bieżącej eksploatacji i likwidacji plantacji roślin energetycznych w zależności od gatunku rośliny i technologii produkcji
 Cost of establishment, current exploitation and liquidation of the energy plants plantations, depending on the plant species and technology of production

Wyszczególnienie Specification	Gatunek rośliny i system jej uprawy Species of plants and system of cultivation													
	WU*	WUw	WM	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₉	SM	
	6000	6000	6000	9000	9000	9000	11700	11700	11700	11700	11700	11700	3000	
Założenie plantacji; Establishment of plantation (zł·ha ⁻¹)	koszty sadzonek; cost of seedlings	6000	6000	6000	9000	9000	9000	11700	11700	11700	11700	11700	3000	3000
	koszty materiałowe; costs of materials	662	662	662	662	662	662	373	373	373	373	666	666	
	koszty maszyn i narzędzi; costs of machines and tools	1168	363	1038	1300	363	1133	1215	258	821	1360	363	1113	
	koszty pracy; costs of labour	105	4434	242	105	5019	249	105	4481	222	105	5136	260	
	pozostałe koszty; other costs	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	
RAZEM; TOTAL	8129	11653	8136	11261	15238	11237	13588	17006	758	758	1051	1051	5232	
Roczne koszty eksploatacji plantacji (zł·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Annual cost of plantation exploitation (zł·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	koszty materiałowe; costs of materials	349	349	349	1047	1047	1047	758	758	758	758	1051	1051	
	koszty maszyn i narzędzi; costs of machines and tools	1065	1498	991	1814	1164	1703	1059	1059	989	1064	1064	960	
	koszty pracy; costs of labour	39	800	102	117	1112	249	117	117	231	117	117	216	
	pozostałe koszty; other costs	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	
	RAZEM; TOTAL	1647	2840	1637	3172	3516	3192	2128	2128	2128	2172	2425	2425	
Likwidacja plantacji; Liquidation of plantation (zł·ha ⁻¹)	koszty materiałowe; costs of materials	198	198	198	198	198	198	123	123	123	123	123	123	
	koszty maszyn i narzędzi; costs of machines and tools	980	980	792	980	980	792	753	753	598	753	753	598	
	koszty pracy; costs of labour	59	59	164	59	59	164	59	59	137	59	59	137	
	pozostałe koszty; other costs	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	
	RAZEM; TOTAL	1431	1431	1348	1431	1431	1348	1128	1128	1053	1128	1128	1053	

* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Źródło: Opracowanie własne; Source: Own study

Znaczny udział w bieżących kosztach prowadzenia plantacji ma zbiór roślin, który stanowi: 55–75% w przypadku wierzby zbieranej co 3 lata, 44–51% wierzby zbieranej corocznie, 36–37% traw z rodzaju *Miscanthus* i 31–33% ślazuwa pensylwańskiego. W ujęciu bezwzględny koszty zbioru roślin są najwyższe na plantacji wierzby krzewiastej zbieranej w cyklu trzyletnim. Natomiast dla ślazuwa pensylwańskiego i miskanta, niezależnie od technologii, pozostają one na zbliżonym, niższym poziomie. Koszty zbioru wierzby w cyklu trzyletnim przy większych nakładach pracy ręcznej wynoszą 6,4 tys. zł·ha⁻¹·3 lata⁻¹ i są ponad dwukrotnie wyższe niż dla wariantu technologii w pełni zmechanizowanej (rys. 7).



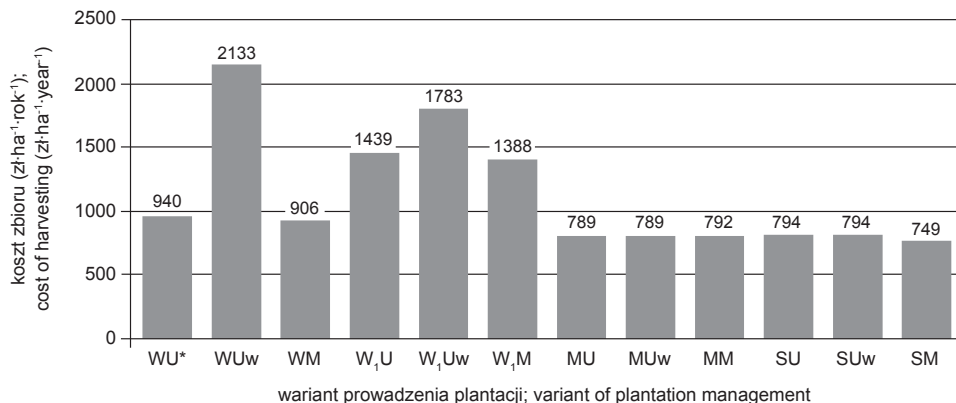
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 7. Koszty zbioru wierzby pozyskiwanej co 3 lata w technologii w pełni zmechanizowanej (WU) i technologii z udziałem pracy ręcznej (WUw)
 Costs of harvest willow collected every 3 years in fully mechanized technology (WU) and technology with share of handwork

Koszty zbioru poszczególnych gatunków roślin porównano w odniesieniu do jednego roku (zł·ha⁻¹·rok⁻¹) (rys. 8). Dla wszystkich analizowanych technologii średnio najwyższymi kosztami zbioru cechuje się uprawa i pozyskanie roślin wierzby w cyklu corocznym. Koszty zbioru wierzby uprawianej w cyklu trzyletnim w technologii w pełni zmechanizowanej wahają się w granicach 906–940 zł·ha⁻¹·rok⁻¹ i tylko nieznacznie przewyższają koszty zbioru miskanta i ślazuwa pensylwańskiego. W przypadku technologii zbioru wierzby z dużymi nakładami pracy ręcznej są one ponad dwukrotnie wyższe niż w przypadku zbioru klonów miskanta i ślazuwa pensylwańskiego.

Koszty likwidacji plantacji są stosunkowo niskie i wahały się od 1053 do 1431 zł·ha⁻¹ w zależności od gatunku rośliny i stosowanej technologii produkcji (tab. 23). Najwyższe koszty należy ponieść w przypadku likwidacji plantacji wierzby. Warunkowane jest to silniej rozbudowaną u tego gatunku karpą i systemem korzeniowym.

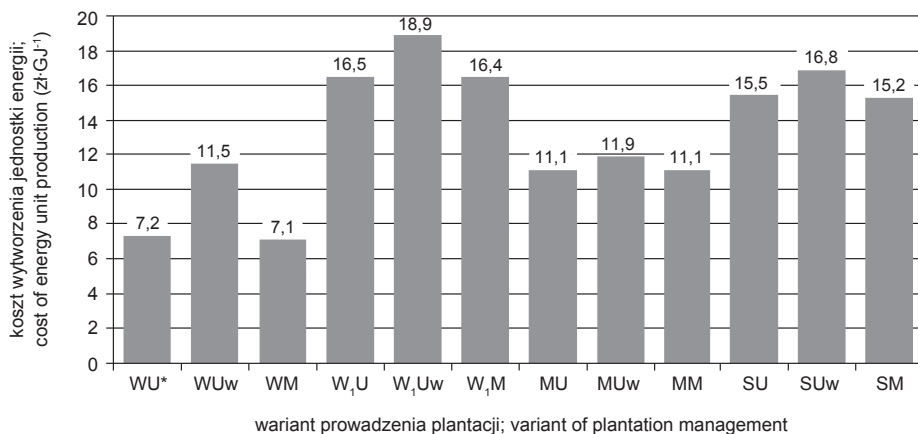
Porównanie kosztów prowadzenia plantacji badanych gatunków roślin energetycznych w zależności od stosowanej technologii produkcji wskazuje, że prowadzenie ich uprawy z dużymi nakładami pracy ręcznej nie znajduje uzasadnienia ekonomicznego.



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 8. Koszty zbioru w zależności od gatunku rośliny i technologii produkcji
Costs of harvest depending on the plant species and the technology of production

Koszty wytworzenia jednostki energii (zł·GJ⁻¹) w biomase zależą głównie od gatunku rośliny, a w przypadku wierzby również od technologii produkcji. Najwyższe koszty jednostkowe wytworzenia energii wiążą się z uprawą ślazuwca pensylwańskiego i wierzby zbieranej co roku (rys. 9).



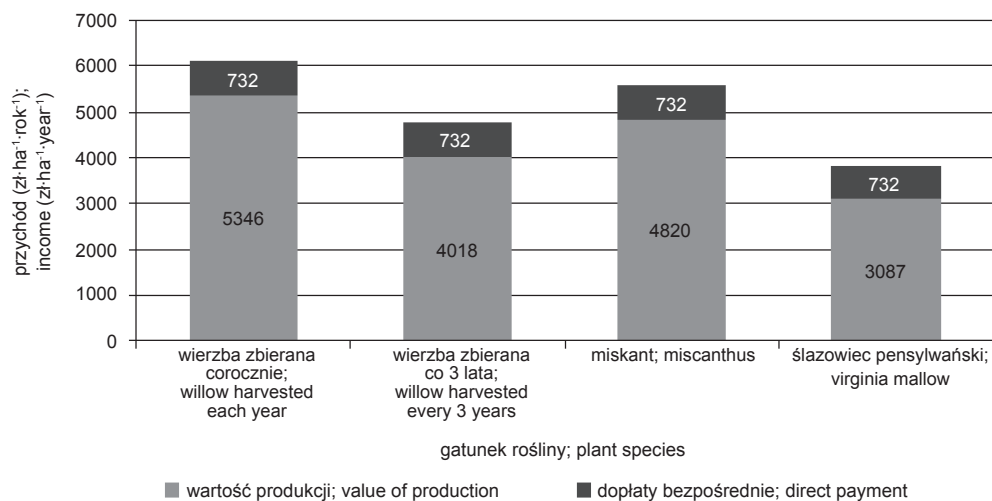
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 9. Koszty wytworzenia jednostki energii w biomase w zależności od gatunku rośliny i technologii produkcji
Costs of energy unit production in biomass depending on the plant species and the technology of production

Natomiast najniższą wartością tego wskaźnika charakteryzuje się uprawa wierzby w technologii w pełni zmechanizowanej zbieranej w cyklu trzyletnim. Koszt jednostkowy wytworzenia energii w uprawie miskanta kształtuje się na zbliżonym poziomie do oszacowanego w przypadku wierzby uprawianej w technologii z większymi nakładami pracy ręcznej i zbieranej w cyklu trzyletnim.

Przychody związane z uprawą roślin na cele energetyczne zależą zarówno od wartości produkcji, jak i pozyskania dopłat w formie jednolitej płatności obszarowej (rys. 10). Wartość produkcji jest natomiast bezpośrednią pochodną uzyskiwanych plonów. Zaznaczyć należy, że poziom plonów przyjęty do analizy jest o 30% niższy od osiąganego w doświadczeniach własnych prowadzonych na glebie kompleksu 8. Spośród porównywanych roślin najwyższe przychody, wynoszące około 6,1 tys. zł·ha⁻¹, można otrzymać z uprawy wierzby krzewiastej zbieranej w cyklu trzyletnim (rys. 10). W porównaniu z wierzbą zbieraną corocznie są one wyższe o 28%, co jest warunkowane poziomem plonów. Przychody z tytułu uprawy wierzby zbieranej co 3 lata są także wyższe o 13% niż w przypadku miskanta i o 59% niż ślazuwca pensylwańskiego. Przychody z uprawy miskanta wynoszą od 5,5 do 6,1 tys. zł·ha⁻¹ i są wyższe o 41% w porównaniu ze ślazuwcem pensylwańskim. Główną składową struktury przychodu stanowi wartość produkcji. Udział dopłat w zależności od gatunku i stosowanej technologii produkcji wynosił 12–19%.

Pełną ocenę efektywności ekonomicznej umożliwia porównanie uzyskanych przychodów z kosztami produkcji (rys. 10 i tab. 24).



Rys. 10. Przychód z produkcji biomasy i dopłat bezpośrednich do roślin energetycznych
Income from production of biomass and direct payments for energy plants

Tabela 24

Efektywność ekonomiczna uprawy roślin na cele energetyczne
Economic efficiency of plants cultivation for energy purposes

Wyszczególnienie; Specification		Zysk; Profit		Opłacalność produkcji; Profitability of production (%)
		zł·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹ ; zł·ha ⁻¹ ·year ⁻¹	zł·t s.m. ⁻¹ ·rok ⁻¹ ; zł·t DM ⁻¹ year ⁻¹	
Gatunek rośliny i system jej uprawy; Species of plant and system of cultivation	WU*	3302	200	254
	WUw	2042	124	160
	WM	3340	202	258
	W ₁ U	600	48	116
	W ₁ Uw	63	5	101
	W ₁ M	613	49	117
	MU	1968	133	168
	MUw	1767	119	157
	MM	1975	134	169
	SU	805	80	130
	SUw	568	57	120
	SM	844	84	132

* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Źródło: Opracowanie własne; Source: Own study

Wyniki wskazują, że uprawa wszystkich porównywanych gatunków roślin przy zastosowaniu uwzględnionych w analizie technologii jest efektywna ekonomicznie. Wpływ technologii, a w szczególności długości cyklu zbioru, na efektywność ekonomiczną produkcji ma szczególnie duże znaczenie w przypadku wierzby krzewiastej. Przychody z jej uprawy dla cyklu zbioru corocznego przewyższają koszty produkcji jedynie o 1–17%, gdy dla cyklu zbioru co 3 lata różnica ta wynosi 60–158%.

Niską efektywnością ekonomiczną, niezależnie od stosowanej technologii produkcji, charakteryzuje się uprawa ślazuca pensylwańskiego. Najwyższą efektywnością ekonomiczną cechuje się uprawa wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim i technologii w pełni zmechanizowanej. Opłacalność uprawy miskanta jest również wysoka i w zależności od stosowanej technologii wynosi 157–169%.

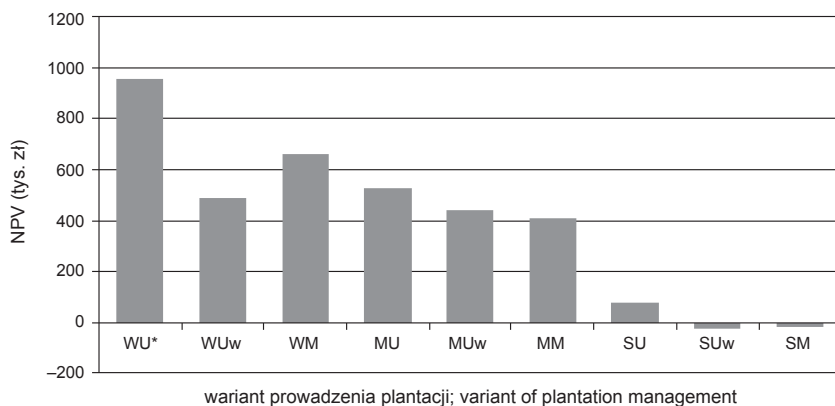
Metody dyskontowe oceny opłacalności przedsięwzięć inwestycyjnych są bardzo często wykorzystywane w zarządzaniu finansami przedsiębiorstw. W rolnictwie jak na razie nie znalazły one szerszego zastosowania, co uwarunkowane jest głównie krótkim cyklem produkcyjnym (na ogół jeden rok). Jednak zakładanie plantacji trwałych z przeznaczeniem na cele energetyczne jest przedsięwzięciem inwestycyjnym zgoła odmiennym od typowej produkcji rolniczej. Wiąże się ono ze znacznymi nakładami początkowymi, a okres użytkowania plantacji trwa co najmniej kilkanaście lat. W związku z tym w pracy podjęto próbę zaadoptowania metod wykorzystywanych przez inne branże do dyskontowej oceny efektywności inwestycji w formie plantacji trwałych wierzby, miskanta i ślazuca pensylwańskiego.

Wskaźnik wartości bieżącej netto (NPV) umożliwia sprowadzenie do aktualnej wartości, za pomocą wyznaczonej stopy dyskontowej, przyszłych przepływów pieniężnych. Za korzystne uważa się wszystkie te inwestycje, przy których kwota zdyskontowanych przepływów pieniężnych pokrywa co najmniej niezbędne nakłady inwestycyjne. W sytuacji, gdy wszystkie rozpatrywane warianty projektów inwestycyjnych cechują się dodatnim wskaźnikiem NPV, do realizacji akceptuje się ten wariant przedsięwzięcia, który dla tej samej wartości nakładów inwestycyjnych tworzy największą wartość aktualną netto. Innymi słowy, w wyborze najlepszego wariantu inwestycyjnego posługujemy się kryterium maksymalizacji miernika NPV, gdyż tylko takie przedsięwzięcie w największym stopniu zwiększa wartość przedsiębiorstwa. Podstawową zaletą wskaźnika NPV jest to, że umożliwia uwzględnianie w analizie opłacalności inwestycji zmiennej wartości pieniądza w czasie. Uważa się, że wskaźnik ten najlepiej opisuje możliwości firmy (gospodarstwa) do realizacji strategii wzrostu wartości (Szczepankowski 2012).

Analiza wykazała, że wartość wskaźnika NPV dla danego gatunku rośliny i technologii produkcji jest bezpośrednio związana z powierzchnią plantacji, która w przyjętych wariantach obszarowych wynosiła odpowiednio: 25, 50, 100, 200, 400 i 800 ha (rys. 11–16). Względny przyrost wartości wskaźnika NPV w każdym z analizowanych wariantów jest wyższy niż wzrost powierzchni plantacji. Wskazuje to wyraźnie, że zwiększanie powierzchni plantacji skutkuje poprawą efektywności ekonomicznej warunkowaną „efektem skali”. Dotyczy to szczególnie wariantu technologii z wykorzystaniem maszyn własnych. Na tej podstawie można stwierdzić, że zakup maszyn wyłącznie do prowadzenia plantacji trwałych roślin na cele energetyczne jest uzasadniony ekonomicznie jedynie przy większej ich powierzchni. Porównanie efektywności ekonomicznej inwestycji przy usługowym korzystaniu z maszyn i wykorzystaniu maszyn własnych wskazuje, że zakup maszyn do obsługi plantacji wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim może mieć częściowe uzasadnienie przy powierzchni ponad 200 ha (rys. 14). Natomiast dla miskanta olbrzymiego i ślazuwca pensylwańskiego wariant ten jest uzasadniony ekonomicznie już przy powierzchni 50 ha. Wynika to głównie z faktu, że w uprawie tych gatunków można wykorzystać typowe i tańsze maszyny rolnicze, natomiast do zakładania i zbioru plantacji wierzby niezbędne jest specjalistyczne i w efekcie drogie umaszynowanie. Efektywność ekonomiczną zakupu specjalistycznych maszyn do prowadzenia plantacji wierzby może poprawić ich coroczne wykorzystanie poprzez podział docelowej powierzchni plantacji na 3 parcele zakładane i zbierane sukcesywnie w okresie 3 lat. Przedstawione wyniki wskazują, że każda z tych parcel powinna mieć powierzchnię co najmniej 200 ha. Dodatkowym rozwiązaniem umożliwiającym poprawę efektywności wykorzystania maszyn jest świadczenie usług innym podmiotom i gospodarstwom.

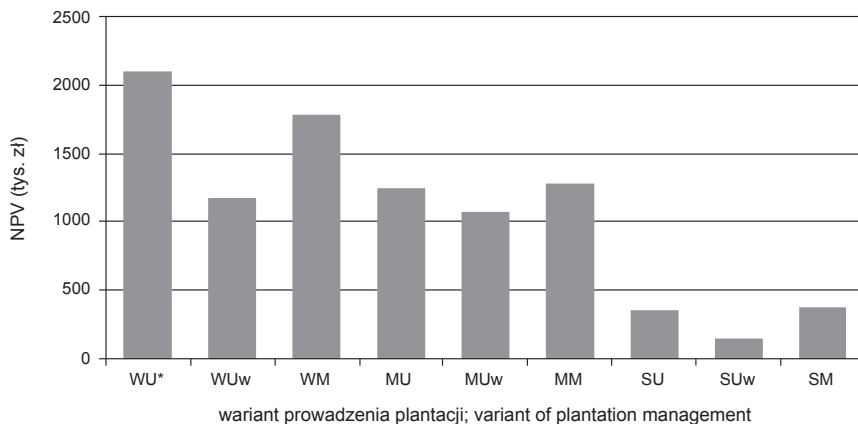
Najwyższą wartością wskaźnika NPV niezależnie od wielkości plantacji cechuje się uprawa wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim i technologii produkcji w pełni zmechanizowanej. Uprawa wierzby w technologii z większymi nakładami pracy

ręcznej skutkuje generowaniem niemal dwukrotnie mniejszej wartości nadwyżek pieniężnych, co wiąże się z kosztami opłaty pracy. Najniższą wartość zdyskontowanych nadwyżek pieniężnych generuje natomiast uprawa ślazuwca pensylwańskiego, która przy powierzchni 25 ha i większych nakładach pracy lub wykorzystaniu maszyn własnych jest nieopłacalna. Uprawa miskanta przy mniejszej powierzchni plantacji jest niemal dwukrotnie mniej efektywna ekonomicznie niż uprawa wierzby w technologii produkcji w pełni zmechanizowanej. Jednak wraz ze wzrostem powierzchni plantacji różnica ta ulega zmniejszeniu, a dla plantacji o powierzchni 800 ha wynosi 25%.



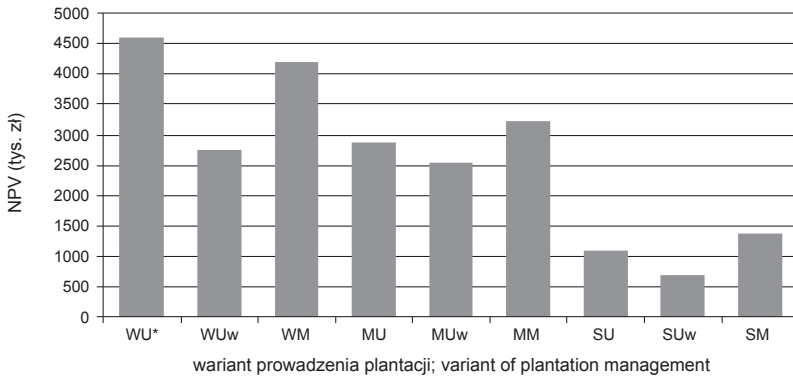
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 11. Wartość wskaźnika NPV dla plantacji o powierzchni 25 ha
Value of NPV indicator for the plantation of 25 ha area



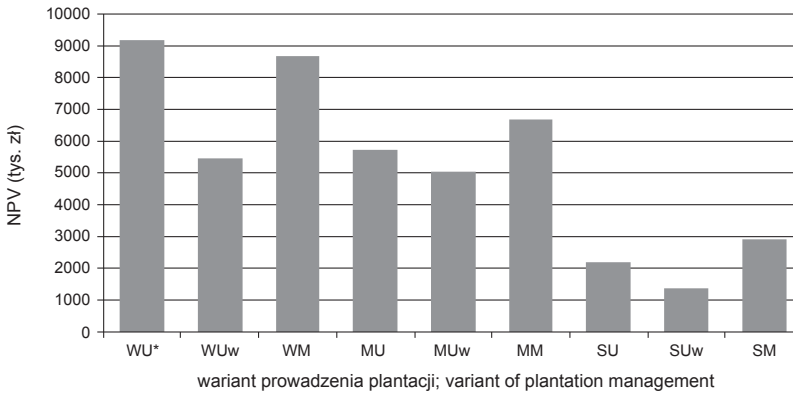
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 12. Wartość wskaźnika NPV dla plantacji o powierzchni 50 ha
Value of NPV indicator for the plantation of 50 ha area



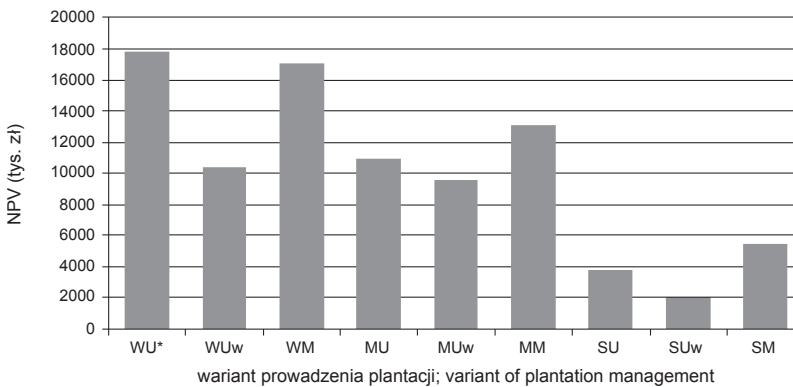
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 13. Wartość wskaźnika NPV dla plantacji o powierzchni 100 ha
Value of NPV indicator for the plantation of 100 ha area



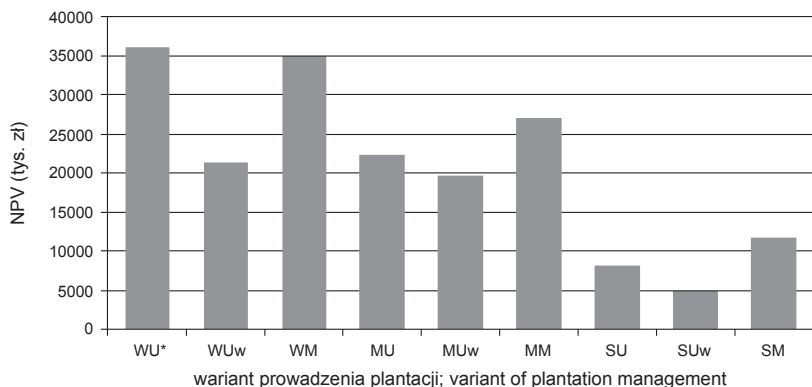
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 14. Wartość wskaźnika NPV dla plantacji o powierzchni 200 ha
Value of NPV indicator for the plantation of 200 ha area



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 15. Wartość wskaźnika NPV dla plantacji o powierzchni 400 ha
Value of NPV indicator for the plantation of 400 ha area



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

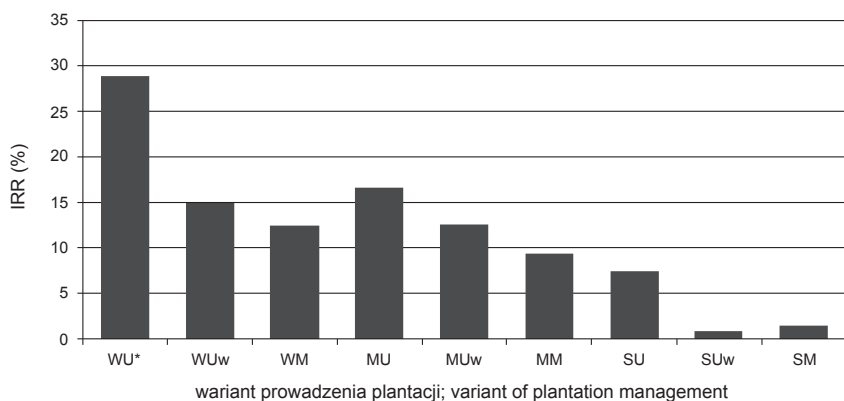
Rys. 16. Wartość wskaźnika NPV dla plantacji o powierzchni 800 ha
Value of NPV indicator for the plantation of 800 ha area

Wskaźnik wewnętrznej stopy zwrotu z inwestycji (IRR) pozwala na ocenę jej rentowności poprzez określenie rzeczywistej stopy zwrotu z inwestycji. Pośrednio pozwala również na określenie maksymalnej stopy procentowej kredytu inwestycyjnego, która umożliwi jego sfinansowanie bez generowania strat. Dzięki temu możliwy jest wybór, przy pomocy obiektywnych kryteriów, najlepszego z możliwych wariantu inwestycji (Szczepankowski 2012).

Analiza wykazała, że wartość wskaźnika IRR jest w znacznym stopniu zróżnicowana zarówno pomiędzy gatunkami roślin, technologią produkcji, jak i wielkością plantacji (rys. 17–22). Najwyższą rentownością spośród wszystkich porównywanych wariantów charakteryzowała się uprawa wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim i technologii produkcji w pełni zmechanizowanej z usługowym wykorzystaniem maszyn. Najniższa rentowność wiąże się natomiast z uprawą ślazuwca pensylwańskiego przy zwiększonych nakładach pracy ręcznej. Wyniki badań wskazują, że wraz ze wzrostem powierzchni plantacji jej rentowność niezależnie od gatunku rośliny i technologii produkcji ulega zwiększeniu. Największy wzrost rentowności zaobserwowano pomiędzy powiększeniem powierzchni plantacji z 25 do 100 ha, szczególnie dla najmniej efektywnych wariantów prowadzenia plantacji. W przypadku wierzby, miskanta olbrzymiego i ślazuwca pensylwańskiego uprawianych w technologii produkcji w pełni zmechanizowanej przy usługowym wykorzystaniu maszyn następuje niewielki spadek rentowności pomiędzy plantacjami o powierzchni 100–200 ha a 400–800 ha. Wiązać się to może z uwzględnieniem w złożonym modelu wskaźnika IRR również ryzyka produkcyjnego, które wraz z wzrostem wartości przepływów pieniężnych ulega zwiększeniu.

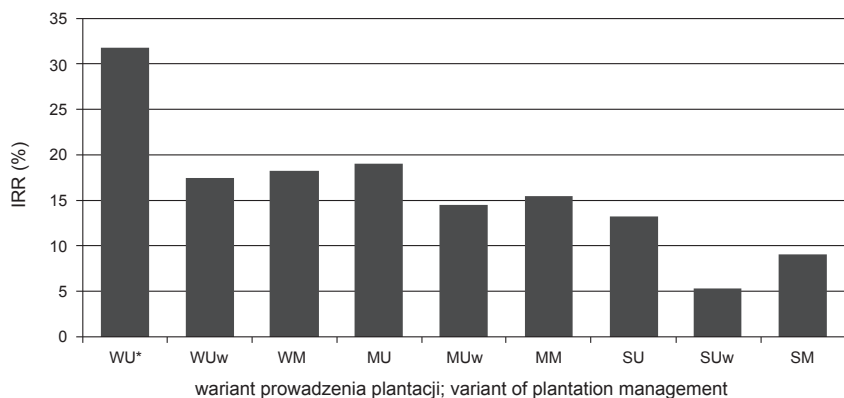
Pokrycie kosztów kapitału wyrażonego wartością średniej stopy kredytu inwestycyjnego (14%) dla plantacji o powierzchni 25 ha możliwe jest tylko w przypadku wierzby i miskanta uprawianego w technologii produkcji w pełni zmechanizowanej przy usługowym wykorzystaniu maszyn. Należy jednak podkreślić, że margines

bezpieczeństwa dla miskańta jest niewielki i wynosi jedynie 3%. Wraz ze wzrostem powierzchni plantacji liczba gatunków roślin i wariantów technologii produkcji spełniających ten warunek ulega zwiększeniu. Dla plantacji o powierzchni ≥ 100 ha kosztów kapitału nie pokrywa tylko uprawa ślazuowca pensylwańskiego w technologii produkcji z większymi nakładami pracy ręcznej. W przypadku miskańta uprawianego w tej technologii pomimo spełnienia kryterium niewielki margines bezpieczeństwa (3%) wskazuje na brak pewności co do osiągnięcia pełnej rentowności kapitału.



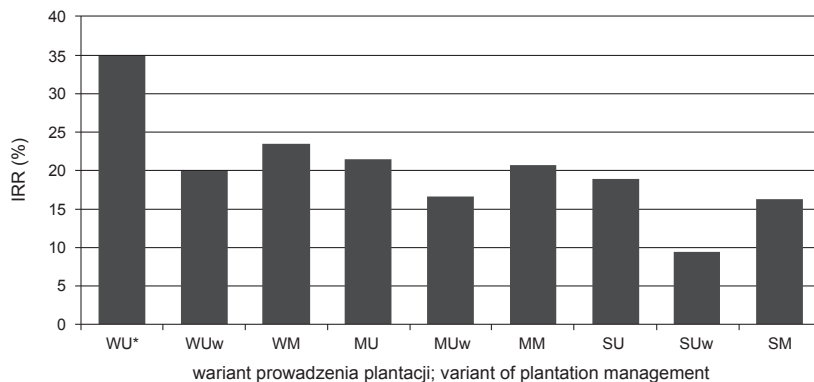
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 17. Wartość wskaźnika IRR dla plantacji o powierzchni 25 ha
Value of IRR indicator for the plantation of 25 ha area



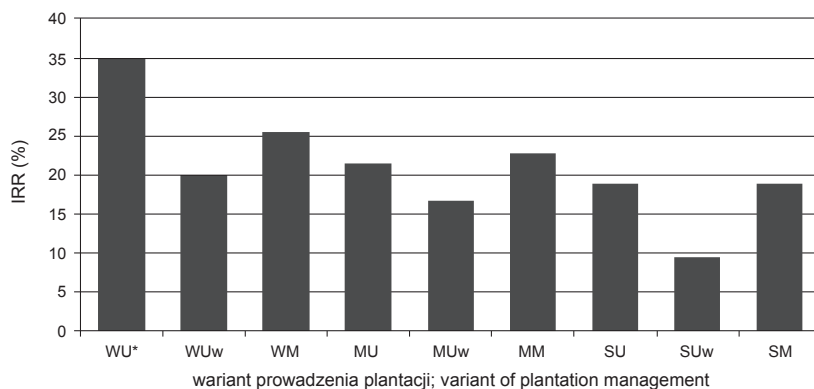
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 18. Wartość wskaźnika IRR dla plantacji o powierzchni 50 ha
Value of IRR indicator for the plantation of 50 ha area



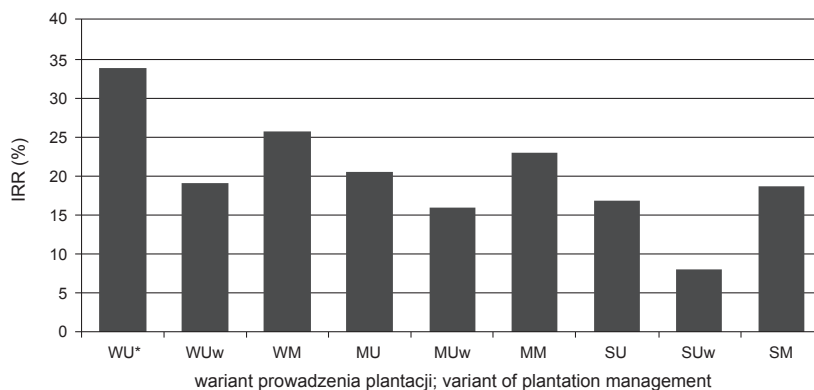
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 19. Wartość wskaźnika IRR dla plantacji o powierzchni 100 ha
Value of IRR indicator for the plantation of 100 ha area



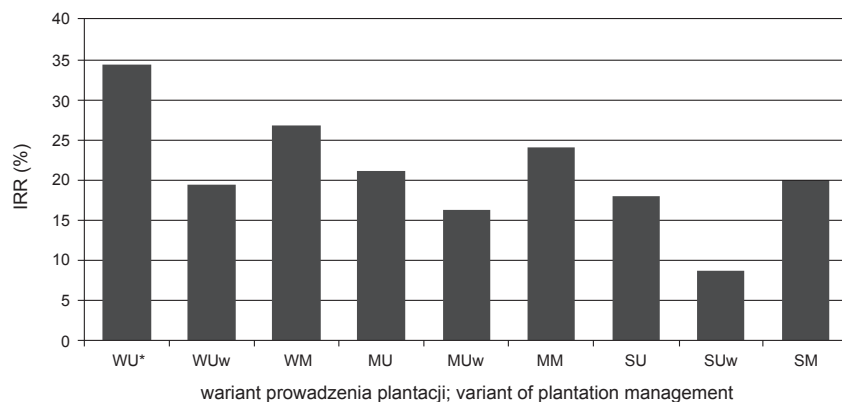
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 20. Wartość wskaźnika IRR dla plantacji o powierzchni 200 ha
Value of IRR indicator for the plantation of 200 ha area



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 21. Wartość wskaźnika IRR dla plantacji o powierzchni 400 ha
Value of IRR indicator for the plantation of 400 ha area



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 22. Wartość wskaźnika IRR dla plantacji o powierzchni 800 ha
Value of IRR indicator for the plantation of 800 ha area

Z badań Stolarskiego (2009) wynika, że koszt założenia i prowadzenia w pierwszym roku plantacji wierzby dla obsady 12 tys. roślin·ha⁻¹ wynosił 3522 zł·ha⁻¹. Ulegał on zwiększeniu wraz ze wzrostem gęstości sadzenia: dla obsady 24 tys. roślin·ha⁻¹ wynosił 5735 zł·ha⁻¹, a dla 48 roślin·ha⁻¹ – 10159 zł·ha⁻¹. Przedstawione wyniki są zbliżone do uzyskanych w badaniach własnych. Również analiza struktury kosztów założenia plantacji wskazuje, że największy odsetek stanowiły sadzonki (Stolarski 2009). Bieżące koszty prowadzenia plantacji w zależności od obsady roślin wynosiły natomiast 1551–1823 zł·ha⁻¹. Najwyższą wartość nadwyżki bezpośredniej *loco* plantacja (3026 zł·ha⁻¹) dla ceny 15 zł·GJ⁻¹ energii zawartej w zrębkach z uprawy wierzby uzyskano przy obsadzie 24 tys. roślin·ha⁻¹ i zbiorze co 3 lata. Przedstawione w pracy koszty likwidacji plantacji wierzby w zakresie 1348–1431 zł·ha⁻¹ są niższe niż oszacowane w innych opracowaniach, gdzie wynosiły 2076–2500 zł·ha⁻¹ (Stolarski i in. 2008b, Stolarski 2009).

Badania nad opłacalnością uprawy wierzby prowadzone są w wielu krajach, jednak, jak wskazuje przegląd przygotowany przez El Kasmioi i Ceulemans (2012), zróżnicowanie uzyskanych wyników jest znaczne (tab. 25). Przytoczone za Ericsson i in. (2006) dane wskazują, że koszty te spośród porównywanych krajów są najniższe w Polsce. Autorzy tłumaczą to niższymi kosztami pracy, paliwa i nawożenia. Należy jednak wskazać, że w obecnych warunkach rynkowych teza ta jest wysoce nieuprawniona i nie może być upowszechniana. W badaniach własnych koszty produkcji jednostki energii w biomase wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim i technologii w pełni zmechanizowanej są także niskie i wynoszą nieco ponad 7 zł·GJ⁻¹. Należy jednak wziąć pod uwagę, że plon suchej masy (16,5 t·ha⁻¹·rok⁻¹) przyjęty do analiz jest niemal dwukrotnie wyższy niż w badaniach Ericssona i in. (2006). Przypuszczać można, że w warunkach produkcyjnych osiągnięcie tak wysokich plonów wierzby może być utrudnione ze względu na mniej staranną agrotechnikę niż w doświadczeniach. W związku z tym należy w sposób bardzo ostrożny podchodzić do

bezpośredniego przenoszenia uzyskanych wyników do praktyki rolniczej i opieraniu na nich polityki kreowania cen biomasy przez jej odbiorców.

Tabela 25

Zróznicowanie kosztów wytworzenia jednostki energii w biomasie wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim
Diversity of production costs of energy unit in willow biomass harvested in every 3 years cycle

Kraj; Country	Plon (t s.m.·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Yield (t DM·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	Okres użytkowania plantacji (lat); Time of plantation utilization (years)	Koszt*; Cost* (€·GJ ⁻¹)	Koszt**; Cost** (zł·GJ ⁻¹)
Belgia; Belgium	12,0	26,0	3,97	16,3
Chile	10,0–25,0	15,0	3,5–4,4	14,4–18,0
Irlandia; Ireland	8,8–12,0	23,0–25,0	1,7–3,4	7,0–13,9
USA	11,2–14,8	22,0	1,5–3,3	6,2–13,5
UE	9,0	22,0	4,0–5,0	16,4–20,5
Polska; Poland	9,0	1,4	1,4	5,7

* Wartość opałowa biomasy 19,1 GJ·t⁻¹ s.m.; Calorific value of the biomass 19,1 GJ·t⁻¹ DM

** 1 € = 4,1 zł

Źródło: El Kasmoui i Ceulemans 2012; Source: El Kasmoui and Ceulemans 2012

Wskaźniki NPV i IRR były wykorzystywane przez kilku zagranicznych autorów do dyskontowej oceny efektywności inwestycji w odniesieniu do plantacji wieloletnich roślin uprawianych na cele energetyczne (Kuemmel i in. 1998, Goor i in. 2000, Vandenhove i in. 2002, Tharakan i in. 2005, Bell i in. 2007).

Pawlak (2010) wykazał, podobnie jak w badaniach własnych, że wraz ze wzrostem powierzchni plantacji wierzby i poziomu mechanizacji koszty wykonania prac ulegają zmniejszeniu i wzrasta efektywność produkcji. Ponadto autor ten udowodnił, że wykonanie prac w technologii z większymi nakładami pracy ręcznej na plantacji ≥ 50 ha jest niższe o 9% w przeliczeniu na 1 ha niż na plantacji o powierzchni 0,5 ha. Różnica ta dla technologii produkcji w pełni zmechanizowanej jest znacznie wyższa i wynosi 25%.

Dostępne analizy wskazują, że koszty produkcji roślin ligninocelulozowych w Europie Centralnej i Wschodniej będą wynosić poniżej 2,5 €·GJ⁻¹, a nawet <2 €·GJ⁻¹ (de Witt i Faaij 2010). Natomiast w pozostałych częściach Europy kształtować się będą na poziomie od 2,5 €·GJ⁻¹ do nawet >4,5 €·GJ⁻¹.

Muzalewski (2010a) w badaniach terenowych wykazał, że koszty uprawy miśskanta olbrzymiego na plantacjach o powierzchniach 5 i 20 ha wynoszą odpowiednio: 2377 i 2426 zł·ha⁻¹, natomiast wartość produkcji (bez dopłat bezpośrednich): 3120 i 3306 zł·ha⁻¹. W efekcie zysk z jednostki powierzchni (zł·ha⁻¹·rok⁻¹) łącznie z dopłatami bezpośrednimi wynosił 1250 zł·ha⁻¹ dla plantacji o powierzchni 5 ha

i 1387 zł·ha⁻¹ dla plantacji o powierzchni 20 ha. Znaczne zróżnicowanie efektów ekonomicznych w stosunku do badań własnych należy tłumaczyć różnicami w przyjętych do analiz założeniach, głównie dotyczących poziomu plonów i cen biomasy. Ericsson i in. (2009) szacują koszty produkcji jednostki energii w biomasie wynikające z założenia i bieżącej eksploatacji plantacji na 2,8–3,2 €·GJ⁻¹. Całość kosztów, łącznie z przechowywaniem, transportem drogowym, premią za ryzyko i kosztami zarządzania kształtuje się na poziomie 5–7 €·GJ⁻¹. Styles i in. (2008) określili zdyskontowane roczne koszty produkcji miskanta w zależności od technologii produkcji na poziomie 430–559 €·ha⁻¹, co w odniesieniu do jednostki produktu waha się w granicach 37–48 €·t s.m.⁻¹. Według Krasuskiej i Rosenqvista (2012), koszty założenia plantacji miskanta wynoszą 1671 €·ha⁻¹, czyli mniej niż w badaniach własnych. Również wynik ekonomiczny uprawy miskanta jest inny niż określony w pracy własnej, ponieważ działalność ta ma przynosić straty na poziomie –32 €·ha⁻¹. Wynik obliczeń może być w dużej mierze uwarunkowany niską ceną biomasy przyjętą do kalkulacji, na poziomie 3,17 €·GJ⁻¹.

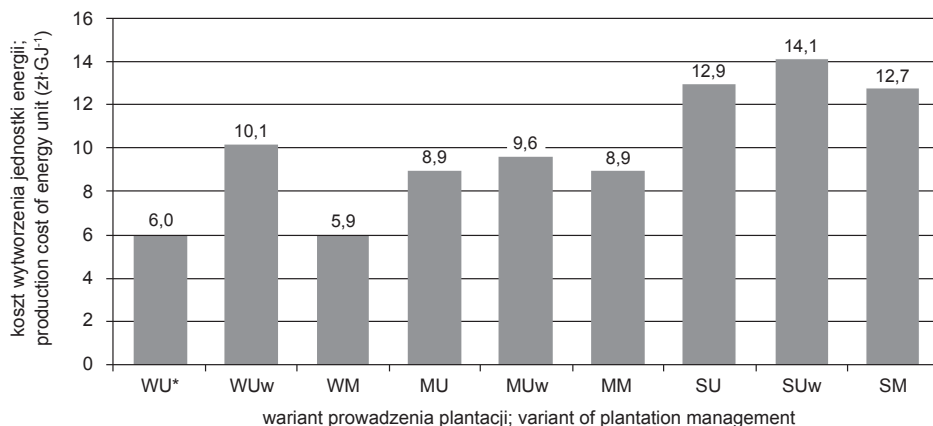
W innych badaniach wartość produkcji biomasy ślazuwca pensylwańskiego w zależności od wielkości plantacji wynosiła 2594–2843 zł·ha⁻¹ (Muzalewski 2010a). Koszty produkcji wahały się zaś w granicach 2192–2499 zł·ha⁻¹, a zysk z jednostki powierzchni łącznie z dopłatami bezpośrednimi wynosił 851–909 zł·ha⁻¹·rok⁻¹. Przedstawione wyniki są zbliżone do uzyskanych w badaniach własnych.

4.3.1. Możliwości poprawy efektywności ekonomicznej produkcji biomasy

Aktywność gospodarcza, również w rolnictwie, zorientowana jest głównie na maksymalizację dochodu. Cel ten można realizować poprzez racjonalne działanie przejawiające się maksymalizacją efektów lub minimalizacją poniesionych nakładów (Bórawski i Pawlewicz 2006). Poprawa efektywności ekonomicznej uprawy roślin na cele energetyczne może być warunkowana zarówno przez czynniki makroekonomiczne, jak i mikroekonomiczne. Do pierwszych z nich zalicza się głównie uwarunkowania rynku OZE wynikające z obowiązujących regulacji prawnych. Wprowadzenie i rozszerzanie w UE wymogów związanych z wykorzystaniem paliw odnawialnych stworzyło ciągle zwiększający się popyt na biomasę. Biorąc pod uwagę ograniczoność podaży biomasy wynikającą z limitowanych zasobów ziemi, należy zakładać, że jej cena w perspektywie najbliższych lat może ulec zwiększeniu. Poprawę efektywności ekonomicznej produkcji biomasy w gospodarstwie można realizować poprzez zwiększenie poziomu uzyskiwanych plonów i obniżenie kosztów produkcji.

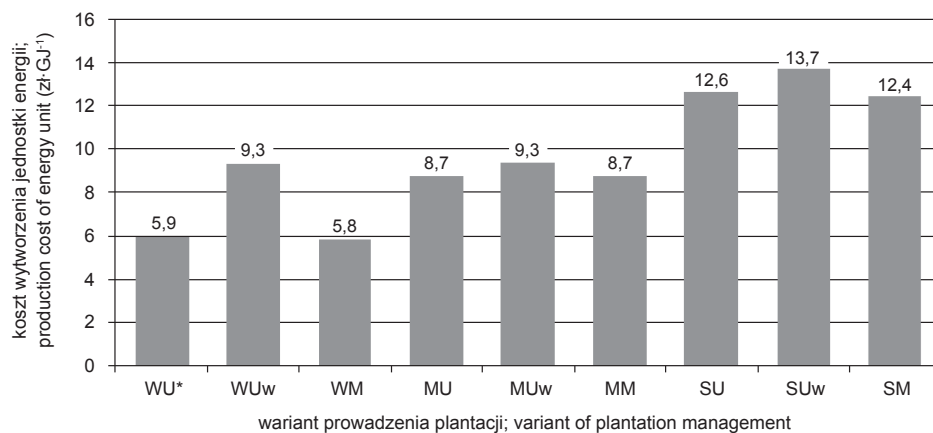
W związku z tym w pracy przedstawiono i porównano konsekwencje ekonomiczne realizacji 3 scenariuszy poprawy efektywności produkcji biomasy. Wzrost plonów biomasy o 20% pozwala na zmniejszenie nakładów finansowych na wytworzenie GJ energii o 13–17% (rys. 23 i 24). Natomiast obniżenie kosztów produkcji o 20% skutkuje zmniejszeniem nakładów o 18–19%. Wzrost plonów w najmniej

szym stopniu (13%) wpływa na zmniejszenie nakładów w uprawie wierzby według technologii produkcji z większymi nakładami pracy ręcznej. Wdrażanie scenariusza z 20% wzrostem cen biomasy niesie za sobą analogiczne efekty ekonomiczne jak dla wzrostu plonów o 20%. Znajduje to również odzwierciedlenie w wartości innych wskaźników.



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 23. Koszty wytworzenia jednostki energii w biomase przy wzroście plonów roślin o 20%
Production costs of energy unit in biomass with increasing plant yields by 20%



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 24. Koszty wytworzenia jednostki energii w biomase przy zmniejszeniu kosztów produkcji o 20%
Production costs of energy unit in biomass while reducing production costs by 20%

Wdrażanie poszczególnych scenariuszy skutkuje największym względnym wzrostem zysku zarówno w przeliczeniu na 1 ha, jak i 1 t s.m. w uprawie ślazuwca pensylwańskiego niezależnie od stosowanej technologii produkcji (tab. 26). Najbardziej

skutecznym sposobem zwiększenia zysku z jednostki powierzchni ($\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$) jest zarówno wzrost plonów, jak i cen biomasy, przy czym obniżenie kosztów produkcji przynosi mniejsze efekty. Natomiast w odniesieniu do jednostki produktu ($\text{zł}\cdot\text{t s.m.}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$) największą poprawę efektywności powoduje wzrost cen biomasy, najmniejszą natomiast wzrost plonów. Wartość wskaźnika opłacalności produkcji ulega zdecydowanie największemu wzrostowi w efekcie zmniejszenia kosztów produkcji (tab. 24).

Analiza wpływu wdrażania przyjętych scenariuszy na zmianę wartości bieżącej netto (NPV) inwestycji wykazała, że wzrost plonów i cen biomasy generuje wyższe nadwyżki przepływów finansowych niż obniżenie kosztów produkcji (rys. 13 i 25–27).

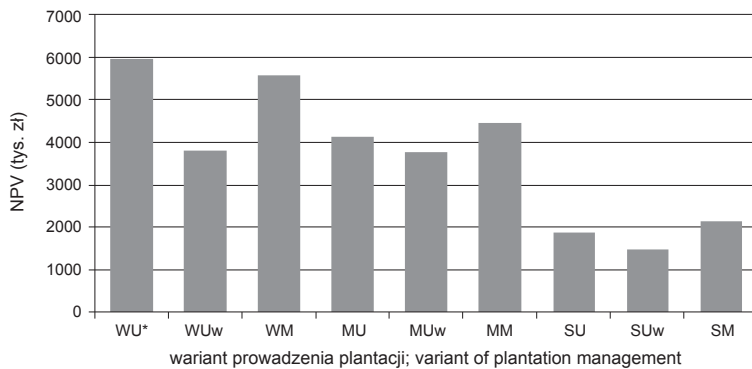
Tabela 26

Zmiany efektywności ekonomicznej uprawy roślin na cele energetyczne w zależności od przyjętego scenariusza
Changes in economic efficiency of plants cultivation for energy purposes depending on the assumed scenario

Wyszczególnienie; Specification		Gatunek i system uprawy; Species of plants and system of cultivation								
		WU*	WUw	WM	MU	MUw	MM	SU	SUw	SM
Scenariusz 1; Scenario 1		wzrost plonów o 20%; increasing plant yields by 20%								
Zysk/strata; Profit/loss	$\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$; $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$	4246	2779	4284	2965	2764	2971	1336	1099	1374
	$\text{zł}\cdot\text{t s.m.}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$; $\text{zł}\cdot\text{t DM}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$	214	140	216	161	150	162	111	92	115
Opłacalność produkcji; Profitability of production (%)		298	177	303	203	190	204	150	138	153
Scenariusz 2; Scenario 2		wzrost cen biomasy o 20%; increasing biomass price by 20%								
Zysk/strata Profit/loss	$\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$; $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$	4246	2985	4284	2960	2759	2967	1350	1113	1388
	$\text{zł}\cdot\text{t s.m.}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$; $\text{zł}\cdot\text{t DM}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$	257	181	260	193	180	194	135	111	138
Opłacalność produkcji; Profitability of production (%)		298	188	303	203	190	203	151	139	153
Scenariusz 3; Scenario 3		zmniejszenie kosztów produkcji o 20%; reducing production costs by 20%								
Zysk/strata; Profit/loss	$\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$; $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$	3693	2684	3723	2646	2485	2651	1296	1106	1327
	$\text{zł}\cdot\text{t s.m.}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$; $\text{zł}\cdot\text{t DM}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$	224	163	226	173	162	173	129	110	132
Opłacalność produkcji; Profitability of production (%)		310	197	316	213	199	214	160	147	162

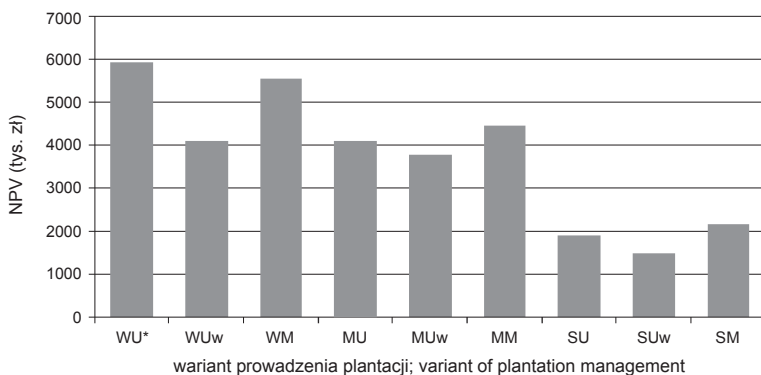
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Źródło: Opracowanie własne; Source: Own study



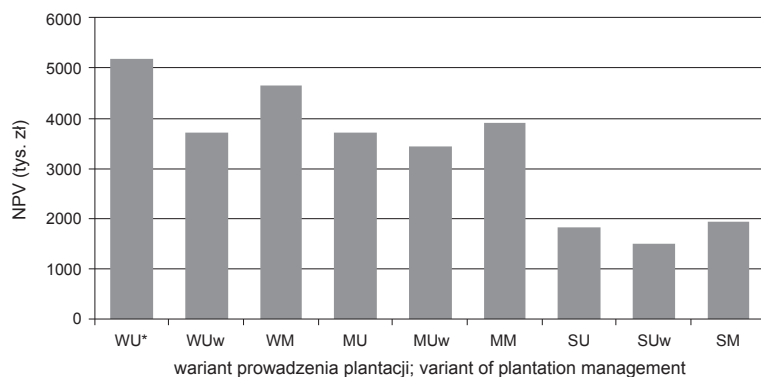
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 25. Wartość wskaźnika NPV przy wzroście plonów o 20%
Value of NPV indicator with increasing plant yields by 20%



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

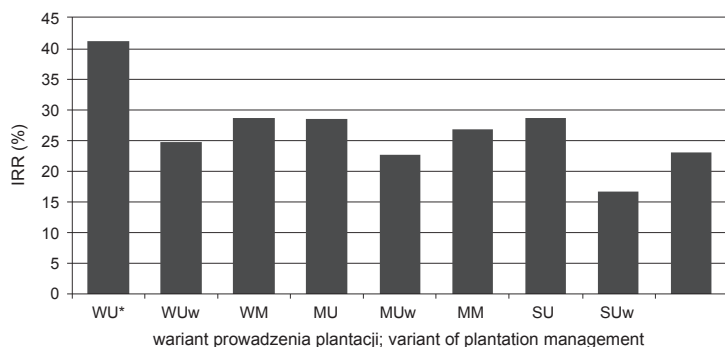
Rys. 26. Wartość wskaźnika NPV przy wzroście cen biomasy o 20%
Value of NPV indicator with increasing biomass prices by 20%



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

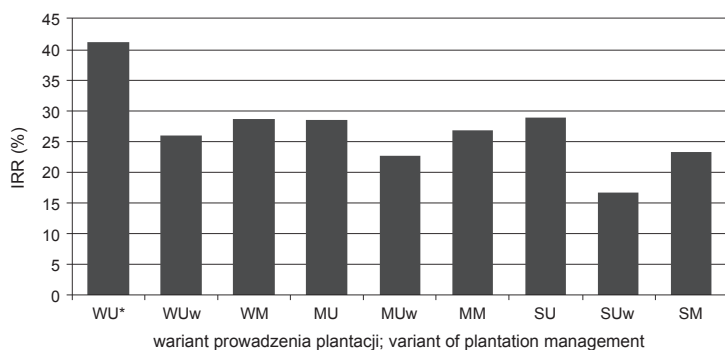
Rys. 27. Wartość wskaźnika NPV przy zmniejszeniu kosztów produkcji o 20%
Value of NPV indicator while reducing production costs by 20%

Zmniejszenie kosztów skutkuje większym wzrostem rzeczywistej stopy zwrotu z inwestycji (IRR), niż ma to miejsce w przypadku wzrostu plonów i cen biomasy (rys. 19 i 28–30).



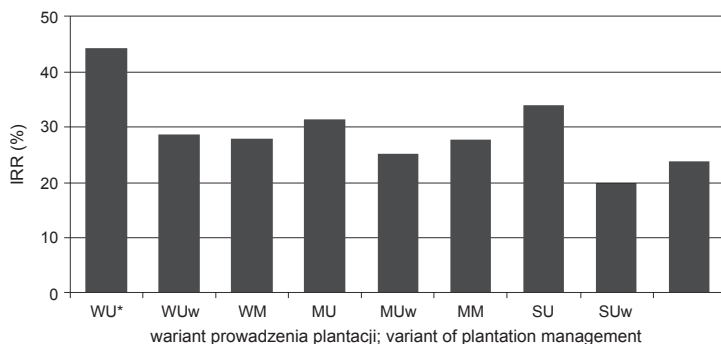
* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 28. Wartość wskaźnika IRR przy wzroście plonów o 20%
Value of IRR indicator at yields increase by 20%



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 29. Wartość wskaźnika IRR przy wzroście cen biomasy o 20%
Value of IRR indicator at biomass prices increase by 20%



* Oznaczenia jak w tabeli 4; Symbols as in table 4

Rys. 30. Wartość wskaźnika IRR przy zmniejszeniu kosztów produkcji o 20%
Value of IRR indicator at reduction of production cost by 20%

Należy podkreślić, że przedstawione scenariusze w praktyce rzadko będą realizowane niezależnie, należy raczej zakładać współdziałanie czynników produkcji. Dzięki temu mogą zaistnieć dodatkowe efekty warunkujące zmiany opłacalności produkcji biomasy na użytkach rolnych.

Podsumowując, można stwierdzić, że wzrost plonów i cen biomasy bardziej efektywnie zwiększa zysk zarówno w przeliczeniu na 1 ha, jak i 1 t s.m. Dotyczy to również wysokości zdyskontowanych nadwyżek finansowych (NPV). Natomiast zmniejszenie kosztów produkcji jest skuteczniejszym sposobem obniżenia nakładów finansowych na jednostkę energii ($\text{zł}\cdot\text{GJ}^{-1}$), bowiem zwiększa opłacalność produkcji i rentowność inwestycji. Podkreślić należy, że obniżenie kosztów produkcji jest działaniem w zdecydowanej mierze uzależnionym od samego producenta, zaś ceny biomasy wynikają z zewnętrznych uwarunkowań rynkowych. Plon biomasy zaś jest w dużym stopniu uzależniony od warunków glebowych i przebiegu pogody. Można więc stwierdzić, że spośród wszystkich zaproponowanych wariantów rozwiązań najbardziej skutecznym sposobem poprawy efektywności ekonomicznej produkcji biomasy jest ograniczanie kosztów. Może ono wynikać głównie z obniżenia kosztów usług specjalistycznych oraz zmniejszenia cen materiału rozmnożeniowego ze względu na potencjalne zwiększenie podaży obydwu z nośników kosztów. Ważnym elementem ograniczania kosztów produkcji biomasy stał się również zastępowanie nawożenia mineralnego jego tańszymi substytutami. Wykorzystać do tego celu można osady ściekowe lub popiół pochodzący ze spalania biomasy w kotłach dedykowanych (Adler i in. 2008, Szczukowski 2012).

4.4. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA PRODUKCJI BIOMASY

Produkcja biomasy na użytkach rolnych oprócz osiągnięcia celów produkcyjnych i ekonomicznych powinna być również efektywna energetycznie. Realizacja tego kryterium warunkuje racjonalność produkcji i osiągnięcie efektów środowiskowych związanych z wytwarzaniem i wykorzystaniem paliw odnawialnych.

Nakłady energetyczne na przygotowanie pola do założenia plantacji trwałej wynoszą $16 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, a ich główną składową stanowi strumień surowców i materiałów.

Spośród porównywanych roślin najwyższe nakłady energetyczne ($16,7 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$) wiążą się z założeniem plantacji wierzby zbieranej w cyklu corocznym (tab. 27). Powodowane jest to w dużej mierze wysoką obsadą roślin. W przypadku pozostałych gatunków roślin oraz wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim nakłady energetyczne na założenie plantacji są niższe i wahają się w granicach $12,4\text{--}14,6 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Największy udział (41–54%) w strukturze zużycia energii na etapie zakładania plantacji, niezależnie od gatunku rośliny, stanowi strumień surowców i materiałów. W grupie tej największy udział mają sadzonki, z wykorzystaniem których wiąże się 42–61% zużycia energii zawartej w materiałach i surowcach niezbędnych do założenia plantacji. Drugi co do udziału strumień energii związanej z zakładaniem plantacji stanowią nośniki bezpośrednie, a najmniejszy (5%) praca żywa.

Tabela 27

Nakłady energetyczne na założenie, eksploatację i likwidację plantacji badanych roślin według strumieni energii
Energy inputs for establishment, exploitation and liquidation of plantation examined plants by energy stream

Wyszczególnienie; Specification		Wierzba – zbiór; Willow – harvest		Miskant; Miscanthus	Ślázowiec pensylwański; Virginia mallow
		co 3 lata; every 3 years	coroczny; each year		
Założenie plantacji; Establishment of plantation (GJ·ha ⁻¹)	bezpośrednie nośniki energii; direct energy carriers	3,45	3,63	3,39	3,91
	surowce i materiały; raw materials	7,88	9,88	6,22	7,57
	w tym sadzonki; including seedlings	4,00	6,00	2,60	4,00
	środki inwestycyjne; investment resources	2,20	2,34	1,94	2,27
	praca żywa; human work	0,83	0,85	0,82	0,89
	RAZEM; TOTAL	14,35	16,70	12,37	14,63
Eksploatacja plantacji (GJ·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹); Exploitation of plantation (GJ·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)	bezpośrednie nośniki energii; direct energy carriers	2,16	4,16	2,89	3,14
	surowce i materiały; raw materials	2,22	6,67	6,41	6,36
	środki inwestycyjne; investment resources	1,37	2,57	2,34	1,88
	praca żywa; human work	0,35	0,85	0,71	0,74
	RAZEM; TOTAL	6,11	14,25	12,35	12,12
Likwidacja plantacji; Liquidation of plantation (GJ·ha ⁻¹)	bezpośrednie nośniki energii; direct energy carriers	2,67	2,67	2,00	2,00
	surowce i materiały; raw materials	1,35	1,35	0,81	0,81
	środki inwestycyjne; investment resources	1,85	1,85	1,39	1,39
	praca żywa; human work	0,56	0,56	0,47	0,47
	RAZEM; TOTAL	6,43	6,43	4,67	4,67
Nakłady ogółem w okresie 17 lat; Total inputs in the period of 17 years (GJ·ha ⁻¹)		116	243	205	205

Źródło: Opracowanie własne; Source: Own study

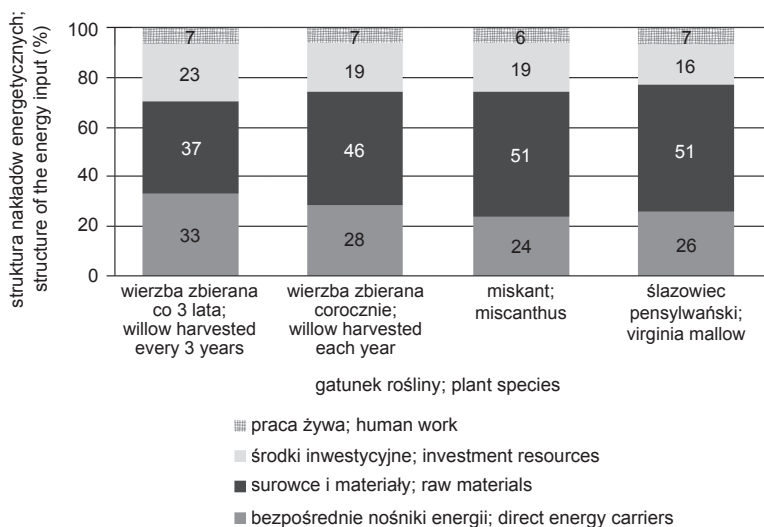
Najniższe nakłady energetyczne na bieżące prowadzenie plantacji wiążą się z uprawą wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim (tab. 27). Natomiast w przypadku miskanta, ślázowca pensylwańskiego i wierzby zbieranej w cyklu corocznym są one około dwukrotnie wyższe. Wynika to głównie z konieczności corocznego stosowa-

nia nawozów mineralnych oraz chemicznego zwalczania chwastów, chorób i szkodników. Zabiegi te w technologii produkcji wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim są zaś wykonywane odpowiednio rzadziej. W trakcie bieżącej eksploatacji plantacji wierzby zbieranej w cyklu co 3 lata porównywalny udział w zużyciu energii mają nośniki bezpośrednie (35%) oraz surowce i materiały (36%). W przypadku wierzby zbieranej corocznie, miskanta i ślázowca pensylwańskiego dominujący udział (47–52%) w zużyciu energii w trakcie użytkowania plantacji mają natomiast surowce i materiały, na które składają się nawozy i środki ochrony roślin. Podobnie jak na etapie zakładania i likwidacji plantacji, również w trakcie jej eksploatacji najmniejsze nakłady energii wynikają z zaangażowania pracy żywej.

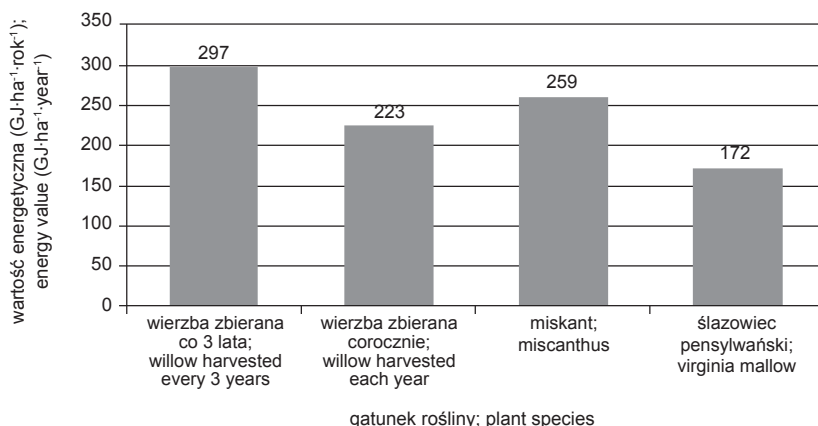
Najwyższe nakłady energetyczne wiążą się z likwidacją plantacji wierzby niezależnie od cyklu zbioru, natomiast dla ślázowca pensylwańskiego i miskanta są niższe o około 28% (tab. 27). Warunkowane jest to większą trwałością karp i systemu korzeniowego wierzby w porównaniu z innymi badanymi gatunkami roślin. Największy udział w strukturze zużycia energii na tym etapie prowadzenia plantacji mają nośniki bezpośrednie (41–43%). Drugi co do udziału strumień nośników energii stanowią natomiast środki inwestycyjne, którymi w przypadku plantacji są maszyny i ciągniki.

Analiza nakładów energetycznych związanych z funkcjonowaniem plantacji badanych gatunków roślin w całym okresie ich użytkowania (17 lat) wykazała, że są one najniższe dla wierzby zbieranej w cyklu co 3 lata ($116 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$) (tab. 27). Najwyższe są natomiast dla wierzby zbieranej w cyklu corocznym ($243 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$). W przypadku plantacji miskanta i ślázowca pensylwańskiego nakłady energetyczne wynoszą $205 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. Dla całego okresu prowadzenia plantacji wierzby zbieranej w cyklu zbioru co 3 lata zbliżony udział w zużyciu energii ma strumień surowców i materiałów (37%) oraz nośników bezpośrednich (33%) (rys. 31). Natomiast dla wierzby zbieranej w cyklu corocznym, miskanta i ślázowca pensylwańskiego dominujący udział (46–51%) mają surowce i materiały. Środki inwestycyjne stanowią 23% w zużyciu energii na plantacji wierzby zbieranej co 3 lata, 19% miskanta i wierzby zbieranej corocznie oraz 16% ślázowca. Niezależnie od gatunku rośliny najmniejsze nakłady energii (6–7%) wiążą się z wykorzystaniem pracy żywej na plantacjach roślin uprawianych na cele energetyczne.

Największą wartością energetyczną plonu charakteryzuje się uprawa wierzby zbieranej w cyklu co 3 lata, zaś w przypadku miskanta wartość ta jest niższa o około 13% (rys. 32). Uprawa wierzby zbieranej w cyklu corocznym cechuje się niżą o 25%, a ślázowca pensylwańskiego o 42% wartością energetyczną plonu w porównaniu z wierzwą zbieraną w cyklu co 3 lata. Analiza wykazała, że w całym okresie funkcjonowania plantacji produkcja energii z ha wierzby zbieranej co 3 lata wynosi 4455 GJ, wierzby zbieranej corocznie – 3348 GJ, miskanta – 3882 GJ, a ślázowca pensylwańskiego – 2573 GJ.

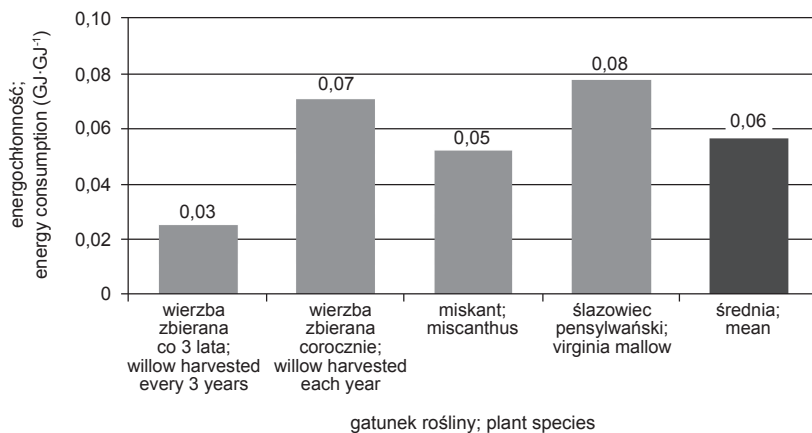


Rys. 31. Struktura nakładów energetycznych dla całego 17 letniego okresu użytkowania plantacji
Structure of the energy input for the entire 17 years period of plantation utilization

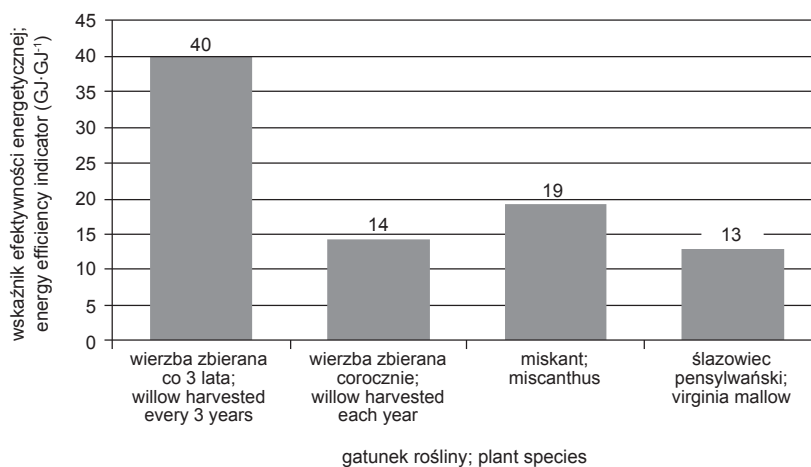


Rys. 32. Wartość energetyczna plonu badanych roślin
Energy value of the examined plants yield

Ocena energochłonności oraz efektywności energetycznej produkcji biomasy wykazała, że wartość tych wskaźników jest korzystna dla wszystkich z badanych gatunków roślin (rys. 33 i 34). Najmniej energochłonna i najbardziej efektywna, *loco* pole, jest produkcja energii w uprawie wierzby zbieranej w cyklu co 3 lata. Najmniej korzystnymi wartościami tych parametrów charakteryzuje się natomiast uprawa ślazo-wca i wierzby zbieranej corocznie. Na wytworzenie 1 GJ energii w biomacie mi-skanta potrzeba zużyć 0,05 GJ energii w całym cyklu produkcyjnym, a wskaźnik efektywności energetycznej dla tego gatunku kształtuje się na poziomie 19.



Rys. 33. Energochłonność (E_e) produkcji biomasy dla poszczególnych gatunków roślin
Energy consumption (E_e) of biomass production for each plant species



Rys. 34. Wskaźnik efektywności energetycznej (E_{epb}) produkcji biomasy dla poszczególnych gatunków roślin
Energy efficiency indicator (E_{epb}) of biomass production for each plant species

Wyniki badań wskazują, że uprawa badanych gatunków roślin może charakteryzować się korzystnymi relacjami wielkości produkcji energii do nakładów poniesionych na jej wytworzenie. Na tej podstawie można stwierdzić, że rolnictwo posiada możliwości racjonalnego i efektywnego z punktu widzenia energetycznego wytwarzania paliw odnawialnych w postaci biomasy stałej. Podkreślić jednak należy, że wyprodukowana na polu biomasa podlega dalszemu procesowi logistycznemu oraz przetwórczemu. W związku z tym kolejne etapy wykorzystania biomasy powinny być zorganizowane w sposób umożliwiający zachowanie maksymalnie dodatniego bilansu energetycznego. W tym celu powinno się ograniczać nakłady energetyczne związane z uszlachetnianiem biomasy w procesie peletowania i brykietowania.

Ważne jest również, aby biomasa była wykorzystywana w warunkach lokalnych, co znacznie ograniczy nakłady energetyczne związane z transportem.

Badania przeprowadzone przez Kwaśniewskiego (2010b) wykazały, że nakłady energetyczne na prowadzenie plantacji wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim w zależności od jej areалу wynoszą 20,8–28,7 GJ·ha⁻¹. W porównaniu do średnich nakładów uzyskanych w badaniach własnych na poziomie 7,5 GJ·ha⁻¹ stanowi to znaczną różnicę. Uwarunkowana jest ona głównie niewielką średnią wielkością badanych plantacji (I grupa – 2,2 ha; II grupa – 14,4 ha). Wiąże się to również ze znacznymi nakładami pracy, które wynosiły średnio 12,8 GJ·ha⁻¹, a ich udział w strukturze energochłonności produkcji wynosił 51%. Wskaźnik efektywności energetycznej w zależności od wielkości plantacji wahał się w granicach około 15–40, średnio dla plantacji mniejszych powierzchniowo wynosił 26,3, a dla większych 30,7. W badaniach efektywności energetycznej prowadzonych na 30 plantacjach wierzby zbieranej w cyklu corocznym wykazano, że średnie nakłady energetyczne dla tej technologii produkcji wynosiły 30,8 GJ·ha⁻¹ i również ulegały zmniejszeniu wraz ze zwiększeniem powierzchni plantacji (Kwaśniewski 2010a). Efektywność energetyczna dla plantacji wierzby zbieranej corocznie była bardzo niska i kształtowała się na poziomie 2,8. Stolarski (2009) wykazał, że nakłady energii w uprawie wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim dla obsady 24 tys. roślin·ha⁻¹ wynosiły 15,8 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹, co stanowi niemal dwukrotnie więcej niż w badaniach własnych. Jednak wyższa była również wartość energetyczna plonu, która kształtowała się na poziomie 349 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. Wskaźnik efektywności energetycznej dla omawianego wariantu technologii produkcji wynosił 22 i był niemal dwukrotnie mniejszy od uzyskanego w badaniach własnych. Zaistniała różnica może wynikać z odmiennych założeń przyjętych do analizy. W przypadku wierzby zbieranej corocznie, dla takiej samej obsady roślin, nakłady energetyczne związane z uprawą wierzby w badaniach Stolarskiego (2009) stanowiły 15,5 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. Wartość energetyczna plonu wynosiła 272 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹, a efektywność energetyczna produkcji biomasy 17,5. Przedstawione przez Stolarskiego (2009) wyniki dla cyklu zbioru corocznego są zbliżone do uzyskanych w badaniach własnych. Wartość wskaźnika efektywności energetycznej niezależnie od cyklu zbioru wzrastała wraz ze zwiększeniem obsady z 12 do 24 tys. roślin·ha⁻¹, zaś dalszy wzrost gęstości sadzenia powodował jego obniżenie.

Szymańska i in. (2011) podają, że nakłady energetyczne poniesione na założenie plantacji wierzby przy obsadzie 30 tys. roślin·ha⁻¹ wynosiły 17,7 GJ·ha⁻¹, a efektywność energetyczna jej uprawy kształtowała się na poziomie 24.

Wyniki badań wskazują, że efektywność energetyczna uprawy wierzby uzależniona jest również od jakości gleby. Wartość tego wskaźnika na glebie klasy IVb wynosiła 27, glebie klasy V – 13, a na glebach najslabszej jakości (VI klasa) zaledwie 4,5 (Piskier 2008a). Tak znaczne zróżnicowanie efektywności energetycznej uwarunkowane było głównie poziomem uzyskiwanych plonów. Na założenie plantacji wierzby należało ponieść nakłady energetyczne na poziomie 14,8 GJ·ha⁻¹, co jest zbliżone do wyników uzyskanych w badaniach własnych.

Badania prowadzone w innych krajach wskazują, że nakłady energetyczne na 1 ha uprawy wierzby wynoszą 2,6–16,9 GJ·ha⁻¹ (Börjesson 1996, Vande Walle i in. 2007, Boehmel 2008, Szczukowski i in. 2012). Wartość produkcji energii z jednostki powierzchni waha się natomiast w granicach 112–390 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. Natomiast efektywność energetyczna uprawy wierzby kształtowała się w zakresie 23–99.

Tworowski i in. (2010a i 2010b) wykazali, że wartość energetyczna plonu biomasy miskanta zawiera się w przedziale 286–306 GJ·ha⁻¹. Natomiast ilość energii zgromadzonej w biomase ślazuwca pensylwańskiego była o 20% mniejsza w porównaniu do maksymalnej wartości dla miskanta olbrzymiego. Nakłady energetyczne na uprawę miskanta olbrzymiego w tych badaniach wynosiły 15 GJ·ha⁻¹, a wskaźnik efektywności energetycznej kształtował się na poziomie 20. Zbliżone wyniki uzyskano również w badaniach własnych.

Borzęcka-Walker (2008) podaje, że nakłady energii na uprawę traw z rodzaju *Miscanthus* wynoszą 16,1 GJ·ha⁻¹, wartość energetyczna plonu waha się w granicach 259–424 GJ·ha⁻¹, zaś efektywność energetyczna w zakresie 13,4–22,7.

Badania prowadzone w innych krajach wskazują, że nakłady energetyczne na 1 ha uprawy miskanta olbrzymiego w zależności od zastosowanej technologii produkcji wynoszą 6,2–27,4 GJ·ha⁻¹ (Acaroğlu i Aksoy 2005, Boehmel i in. 2008, Angelini i in. 2009). Wartość produkcji energii z jednostki powierzchni wahała się natomiast w granicach 231–858 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹, a efektywność energetyczna jego uprawy kształtowała się w zakresie 8–71. Znaczne zróżnicowanie wielkości nakładów energii, wartości energetycznej plonu i efektywności energetycznej wynika z różnych założeń przyjętych do analizy i oceny energochłonności produkcji.

Energochłonność uprawy ślazuwca w badaniach Hryniewiczza i Grzybek (2010) kształtowała się na poziomie około 12 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹, co jest zbieżne z wynikami badań własnych. Piskier (2008b) wykazał natomiast, że nakłady energetyczne na założenie plantacji ślazuwca pensylwańskiego uzależnione są od zastosowanej technologii produkcji. Założenie plantacji z siewu wiąże się z nakładami 6,9 GJ·ha⁻¹, z kłaczy – 11,4 GJ·ha⁻¹, a z całych karp – 16,9 GJ·ha⁻¹. Natomiast nakłady energetyczne na bieżące prowadzenie plantacji wahały się od 8,4 do 8,8 GJ·ha⁻¹ i były niższe o 28–31% od przedstawianych w badaniach własnych. Wartość plonu energii w drugim roku uprawy wynosiła od 4,5 GJ·ha⁻¹ dla plantacji zakładanej z siewu do 49 GJ·ha⁻¹ dla plantacji zakładanej z karp, a wskaźnik efektywności energetycznej wahał się analogicznie od 0,5 do 5,6. Należy podkreślić, że porównywanie tych wyników z uzyskanymi w badaniach własnych jest nieuprawnione, ponieważ odnoszą się do plantacji w różnym wieku. Wyniki zaprezentowane w pracy dotyczą plantacji, które osiągnęły pełny potencjał plonowania.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Wierzba zbierana w cyklu corocznym, w latach 2008–2011, plonowała średnio od 14,5 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4 do 17,7 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8. Natomiast zbierana co trzy lata dała plony na glebie tej samej jakości wyższe o 34–47% i wynosiły one 23,6 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8 oraz 25,9 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 5.
2. Plony suchej masy badanych klonów miskanta w latach 2008–2011 wynosiły średnio od 21,1 t·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8 do 21,6 t·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4. Plony suchej masy klonów miskanta, średnio w latach badań, nie różniły się istotnie i wahały się od 20,0 t·ha⁻¹ w 2010 r. do 21,3 t·ha⁻¹ w 2011 r.
3. Plon suchej masy ślazuca pensylwańskiego zależał głównie od obsady roślin i przy zagęszczeniu 20 tys. roślin·ha⁻¹ był niemal dwukrotnie wyższy niż przy gęstości 10 tys. roślin·ha⁻¹. Plon średnio w latach badań przy niższej obsadzie roślin nie różnił się istotnie w zależności od jakości gleby i wynosił 8,9 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8 oraz 8,2 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4. Natomiast przy obsadzie 20 tys. roślin·ha⁻¹ wyższe plony suchej masy (18,5 t s.m.·ha⁻¹) uzyskano na glebie kompleksu 5.
4. Plonowanie badanych gatunków roślin w większym stopniu było uzależnione od przebiegu warunków pogodowych niż jakości gleby. Niemniej jednak wraz z poprawą jakości stanowiska zaobserwowano mniejszą zmienność plonowania tych roślin w latach, co może się przekładać na ograniczenie ryzyka produkcyjnego.
5. Wilgotność biomasy wierzby zależała od cyklu zbioru i wynosiła od 48 do 51%. Natomiast wilgotność biomasy miskanta (26%) i ślazuca pensylwańskiego (13%) była znacznie niższa niż wilgotność biomasy wierzby i zależała od terminu zbioru.
6. Biomasa wierzby zawierała więcej węgla (44,5%) niż biomasa miskanta i ślazuca pensylwańskiego (42–43%). Zawartość azotu w biomacie wierzby pozyskanej z pędów jednorocznych była znacznie wyższa niż w biomacie miskanta i ślazuca pensylwańskiego. Ze względu na znaczną zawartość azotu i kadmu biomasa wierzby pozyskiwanej co roku nie spełniała rygorystycznych norm jakościowych zawartych w niemieckiej normie DIN 51731 dla peletu drzewnego, co może ograniczać jej wykorzystanie do tego celu. Zawartość makroskładników w biomacie badanych gatunków roślin w niewielkim stopniu była zróżnicowana w zależności od jakości gleby i odmiany/klonu.
7. Najwyższe nakłady finansowe poniesiono na założenie plantacji miskanta (13–17 tys. zł·ha⁻¹) i wierzby uprawianej i zbieranej co roku (11–15 tys. zł·ha⁻¹), co uwarunkowane było głównie ilością wysadzanych sadzonek na powierzchni 1 ha i ich ceną. Natomiast najniższe koszty poniesiono na założenie plantacji ślazuca pensylwańskiego; wahały się one w zależności od stosowanej technologii produkcji od 5 do 9 tys. zł·ha⁻¹.

8. Uprawa badanych gatunków roślin przy zastosowaniu uwzględnionych w analizie wariantów technologii produkcji była efektywna ekonomicznie. Najniższą efektywnością, niezależnie od stosowanej technologii, charakteryzowała się uprawa ślazuwca pensylwańskiego i wierzby zbieranej corocznie. Natomiast najwyższą wartością ocenianych wskaźników cechowała się uprawa wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim i technologii produkcji w pełni zmechanizowanej. Opłacalność uprawy klonów miskanta była również wysoka i w zależności od stosowanej technologii wynosiła 157–169%.
9. Wartość bieżąca netto plantacji (NPV) i wewnętrzna stopa zwrotu z inwestycji (IRR) była w znacznym stopniu zróżnicowana zarówno pomiędzy badanymi gatunkami roślin, jak i technologią produkcji oraz bezpośrednio związana z powierzchnią plantacji. Najwyższą wartością wskaźników NPV i IRR, niezależnie od wielkości plantacji, cechowała się uprawa wierzby w cyklu trzyletnim i technologii produkcji w pełni zmechanizowanej. Najniższą wartość zdyskontowanych nadwyżek pieniężnych i rentowność kapitału generowała natomiast uprawa ślazuwca pensylwańskiego.
10. Symulowany wzrost plonów i cen biomasy w największym stopniu wpływał na zwiększenie zysku z jednostki powierzchni (ha) i w przeliczeniu na 1 t s.m., a także wysokość zdyskontowanych nadwyżek finansowych (NPV). Natomiast zmniejszenie kosztów produkcji było skuteczniejszym sposobem obniżania nakładów finansowych na jednostkę energii (GJ) zawartą w plonie, zwiększania opłacalności produkcji i rentowności inwestycji (IRR). Spośród wszystkich analizowanych scenariuszy najbardziej skutecznym sposobem poprawy efektywności ekonomicznej produkcji biomasy jest ograniczanie kosztów.
11. Uprawa badanych gatunków roślin charakteryzowała się korzystnymi relacjami wielkości produkcji energii do nakładów poniesionych na jej wytworzenie. Najmniej energochłonna i najbardziej efektywna okazała się uprawa wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim. Natomiast najmniej korzystnymi wartościami tych parametrów charakteryzowała się uprawa ślazuwca pensylwańskiego i wierzby zbieranej w cyklu corocznym.
12. Spośród badanych gatunków roślin najkorzystniejszymi efektami produkcyjnymi, ekonomicznymi i energetycznymi cechowała się uprawa wierzby zbieranej co trzy lata, a najmniej efektywna była uprawa ślazuwca pensylwańskiego i wierzby zbieranej w cyklu corocznym.
13. Poprawę efektywności produkcji biomasy na użytkach rolnych można osiągnąć głównie poprzez zwiększenie skali produkcji (wielkości plantacji) i stopnia zmechanizowania prac oraz poprzez obniżenie kosztów produkcji.

6. LITERATURA

1. A c a r o ğ l u M., A k s o y S.A.: The cultivation and energy balance of *Miscanthus × giganteus* production in Turkey. *Biomass Bioenerg.*, 2005, **29**: 42-48.
2. A d l e r A., D i m i t r i o u I., A r o n s s o n P., V e r w i j s t T., W e i h M.: Wood fuel quality of two *Salix × viminalis* stands fertilized with sludge, ash and sludge – ash mixtures. *Biomass Bioenerg.*, 2008, **32**: 914-925.
3. A l l u v i o n e F., M o r e t t i B., S a c c o D., G r i g n a n i C.: EUE (energy use efficiency) of cropping systems for sustainable agriculture. *Energy*, 2011, **36**: 4468-4481.
4. A n g e l i n i L.G., C e c c a r i n i L., N a s s i o D i N a s s o N., B o n a r i E.: Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus × giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristic and energy balance. *Biomass Bioenerg.*, 2009, **33**: 635-643.
5. A r a v i n d h a k s h a n S.C., E p p l i n F.M., T a l i a f e r r o Ch.M.: Economics of switchgrass and miscanthus relative to coal as feedstock generating electricity. *Biomass Bioenerg.*, 2010, **34**: 1375-1383.
6. A t k i n s o n C.J.: Estabilishing perennial energy crops in the UK: A review of current propagation options for *Miscanthus*. *Biomass Bioenerg.*, 2009, **33**: 752-759.
7. B e g l e y D., M c C r a k e n A.R., D a w s o n W.M., W a t s o n S.: Interaction in Short Rotation Coppice willow, *Salix viminalis* genotype mixtures. *Biomass Bioenerg.*, 2009, **33**: 163-167.
8. B e l l J., B o o t h E., B a l l i n g a l M.: Commercial viability of alternative non food crops and biomass on Scottish Farms – a special study supported under SEERAD Advisory Activity 211. Scottish Agricultural College, Midlothian, 2007, pp. 44.
9. B e r g g r e n M., L j u n g g r e n E., J o h n s s o n F.: Biomass co-firing potentials for electricity generation in Poland. Matching supply and co-firing opportunities. *Biomass Bioenerg.*, 2008, **32**: 865-879.
10. B ł a s z a k S., H a r a s i m o w i c z - H e r m a n n G.: Wzrost i pokrój klonów wierzby (*Salix*) przy jednorocznym i dwuletnim cyklu gromadzenia biomasy. *Fragm. Agron.*, 2008, **2(98)**: 5-18.
11. B o c h n i a r z A.: Plonowanie i efektywność produkcji pszenicy ozimej w różnych systemach produkcji. Praca doktorska. IUNG, Puławy, 2004, ss.74.
12. B o e h m e l C., L e w a n d o w s k i I., C l a u p e i n W.: Comparing annual perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agr. Syst.*, 2008, **96**: 224-236.
13. B o r e k R.: Empiryczno-statystyczne i symulacyjne modele plonowania wierzby wiciowej (*Salix viminalis* L.) uprawianej na cele energetyczne. Praca doktorska. IUNG-PIB, Puławy, 2008, ss.89.
14. B ö r j e s s o n P.I.I.: Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass Bioenerg.*, 1996, **11**: 305-318.
15. B o r k o w s k a H., S t y k B.: Perspektywy uprawy i wykorzystania ślazuwca pensylwańskiego na cele energetyczne. W: Ogniwia paliwowe i biomasa ligninocelulozowa szansą rozwoju wsi i miast, W. Ciechanowicz i S. Szczukowski (red.). Wyd. WSISiZ, Warszawa, 2003, s. 185-191.
16. B o r k o w s k a H.: Kielkowanie nasion oraz polowa zdolność wschodów ślazuwca pensylwańskiego w zależności od zastosowanej zaprawy nasiennej. *Fragm. Agron.*, 2006, **3(91)**: 267-276.
17. B o r k o w s k a H., M o l a s R.: Two extremely different crops, *Salix* and *Sida*, as sources of renewable bioenergy. *Biomass Bioenerg.*, 2012, **36**: 234-240.

18. B o r z ę c k a - W a l k e r M.: Produkcyjność miskanta (*Miscanthus* ssp.) w różnych warunkach siedliskowych i pogodowych. Praca doktorska. IUNG-PIB, Puławy, 2008, ss. 106.
19. B ó r a w s k i P., P a w l e w i c z A.: Efektywność ekonomiczna indywidualnych gospodarstw rolnych w aspekcie zrównoważonego rozwoju obszarów wiejskich na przykładzie województwa warmińsko-mazurskiego. Zesz. Nauk. AR Wrocław, 2006, **540**: 91-97.
20. B u d z y ń s k i W., S z c z u k o w s k i S., T w o r k o w s k i J.: Wybrane problemy z zakresu produkcji roślinnej na cele energetyczne. W: Przyszłość sektora rolno-spożywczego i obszarów wiejskich, A. Harasim (red.), IUNG-PIB, Puławy, 2009, s. 77-89.
21. C a o Y., L e h t o T., P i i r a i n e n S., K u k k o n e n J.V.K., P e l k o n e n P.: Effects of planting orientation and density on the soil solution chemistry and growth of willow cuttings. *Biomass Bioenerg.*, 2012, **46**: 165-173.
22. C a s l i n B., F i n n a n J., E a s s o n L.: *Miscanthus* best practice guidelines. Agri-Food and Bioscience Institute, Hillsborough, 2010. Protokół dostępu: http://www.seai.ie/Renewables/Bioenergy/Miscanthus_Best_Practice_Guide_2010.pdf [06.11.2012].
23. C a s l i n B., F i n n a n J., M c C r a c k e n A.: Short rotation coppice willow. Best practice guidelines. Agri-Food and Bioscience Institute, Hillsborough, 2011. Protokół dostępu: <http://www.agriculture.gov.ie/media/migration/ruralenvironment/environment/bioenergyscheme/WillowBestPracticeManual010812.pdf> [06.11.2012].
24. C h o ł u j D., P o d l a s k i S., P i e t k i e w i c z S., W i ś n i e w s k i G.: Parametry fizjologiczne determinujące plon roślin energetycznych. W: Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy, P. Bocian, T. Golec i J. Rakowski (red.), Instytut Energetyki, Warszawa, 2010, s. 69-88.
25. C h r i s t i a n D.G., Y a t e s N.E., R i c h e A.B.: Establishing *Miscanthus sinensis* from seed using conventional sowing methods. *Ind. Crop. Prod.*, 2005, **21**: 109-111.
26. C l i f t o n - B r o w n J.C., L e w a n d o w s k i I.: Water use efficiency and biomass partitioning of three different *Miscanthus* genotypes with limited and unlimited water supply. *Ann. Bot.*, 2000, **86**: 191-200.
27. C l i f t o n - B r o w n J.C., L e w a n d o w s k i I., A n d e r s s o n B., B a s c h G., C h r i s t i a n D.G., K j e l d s e n J.B., J o r g e n s e n U., M o r t e n s e n J.V., R i c h e A.B., S c h w a r z K.U., T a y e b i K., T e i x e i r a F.: Performance of 15 *Miscanthus* genotypes at five sites in Europe. *Agron. J.*, 2001, **93**: 1013-1019.
28. C o r n e l i s s e n S., K o p e r M., D e n g Y.Y.: The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system. *Biomass Bioenerg.*, 2012, **41**: 21-33.
29. D e W i t M., F a a i j A.: European biomass resource potential and costs. *Biomass Bioenerg.*, 2010, **34**: 188-202.
30. D e n i s i u k W.: Możliwości wykorzystania ślazuwca pensylwańskiego w energetyce. *Inż. Rol.*, 2005, **6(66)**: 105-113.
31. D e u t e r M., J e ż o w s k i S.: Stan wiedzy o hodowli traw olbrzymich z rodzaju *Miscanthus*. *Post. Nauk Roln.*, 2002, **2**: 59-67.
32. D u b a s J.W., T o m c z y k A.: Zakładanie, pielęgnacja i ochrona plantacji wierzby. Wyd. SGGW, Warszawa, 2005, ss 105.
33. Dyrektywa 2009/28/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE. Dz.U. WE L 140 z 05.06.2009.
34. Dz.U. Nr 203, poz. 1683 i 1684, 2005: Protokół z Kyoto do Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu.

35. El Kasmiooui O., Ceulemans R.: Financial analysis of the cultivation of poplar and willow for bioenergy. *Biomass Bioenerg.*, 2012, **43**: 52-64.
36. El Bassam N.: Handbook of bioenergy crops. Earthscan Ltd., London, 2010, pp. 545.
37. Ericsson K., Rosenqvist H., Gańko E., Pisarek M., Nilsson J.L.: An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland. *Biomass Bioenerg.*, 2006, **30**: 16-27.
38. Ericsson K., Rosenqvist H., Nilsson J.L.: Energy crops production costs in the EU. *Biomass Bioenerg.*, 2009, **33**: 1577-1586.
39. Faber A., Stasiak M., Kuś J.: Wstępna ocena produktywności wybranych gatunków roślin energetycznych. *Prog. Plant Prot.*, 2007, **4(47)**: 334-346.
40. Faber A.: Prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię a wykorzystanie ziemi w Polsce do 2030 roku. W: Racjonalne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, P. Gradziuk (red.). MODR, Płońsk, 2009, p. 17-23.
41. Faber A., Pudełko R., Borek R., Borzęcka-Walker M., Syp A., Krasuska E., Mathiou P.: Economic potential of perennial energy crops in Poland. *J. Food Agric. Environ.*, 2012, **3-4(10)**: 1178-1182.
42. Faber A.: Prognoza wykorzystania przestrzeni rolniczej do produkcji roślinnej na cele energetyczne. W: Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne, B. Kołodziej i M. Matyka (red.). PWRiL, Poznań, 2012, p. 388-395.
43. Felis P.: Metody dyskontowe. W: Finanse przedsiębiorstwa, J. Szczepański i L. Szyszko (red.). Pol. Wyd. Ekon., Warszawa, 2007, p. 415-423.
44. Field B.Ch., Campbell E.J., Lobell D.B.: Biomass energy: the scale of the potential resource. *Tren. Ecol. Evol.*, 2008, **2(23)**: 65-72.
45. Fillion M., Brisson J., Teodorescu T.I., Sauve S., Labrecque M.: Performance of *Salix viminalis* and *Populus nigra* × *Populus maximowiczii* in short rotation intensive culture under high irrigation. *Biomass Bioenerg.*, 2009, **33**: 1271-1277.
46. Firbank L.G.: Assessing the ecological impacts of bioenergy projects. *Bioenergy Research*, 2008, **1**: 12-19.
47. 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.
48. Frombo F., Minciardi R., Robba M., Rosso F., Sacile R.: Planning woody biomass logistics for energy production: A strategic decision model. *Biomass Bioenerg.*, 2009, **33**: 372-383.
49. Gajewski R.: Potencjał rynkowy produkcji BiOB z przeznaczeniem na cele energetyczne. W: Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy. Instytut Energetyki, P. Bocian, T. Golec i J. Rakowski (red.), Warszawa, 2010, s. 414-418.
50. Gańko E., Rosenqvist H.: Ekonomika upraw energetycznych wierzby, miskanta i pszenżyta. *Zag. Ekon. Rol.*, 2009, **1(318)**: 73-91.
51. Goor F., Jossart J.M., Ledent J.F.: ECOP: an economic model to assess the willow short rotation coppice global profitability in a case of small scale gasification pathway in Belgium. *Environ. Model. Soft.*, 2000, **3(15)**: 279-292.
52. Grabiński J., Książak J., Nieróbcza P., Szeleźniak E.: Uprawa wierzby wiciowej i ślawowca pensylwańskiego na cele energetyczne. Instrukcja upowszechnieniowa nr 116. Wyd. IUNG-PIB, Puławy, 2006, ss. 58.
53. Gromadzki J.: Katalog-cennik ciągników i maszyn rolniczych. PIMR, Poznań, 2010, ss. 159.

54. Grzybek A.: Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy. Wyd. ITP, Warszawa, 2010, ss. 230.
55. Główny Urząd Statystyczny (GUS): Energia ze źródeł odnawialnych w 2011 r. Wyd. GUS, Warszawa, 2012, ss. 84.
56. Harasim A.: Przewodnik ekonomiczno-rolniczy w zarysie. Wyd. IUNG-PIB, Puławy, 2006, ss. 172.
57. Hastings A., Clifton-Brown J.C., Wattenbach M., Stampfl P., Mitchell P., Smith P.: Potential of *Miscanthus* grasses to provide energy and hence reduce greenhouse gas emissions. *Agron. Sustain. Develop.*, 2008, **28**: 465-472.
58. Hinton-Jones M., Valentine J.: Variety and altitude effects on yields and other characters of SRC willow in Wales. *Biomass and Energy Crops III. Asp. Appl. Biol.*, 2009, **90**: 67-73.
59. Hoogwijk M., Faaij A., de Vries B., Turkenburg W.: Exploration of regional and global cost-supply curves of biomass energy from short-rotation crops and abandoned cropland and rest land under four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass Bioenerg.*, 2009, **33**: 26-43.
60. Hryniewicz M., Grzybek A.: Porównanie jednostkowej energochłonności skumulowanej uprawy wierzby, miskanta i ślazuca. W: Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy, A. Grzybek (red.). Wyd. ITP, Falenty-Warszawa, 2010, s. 145-157.
61. Igliński B., Buczkowski R., Cichosz M.: Technologie bioenergetyczne – monografia. Wyd. Nauk. UMK, Toruń, 2009, ss. 380.
62. Igliński B., Iglińska A., Kujawski W., Buczkowski R., Cichosz M.: Bioenergy in Poland. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2011, **15**: 2999-3007.
63. Jasiulewicz M.: Potencjał biomasy w Polsce. Politechnika Koszalińska, 2010a, ss. 170.
64. Jasiulewicz M.: Regionalny potencjał energetyczny biomasy w Polsce. W: Regionalny i lokalny potencjał biomasy energetycznej, M. Jasiulewicz (red.). Pol. Tow. Ekon., Politechnika Koszalińska, 2010b, s. 13-56.
65. Jeżowski S.: Yield traits of six clones of *Miscanthus* in the first 3 years following planting in Poland. *Ind. Crop. Prod.*, 2008, **27**: 65-68.
66. Józwiak W.: Opłacalność produkcji rolniczej. W: Encyklopedia agrobiznesu, A. Woś (red.). Fundacja Innowacji, Warszawa, 1998, s. 529-531.
67. Kahle P., Beuch S., Boelcke B., Leinweber P., Schulten H.R.: Cropping of *Miscanthus* in Central Europe: biomass production and influence on nutrients and soil organic matter. *Europ. J. Agron.*, 2001, **15**: 171-184.
68. Kala R.: Statystyka dla przyrodników. Wyd. AR, Poznań, 2005, ss. 232.
69. Khanna M., Dhargana B., Clifton-Brown J.C.: Cost of producing miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois. *Biomass Bioenerg.*, 2008, **32**: 482-493.
70. Kołodziej B., Matyka M.: Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne. PWRiL, Poznań, 2012, ss. 594.
71. Kotecki A.: Uprawa miskanta olbrzymiego. Energetyczne i pozaenergetyczne możliwości wykorzystania słomy. Wyd. UP, Wrocław, 2010, ss. 186.
72. Kowalczyk J., Kusak A.: Decyzje finansowe firmy. Metody analizy. Wyd. C.H. BECK, Warszawa, 2006, ss. 359.
73. Krasowicz S.: Wpływ produkcji roślin energetycznych na rynek żywności. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2008, **11**: 125-132.

74. K r a s u s k a E., R o s e n q v i s t H.: Economics of energy crops in Poland today and in future. *Biomass Bioenerg.*, 2012, **38**: 23-33.
75. K u e m m e l B., L a n g e r V., M a g i d J., D e N e e r g a a r d A., P o r t e r J.R.: Energetic, economic and ecological balances of a combined food and energy systems, *Biomass Bioenerg.*, 1998, **4-5(15)**: 407-416.
76. K u ś J., F a b e r A., S t a s i a k M., K a w a l e c A.: Plonowanie wybranych gatunków roślin uprawianych na cele energetyczne na różnych glebach. *Probl. Inż. Rol.*, 2008, **1(59)**: 79-86.
77. K u ś J., F a b e r A.: Produkcja roślinna na cele energetyczne a racjonalne wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej Polski. W: *Przyszłość sektora rolno-spożywczego i obszarów wiejskich*, A. Harasim (red.). IUNG-PIB, Puławy, 2009, s. 63-76.
78. K u ś J., M a t y k a M.: Uprawa roślin na cele energetyczne. Instrukcja upowszechnieniowa nr 176. Wyd. IUNG-PIB, Puławy, 2010, ss. 64.
79. K u ś J., M a t y k a M.: Miskant *Miscanthus* ssp. W: *Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne*, B. Kołodziej i M. Matyka (red.). PWRiL, Poznań, 2012, s. 289-295.
80. K w a ś n i e w s k i D.: Efektywność energetyczna produkcji biomasy z rocznej wierzby. *Inż. Rol.*, 2010a, **1(119)**: 289-295.
81. K w a ś n i e w s k i D.: Efektywność energetyczna produkcji biomasy z trzyletniej wierzby. *Inż. Rol.*, 2010b, **5(123)**: 113-119.
82. L e w a n d o w s k i I.: *Miscanthus* – a multifunctional biomass crop for future. W: *Alternative plants for sustainable agriculture*, S. Jeżowski, K.M. Wojciechowicz i E. Zenkteler (red.). Institute of Plant Genetics PAS, Poznań, 2006, s. 83-90.
83. L e w a n d o w s k i I., C l i f t o n - B r o w n J.C., S c u r l o c k J.M.O., H u i s m a n W.: *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass Bioenerg.*, 2000, **19**: 209-227.
84. L e w a n d o w s k i I., C l i f t o n - B r o w n J. C., A n d e r s s o n B., B a s c h G., C h r i s t i a n D.G., J ø r g e n s e n U., J o n e s M.B., R i c h e A.B., S c h w a r z K.U., T a y e b i K., T e i x e i r a F.: Environment and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes. *Agron. J.*, 2003, **95**: 1274-1280.
85. L i X., H o u S., S u M., Y a n g M., S h e n S., J i a n g G., Q i D., C h e n S., L i u G.: Major energy plants and their potential for bioenergy development in China. *Environ. Manage.*, 2010, **46**: 579-589.
86. L i s o w s k i A.: Maszyny do zbioru wierzby. W: *Technologie zbioru roślin energetycznych*, A. Lisowski (red.). Wyd. SGGW, Warszawa, 2010, s. 91-110.
87. L u g e r E.: Energy crop species in Europe, 1996. Protokół dostępu: http://www.bl.t.bmlfuw.gv.at/vero/veroeff/0732_Energy_crops_species_e.pdf [03.10.2012].
88. L u s z n i e w i c z A., S ł a b y T.: Statystyka z pakietem komputerowym Statistica Pl. Teoria i zastosowanie. Wyd. C.H. BECK, Warszawa, 2008, ss. 472.
89. M a j t k o w s k i W., M a j t k o w s k a G., T o m a s z e w s k i B.: Dynamika wzrostu roślin energetycznych oraz potencjalnej biomasy. W: *Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy*, A. Grzybek (red.). Wyd. ITP, Falenty-Warszawa, 2010, s. 114-126.
90. M a t y k a M.: Opłacalność i konkurencyjność produkcji wybranych roślin energetycznych. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2008, **11**: 113-123.
91. M a t y k a M.: Rolnictwo a odnawialne źródła energii – szanse i zagrożenia. W: *Z badań nad rolnictwem społecznie zrównoważonym*, J.S. Zegar (red.). Raport PW IERiGŻ-PIB, Warszawa, 2011, **11**: 95-120.

92. M a t y k a M., K u ś M.: Ślázowiec pensylwański *Sida hermaphrodita* L. (Rusby). W: Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne, B. Kołodziej i M. Matyka (red.). PWRiL, Poznań, 2012, s. 267-271.
93. M a t y k a M.: Opłacalność i konkurencyjność produkcji roślin energetycznych. W: Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne, B. Kołodziej i M. Matyka (red.). PWRiL, Poznań, 2012, s. 407-416.
94. M o l a - Y u d e g o B., A r o n s s o n P.: Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. Biomass Bioenerg., 2008, **32**: 829-837.
95. M u z a l e w s k i A.: Koszty i opłacalność produkcji roślin energetycznych – wyniki badań terenowych. W: Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy, A. Grzybek (red.). Wyd. ITP, Falenty-Warszawa, 2010a, s. 171-182.
96. M u z a l e w s k i A.: Koszty eksploatacji maszyn rolniczych. IBMER, Warszawa, 2010b, ss. 52.
97. N a g e l J.: Biomass in energy supply, especially in the state of Brandenburg, Germany. Ecol. Eng., 2000, **16**: 103-110.
98. N i j a k K.: Najważniejsze szkodniki wieloletnich roślin energetycznych. Pam. Puł., 2008, **148**: 67-72.
99. N i x o n P.M.I., B o o c o c k H., B u l l a r d M.J.: An evaluation of planting options for miscanthus. Biomass and Energy Crops II. Asp. Appl. Biol., 2001, **65**: 123-130.
100. N o l a n A., M C D o n n e l l K., M C S i u r t a i n M., C a r r o l l J.P., F i n n a n J., R i c e B.: Conservation of miscanthus in bale form. Biosyst. Eng., 2009, **104**: 345-352.
101. Normy dla pelletów. Protokół dostępu: http://www.ecofuel.pl/pliki/PELLET_NORMY_EcoFuel_2011.pdf [29.11.2012].
102. P a w l a k J.: Efektywność ekonomiczna produkcji biomasy z wierzby wiciowej w świetle badań modelowych. W: Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy, A. Grzybek (red.). Wyd. ITP, Falenty-Warszawa, 2010, s. 158-170.
103. P i s k i e r T.: Efektywność energetyczna uprawy wierzby w różnych warunkach glebowych. Inż. Rol., 2008a, **2(100)**: 215-220.
104. P i s k i e r T.: Ocena nakładów energetycznych wybranych technologii zakładania plantacji ślázowca pensylwańskiego. Inż. Rol., 2008b, **10(108)**: 193-200.
105. P l i e n i n g e r T., T h i e l A., B e n s O., H ü t t l R.F.: Pathways and pitfalls of implementing the use of woodfuels in Germany's bioenergy sector. Biomass Bioenerg., 2009, **33**: 384-392.
106. P o d l e ś n y J.: Trawa *Miscanthus × giganteus* – jej charakterystyka i możliwości wykorzystania. Post. Nauk Rol., 2005, **2**: 41-52.
107. P u d e ł k o R., F a b e r A.: Dobór roślin energetycznych dostosowanych do uprawy w wybranych rejonach kraju. W: Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy, P. Bocian, T. Golec i J. Rakowski (red.). Instytut Energetyki, Warszawa, 2010, s. 50-68.
108. R a k o w s k i J.: Aktualny stan produkcji i wykorzystania energii odnawialnej. W: Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne, B. Kołodziej i M. Matyka (red.). PWRiL, Poznań, 2012, s. 13-40.
109. R e m l e i n - S t a r o s t a D., N i j a k K.: Ślázowiec pensylwański – wstępne wyniki badań nad możliwościami ochrony przed agrofagami. Prog. Plant Prot., 2007, **4(47)**: 358-362.
110. R e m l e i n - S t a r o s t a D.: Choroby roślin energetycznych. Prog. Plant Prot., 2007, **4(47)**: 351-357.

111. Roszkowski A.: Biomasa kontra rolnictwo. Inż. Rol., 2008, **10(108)**: 201-208.
112. Roszkowski A.: Bioenergia – pola i lasy zastąpią węgiel, ropę i gaz? Inż. Rol., 2009, **1(110)**: 243-257.
113. Rutkowski A.: Zarządzanie finansami. Pol. Wyd. Ekon., Warszawa, 2000, ss. 479.
114. Stolarski M., Wróblewska H., Szczukowski S., Tworkowski J., Kwiatkowski J., Cichy W.: Charakterystyka biomasy wierzby i ślazuwca pensylwańskiego jako potencjalnego surowca dla przemysłu. Fragm. Agron., 2006, **3(91)**: 277-289.
115. Stolarski M., Kisiel R., Szczukowski S., Tworkowski J.: Koszty likwidacji plantacji wierzby krzewiastej. Roczn. Nauk. Roln., ser. G, 2008a, **2(94)**: 172-177.
116. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J.: Biopaliwa z biomasy wieloletnich roślin energetycznych. Energetyka, 2008c, **1(643)**: 77-80.
117. Stolarski M.: Agrotechniczne i ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby krzewiastej (*Salix* spp.) jako surowca energetycznego. Wyd. UW-M, Olsztyn, 2009, ss. 146.
118. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Wróblewska H., Krzyżniak M.: Short rotation willow coppice biomass as an industrial and energy feedstock. Indust. Crops Prod., 2011a, **33**: 217-223.
119. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Klasa A.: Willow biomass production under conditions of low-input agriculture on marginal soils. For. Ecol. Manag., 2011b, **262**: 1558-1566.
120. Styk B.: Niektóre zagadnienia użytkowania, biologii i agrotechniki sidy. Post. Nauk Rol., 1984, **3**: 3-8.
121. Styles D., Thorne F., Jones B.M.: Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and *Miscanthus* production with conventional farming systems. Biomass Bioenerg., 2008, **32**: 407-421.
122. Styszeko L., Ignatowicz M., Borzymowska A.: Wpływ nawożenia azotem na odrastanie pędów wierzby w trzyletnim cyklu uprawy na glebie lekkiej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 2009, **564**: 237-245.
123. Szczepankowski P.: Zarządzanie finansami przedsiębiorstw. Mierniki oceny opłacalności inwestycji, 2012. Protokół dostępu: http://www.wszim-sochaczew.edu.pl/www/download/Zarządzanie_Finansami_Przedsiębiorstwa/ZFP_wykład_nr_6.doc [21.10.2012].
124. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Kwiatkowski J., Krzyżaniak M., Lajszner W., Graban Ł.: Wieloletnie rośliny energetyczne. MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 2012, ss. 156.
125. Szczukowski S.: Wierzba *Salix* L. W: Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne, B. Kołodziej i M. Matyka (red.). PWRiL, Poznań, 2012, s. 243-253.
126. Szepetycki A., Wójcicki Z.: Postęp technologiczny i nakłady energetyczne w rolnictwie w 2020 r. IBMER, Warszawa, 2003, ss. 242.
127. Szymańska M., Łabętowicz J., Kwietniewska G.: Efektywność energetyczna w uprawie wierzby (*Salix viminalis* L.) mierzona metodą analizy cyklu trwania (LCA). Zesz. Probl. Post. Nauk. Rol., 2011, **565**: 347-356.
128. Szypuła - Gądor K.: Wstępne badania nad wydajnością wierzby ogławianych. Pam. Puł., 1968, **34**: 105-120.
129. Tharakan P.J., Volk T.A., Lindsey C.A., Abrahamson L.P., White E.H.: Evaluating the impact of three incentive programs on the economics of cofiring willow biomass with coal in New York State. Energy Policy, 2005, **11(26)**: 991-1013.
130. Toffler A.: Trzecia fala. Wyd. Kurpisz S.A. Poznań, 2009, ss. 492.

131. Tubby I., Armstrong A.: Establishment and management of short rotation coppice. Practice note, 2002. Protokół dostępu: [http://www.forestry.gov.uk/PDF/fcpn7.pdf/\\$FILE/fcpn7.pdf](http://www.forestry.gov.uk/PDF/fcpn7.pdf/$FILE/fcpn7.pdf) [06.11.2012].
132. Turley D.B.: Technology and policy requirements in the drive towards improving bioenergy efficiency. *Biomass and Energy Crops III. Asp. Appl. Biol.*, 2008, **90**: 3-10.
133. Tworkowski J., Kuś J., Szczukowski S., Stolarski M.: Produkcyjność roślin uprawianych na cele energetyczne. W: *Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy*, P. Bocian, T. Golec i J. Rakowski (red.), Instytut Energetyki, Warszawa, 2010a, s. 34-49.
134. Tworkowski J., Stolarski M., Wróblewska H., Szczukowski S.: Skład chemiczny i wartość energetyczna biomasy wierzy krzewiastej, ślazuca pensylwańskiego i miskanta olbrzymiego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2010b, **547**: 401-408.
135. Vande Walle I., Van Camp N., Vande Castele L., Verheyen K., Lemeur R.: Short-rotation forestry on birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) II. Energy production and CO₂ emission reduction potential. *Biomass Bioenerg.*, 2007, **31**: 276-283.
136. Vandenhove H., Goor F., O'Brien S., Grebenkov A., Timofeyev S.: Economic viability of short rotation Coppice for energy production for reuse of caesium-contaminated land in Belarus. *Biomass Bioenerg.*, 2002, **6(22)**: 421-431.
137. Volk T.A., Abrahamson L.P., Cameron K.D., Castellano P., Corbin T., Fabio E., Johnson G., Kuzovkina-Eischen Y., Labrecque M., Miller R., Sidders D., Smart L.B., Staver K., Stanosz G.R., Van Rees K.: Yields of willow biomass crops across a range of sites in North America. *Biomass and Energy Crops IV. Asp. Appl. Biol.*, 2011, **112**: 67-74.
138. Wandrasz J.W., Wandrasz A.J.: Paliwa formowalne. Wyd. „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa, 2006, ss. 466.
139. Węgrzyn A., Zając G.: Wybrane aspekty badań efektywności energetycznej technologii produkcji biomasy roślinnej. *Acta Agrophysica*, 2008, **11(3)**: 799-806.
140. Winnicka G., Matuszek K., Wilk B.: Badania właściwości energetycznych, emisyjnych i użytkowych biopaliw uzyskanych ze zbiorów doświadczalnych roślin energetycznych. W: *Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy*, P. Bocian, T. Golec i J. Rakowski (red.), Instytut Energetyki, Warszawa, 2010, s. 145-158.
141. Wiśniewska B., Kalembsa S.: Wpływa dawek azotu na zawartość i pobranie ołowiu, kadmu i niklu przez biomasę ślazuca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita* Rusby). *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2011, **565**: 373-382.
142. Wójcicki Z.: Metodyczne problemy badania energochłonności produkcji rolniczej. *Probl. Inż. Rol.*, 2005, **1(47)**: 5-12.
143. Yemshanov D., McKenney D.: Fast-growing poplar plantations as a bioenergy supply source for Canada. *Biomass Bioenerg.*, 2008, p. 185-197.
144. Zhao L., Feng L., Hall Ch.A.S.: Is peakoilism coming? *Energ. Policy*, 2009, **37**: 2136-2138.
145. Zieliński T.: Jak pokochać statystykę, czyli Statistica do poduszki. StatSoft, Kraków, 1999, ss. 256.
146. Zub H.W., Brancourt-Hulmel M.: Agronomic and physiological performances of different species of *Miscanthus*, a major energy crop. A review. *Agron. Sustain. Develop.*, 2009, **30**: 201-214.

PRODUKCYJNE I EKONOMICZNE ASPEKTY UPRAWY ROŚLIN WIELOLETNICH NA CELE ENERGETYCZNE

Streszczenie

Słowa kluczowe: biomasa, wierzba krzewiasta, miskant, ślázowiec pensylwański, plonowanie, efektywność ekonomiczna, efektywność energetyczna.

Główną przesłanką decydującą o podjęciu badań nad uprawą roślin wieloletnich na cele energetyczne stanowiła fragmentaryczność i zróżnicowanie dotychczas prezentowanych wyników badań i ocen oraz dylematy o charakterze społecznym, ekonomicznym i politycznym dotyczące rozwoju tego kierunku produkcji rolniczej.

Celem pracy było określenie efektywności produkcji biomasy wybranych gatunków roślin wieloletnich w aspekcie realizacji celów produkcyjnych, ekonomicznych i energetycznych. Porównano również zróżnicowanie efektywności produkcyjnej, ekonomicznej i energetycznej w zależności od gatunku uprawianej rośliny i stosowanej technologii produkcji.

Badania polowe prowadzono w latach 2008–2011 na plantacjach doświadczalnych założonych w 2003 i 2004 roku. Karpy roślin w momencie rozpoczęcia badań wchodziły w 6–7 rok wegetacji. Doświadczenia były zlokalizowane na glebach 8, 4 i 5 kompleksu przydatności rolniczej. Badaniami zostało objęte 9 odmian/klonów wierzby, 7 klonów miskanta i ślázowiec pensylwański. Wykonano ocenę jakości biomasy oraz określono efektywność ekonomiczną i energetyczną uprawy i pozyskiwania biomasy ww. gatunków roślin. Wierzba zbierana w cyklu corocznym w latach 2008–2011 plonowała średnio od 14,5 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4 do 17,7 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8. Natomiast zbierana co trzy lata dała na glebie tej samej jakości plony wyższe o 34–47% i wynosiły one 23,6 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8 oraz 25,9 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 5. Plony suchej masy badanych klonów miskanta w latach 2008–2011 wynosiły średnio od 21,1 t·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8 do 21,6 t·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4. Plony suchej masy klonów miskanta, średnio w latach badań, nie różniły się istotnie i wahały się od 20,0 t·ha⁻¹ w 2010 r. do 21,3 t·ha⁻¹ w 2011 r. Plon suchej masy ślázowca pensylwańskiego zależał głównie od obsady roślin i przy zagęszczeniu 20 tys. roślin·ha⁻¹ był niemal dwukrotnie wyższy niż przy gęstości 10 tys. roślin·ha⁻¹. Plon średnio w latach badań przy niższej obsadzie roślin nie różnił się istotnie w zależności od jakości gleby i wynosił 8,9 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 8 oraz 8,2 t s.m.·ha⁻¹ na glebie kompleksu 4. Natomiast przy obsadzie 20 tys. roślin·ha⁻¹ wyższe plony suchej masy (18,5 t s.m.·ha⁻¹) uzyskano na glebie kompleksu 5. Plonowanie badanych gatunków roślin w większym stopniu było uzależnione od przebiegu warunków pogodowych niż jakości gleby. Niemniej jednak wraz z poprawą jakości stanowiska zaobserwowano mniejszą zmienność plonowania tych roślin w latach, co może się przekładać na ograniczenie ryzyka produkcyjnego.

Biomasa wierzby zawierała więcej węgla (44,5%) niż biomasa miskanta i ślázowca pensylwańskiego (42–43%). Zawartość azotu w biomase wierzby pozyskanej z pędów jednorocznych była znacznie wyższa niż w biomase miskanta i ślázowca pensylwańskiego. Ze względu na znaczną zawartość azotu i kadmu biomasa wierzby pozyskiwanej co roku nie spełniała rygorystycznych norm jakościowych zawartych w niemieckiej normie DIN 51731 dla peletu drzewnego, co może ograniczać jej wykorzystanie do tego celu. Zawartość makroskładników w biomase badanych gatunków roślin w niewielkim stopniu była różnicowana w zależności od jakości gleby i odmiany/klonu.

Najwyższe nakłady finansowe poniesiono na założenie plantacji miskanta ($13\text{--}17$ tys. $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$) i wierzby uprawianej i zbieranej co roku ($11\text{--}15$ tys. $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$), co uwarunkowane było głównie ilością wysadzanych sadzonek na powierzchni 1 ha i ich ceną. Natomiast najniższe koszty poniesiono na założenie plantacji ślazuwca pensylwańskiego; wahały się one w zależności od stosowanej technologii produkcji od 5 do 9 tys. $\text{zł}\cdot\text{ha}^{-1}$. Uprawa porównywanych gatunków roślin przy zastosowaniu uwzględnionych w analizie wariantów technologii produkcji była efektywna ekonomicznie. Najniższą efektywnością, niezależnie od stosowanej technologii, charakteryzowała się uprawa ślazuwca pensylwańskiego i wierzby zbieranej corocznie. Natomiast najwyższą wartością ocenianych wskaźników cechowała się uprawa wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim i technologii produkcji w pełni zmechanizowanej. Opłacalność uprawy klonów miskanta była również wysoka i w zależności od stosowanej technologii wynosiła $157\text{--}169\%$. Wartość bieżąca netto plantacji (NPV) i wewnętrzna stopa zwrotu z inwestycji (IRR) była w znacznym stopniu zróżnicowana zarówno pomiędzy badanymi gatunkami roślin, jak i technologią produkcji oraz bezpośrednio związana z powierzchnią plantacji. Najwyższą wartością wskaźników NPV i IRR, niezależnie od wielkości plantacji, cechowała się uprawa wierzby w cyklu trzyletnim i technologii produkcji w pełni zmechanizowanej. Najniższą wartość zdyskontowanych nadwyżek pieniężnych i rentowność kapitału generowała natomiast uprawa ślazuwca pensylwańskiego. Symulowany wzrost plonów i cen biomasy w największym stopniu wpływał na zwiększenie zysku z jednostki powierzchni (ha) i w przeliczeniu na 1 t s.m., a także wysokość zdyskontowanych nadwyżek finansowych (NPV). Natomiast zmniejszenie kosztów produkcji jest skuteczniejszym sposobem obniżania nakładów finansowych na jednostkę energii (GJ) zawartą w plonie, zwiększania opłacalności produkcji i rentowności inwestycji (IRR). Spośród wszystkich analizowanych scenariuszy najbardziej skutecznym sposobem poprawy efektywności ekonomicznej produkcji biomasy jest ograniczanie kosztów.

Uprawa badanych roślin charakteryzowała się korzystnymi relacjami wielkości produkcji energii do nakładów poniesionych na jej wytworzenie. Najmniej energochłonna i najbardziej efektywna okazała się uprawa wierzby zbieranej w cyklu trzyletnim. Natomiast najmniej korzystnymi wartościami tych parametrów charakteryzowała się uprawa ślazuwca pensylwańskiego i wierzby zbieranej w cyklu corocznym.

Spośród badanych gatunków roślin najkorzystniejszymi efektami produkcyjnymi, ekonomicznymi i energetycznymi cechowała się uprawa wierzby zbieranej co trzy lata, a najmniej efektywna była uprawa ślazuwca pensylwańskiego i wierzby zbieranej w cyklu corocznym.

Poprawę efektywności produkcji biomasy na użytkach rolnych można osiągnąć głównie poprzez zwiększenie skali produkcji (wielkości plantacji) i stopnia zmechanizowania prac oraz obniżenie kosztów produkcji.

PRODUCTION AND ECONOMIC ASPECTS OF CULTIVATION OF PERENNIAL PLANTS FOR ENERGY PURPOSES

Summary

Key words: biomass, willow, miscanthus, virginia mallow, yielding, economic efficiency, energy efficiency.

Main objective to take up the research on cultivation of perennial plants for energy purposes was the fragmentation and differentiation of the previously presented results of research and evaluation, as well as social, economic and political issues concerning the development of this direction of agricultural production.

The aim of this study was to determine the effectiveness of biomass production from selected perennial plants species in aspect of realization of production, economic, and energy goals. The differentiation of production, economic and energy efficiency were also compared according to the plant species and used production technology.

Field experiments were carried out in the years of 2008–2011 on the experimental plantations established in year 2003 and 2004. Rootstocks of plants at the start of experiment began their 6th or 7th year of vegetation. Experiments were located on soils of 8th, 4th and 5th of the complex agricultural suitability. The study covered 9 varieties/clones of willow, 7 clones of miscanthus and virginia mallow. Also, an assessment of the quality of biomass was performed and economic and energy efficiency of their cultivation and harvesting were determined.

Average yield of willow harvested annually in the years 2008–2011, ranged from 14.5 t DM·ha⁻¹ on 4th soil complex to 17.7 t DM·ha⁻¹ on 8th soil complex. Whereas, in three years cycle harvest, the yields on soil of the same quality were higher by 34–47% and has reached 23.6 t DM·ha⁻¹ on 8th soil complex and 25.9 t DM·ha⁻¹ on 5th soil complex. Average dry matter yields of Miscanthus clones in the years of 2008–2011 ranged from 21.1 t·ha⁻¹ on 8th soil complex to 21.6 t·ha⁻¹ on 4th soil complex. Average for the period, regardless of the location of the plantation, miscanthus dry matter yield did not differ significantly and ranged from 20.0 t·ha⁻¹ in 2010 to 21.3 t·ha⁻¹ in 2011. Virginia mallow dry matter yield depended mainly on plants density and for 20 thous. pcs·ha⁻¹ it was almost two times higher than for density of 10 thous. pcs·ha⁻¹. In the case of a lower plants density, average yield in the study did not differ significantly depending on soil quality, and amounted to 8.9 t DM·ha⁻¹ on 8th soil complex and 8.2 t DM·ha⁻¹ on 4th soil complex. On the other hand, for 20 thous. pcs·ha⁻¹ plants density, higher dry matter yield (18.5 t DM·ha⁻¹) was observed on the 5th soil complex. Yielding of examined plants species was more dependent on the weather conditions than the quality of the soil. However, with the improvement of the place quality, a smaller variance of yielding in years was observed, which may reduce production risks.

Humidity of willow biomass depending on harvest cycle ranged from 48 to 51%. On the other hand, humidity of virginia mallow (13%) and miscanthus (13%) biomass was significantly lower than the humidity of willow biomass and depended on the time of harvest. Willow biomass contained the highest amount of coal (44.5%), while in biomass of miscanthus and virginia mallow, its content was about 42–43%. Also the nitrogen content in the willow biomass acquired from annual shoots was significantly higher than in the biomass of miscanthus and virginia mallow. Because of high content of cadmium and nitrogen,

willow biomass did not meet the stringent quality standards set out in the German standard DIN 51731 for wood pellet, which may limit its use for this purpose. Macronutrient content in biomass examined plants species was slightly differentiated depending on the soil quality and the variety/clone.

The highest financial expenditure for the establishment of plantations was required in the case of miscanthus (13–17 thous. zł·ha⁻¹) and willows cultivated in each year harvest cycle (11–15 thous. zł·ha⁻¹) which depended mainly on price and the amount of seedlings. Whereas, the lowest costs are necessary for the establishment of a plantation of virginia mallow, which ranged depending on the used technology from 5 to 9 thous. zł·ha⁻¹. Cultivation of the examined plants species by using variants of technology production included in the analysis was economically effective. The lowest efficiency, regardless of the used technology, was characteristic for the cultivation of Virginia mallow and willow harvested each year. However, the highest value of the evaluated indicators was found with the cultivation of willow harvested every three years with the use of fully mechanized technology. Profitability of miscanthus cultivation was also high and, depending on the used technology, amounted from 157 to 169%. Net present value of plantations (NPV) and internal rate of return (IRR) were significantly varied both between species of plants, as well as of production technology, and directly related to the area of the plantation. The highest value of NPV and IRR indicators, regardless of the size of the plantation, was characteristic for the cultivation of willow harvested in the three-year cycle and with the use of fully mechanized technology. The lowest value of the discounted cash surplus and profitability of capital were generated in cultivation of virginia mallow. Simulated increase of yield and biomass prices mostly affected the profit increase per unit area (ha) and per t DM, and the amount of the discounted cash surplus (NPV). Reduction of production costs is a more effective way of reducing financial expenditures per unit of energy (GJ) contained in the yield, and also an increase in profitability and return of investment (IRR). Among all the analyzed scenarios, the most effective way to improve the economic efficiency of biomass production is to reduce costs.

Cultivation of the examined plants species was characterized by a favorable relationship of energy production and the expenditures on its production. Cultivation of willow harvested in three years cycle proved to be the least energy consuming and the most efficient. The least favorable values of these parameters was found with the cultivation of virginia mallow and willow harvested in each year.

Among examined plants species, the cultivation of willow harvested three years cycle was the most favorable in terms of production, economic and energy effects, while the cultivation of virginia mallow and willow harvested in each year were the least effective.

Improvement of the efficiency of biomass production on agricultural lands can be achieved mainly by increasing the scale of production (the size of the plantation) and the level of work mechanization, and by reducing production costs.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

W serii wydawniczej IUNG „**Monografie i Rozprawy Naukowe**” publikowane są recenzowane prace o charakterze monografii i oryginalne rozprawy naukowe (w tym prace habilitacyjne) z zakresu agronomii i kształtowania środowiska rolniczego.

Wydruk tekstu do recenzji czcionką 11 p., z odstępem 1,5-wierszowym.

Przygotowanie do druku:

- tekst i tabele w programie Word, wersja 6.0 lub wyższa
- czcionka – Times New Roman
- układ pracy: spis treści, wstęp, metodyka, omówienie wyników i dyskusja, wnioski lub podsumowanie, literatura, streszczenie
- objaśnienia tabel, podpisy i opisy do rysunków oraz streszczenie pracy wraz ze słowami kluczowymi w językach polskim i angielskim

tekst

- czcionka – 11 p. (spis pozycji literatury – 9 p.)
- wcięcie akapitowe – 0,5 cm

tabele

- podział na wiersze i kolumny (z funkcji tworzenia tabel)
- szerokość dokładnie 13 cm (tabele w pionie) lub 19 cm (tabele w poziomie)
- czcionka 9 p., pojedyncze odstępy międzywierszowe
- umieszczone w oddzielnych plikach

rysunki

- czarno-białe
- wykresy w programie Word lub Excel
- wymiary w zakresie 13 cm × 19 cm
- dołączony wydruk w odpowiednich wymiarach, bardzo dobrej jakości, na białym papierze lub na folii
- w podpisach czcionka 9 p.
- na dyskietce w oddzielnych plikach

jednostki miary

- system SI
- jednostki zapisywać potęgowo (np. t·ha⁻¹)

literatura

- spis literatury w układzie alfabetycznym wg nazwisk autorów, w kolejności: nazwisko (pismo rozstrzelone), pierwsza litera imienia, tytuł pracy, miejsce publikacji: tytuł wydawnictwa (wg ogólnie przyjętych skrótów tytułów czasopism), rok, numer (pismo pogrubione), strony
- cytowanie w tekście – jako nazwisko autora (autorów) i rok wydania (w nawiasach okrągłych).

Pracę do recenzji należy składać w 2 egzemplarzach. Po recenzji oryginalny egzemplarz recenzowany i ostateczną wersję pracy, uwzględniającą uwagi recenzenta i redaktora, składać do Redakcji w 1 egzemplarzu i na dyskietce (lub przesłać e-mailem) na adres:

Dział Upowszechniania i Wydawnictw
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
e-mail: kmikulska@iung.pulawy.pl

W serii wydawniczej IUNG „**Monografie i Rozprawy Naukowe**” ukazały się następujące pozycje:

1. Adam Harasim – *Kompleksowa ocena płodozmianów z różnym udziałem roślin zbożowych i okopowych*. Puławy, 2002.
2. Stanisław Wróbel – *Określenie potrzeb nawożenia buraka cukrowego mikroelementami*. Puławy, 2002.
3. Janusz Podleśny – *Studia nad oddziaływaniem światła laserowego na nasiona, wzrost i rozwój roślin oraz plonowanie łubinu białego (*Lupinus albus* L.)*. Puławy, 2002.
4. Czesław Józefaciuk, Anna Józefaciuk, Eugeniusz Nowocień, Rafał Wawer – *Przeciwerozyjne zagospodarowanie zlewni wyżynnej potoku Grodarz z uwzględnieniem ograniczania występowania powodzi*. Puławy, 2002.
5. Jerzy Księżak – *Dynamika gromadzenia składników pokarmowych w organach roślin tradycyjnych i samokończących odmian bobiku w okresie od kwitnienia do dojrzałości pełnej*. Puławy, 2002.
6. Franciszek Pistelok – *Analiza zależności pomiędzy zanieczyszczeniem ze źródeł komunalnych a jakością powierzchniowych wód płynących na obszarach silnie zurbanizowanych na przykładzie zlewni Górnej Wisły*. Puławy, 2002.
7. Ewa Stanisławska-Głubiak – *Analiza wybranych czynników determinujących efekty dolistnego nawożenia molibdenem w uprawie rzepaku ozimego*. Puławy, 2003.
8. Kazimierz Noworolnik – *Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych na plonowanie jęczmienia jarego w różnych warunkach siedliska*. Puławy, 2003.
9. Teresa Doroszevska – *Krzyżowanie oddalone i transformacja genetyczna w uzyskiwaniu odporności tytoniu (*Nicotiana tabacum* L.) na wirusa Y ziemniaka (PVY)*. Puławy, 2004.
10. Eugeniusz K. Chyłek – *Uwarunkowania procesu modernizacji rolnictwa i obszarów wiejskich w Polsce*. Puławy, 2004.
11. Zbigniew Samoń – *Studia nad metodami energooszczędnego suszenia chmielu*. Puławy, 2004.
12. Ryszard Weber – *Zmienność plonowania odmian pszenicy ozimej w zależności od przedplonu i sposobu uprawy roli*. Puławy, 2004.
13. Janusz Igras – *Zawartość składników mineralnych w wodach drenarskich z użytków rolnych w Polsce*. Puławy, 2004.
14. Mariusz Kucharski – *Odporność chwastów na herbicydy z grupy inhibitorów fotosyntezy PSII na polach uprawnych południowo-zachodniej Polski*. Puławy, 2005.

15. Maria J. Król – *Azospirillum – asocjacyjne bakterie wiążące wolny azot*. Puławy, 2006.
16. Jerzy Grabiński – *Studia nad potencjałem allelopatycznym żyta ozimego*. Puławy, 2006.
17. Krzysztof Domaradzki – *Efektywność regulacji zachwaszczenia zbóż w aspekcie ograniczenia dawek herbicydów oraz wybranych czynników agroekologicznych*. Puławy, 2006.
18. Anna Stochmal – *Flawonoidy lucerny siewnej (Medicago sativa L.) – budowa chemiczna, właściwości spektralne, zawartość w zależności od odmiany i terminu zbioru*. Puławy, 2007.
19. Tomasz Stuczyński – *Assessment and modelling of land use change in Europe in the context of soil protection*. Puławy, 2007.
20. Jolanta Korzeniowska – *Potrzeby nawożenia pszenicy cynkiem, miedzią i borem w warunkach glebowo-klimatycznych Polski*. Puławy, 2008.
21. Maria J. Król, Janusz Smagacz – *Rozkład resztek pozbiorowych w glebie*. Puławy, 2008.
22. Agnieszka Klimkowicz-Pawlas – *Oddziaływanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych na siedliskową funkcję gleby*. Puławy, 2009.
23. Janusz Czaban – *Fitogeniczne dodatki do paszy świń ze szczególnym uwzględnieniem ich roli jako zamienników antybiotykowych stymulatorów wzrostu*. Puławy, 2009.
24. Maria J. Król – *Bakterie endofityczne*. Puławy, 2009.
25. Ryszard Weber – *Przydatność uprawy konserwującej w rolnictwie zrównoważonym*. Puławy, 2010.
26. Józefa Harasim, Adam Harasim – *Produkcyjność mieszanek pastwiskowych z udziałem koniczyny białej (Trifolium repens L.) w różnych warunkach siedliskowych*. Puławy, 2010.
27. Maria J. Król – *Bakterie utleniające siarkę elementarną i redukujące siarczany*. Puławy, 2010.
28. Andrzej Doroszewski – *Skład spektralny promieniowania jako czynnik kształtujący pokrój i plon pszenicy*. Puławy, 2011.
29. Jerzy Bieńkowski – *Wielokryterialna analiza możliwości zrównoważonego rozwoju gospodarstw rolniczych z uwzględnieniem czynników środowiskowych i ekonomicznych*. Puławy, 2011.
30. Hanna Gołębiowska – *Dynamika występowania flory segetalnej w uprawie kukurydzy na Dolnym Śląsku w latach 1972–2008 i obecne możliwości jej regulacji*. Puławy, 2011.

31. Maria J. Król – *Przemiany mikrobiologiczne żelaza w glebie*. Puławy, 2011.
32. Franciszek Woch, Krzysztof Wierzbicki, Andrzej Eymontt, Anna Dziadkiewicz-Ilkowska, Alina Syp, Jerzy Kopiński, Czesław Pietruch, Mirosław Nierubca, Antoni Miklewski, Piotr Maśloch – *Efektywność gospodarcza i ekonomiczna scalania gruntów w Polsce*. Puławy, 2011.
33. Maria J. Król – *Przemiany mikrobiologiczne fosforu w glebie*. Puławy, 2012.
34. Adam Harasim – *Ocena produkcji roślinnej na gruntach ornych w gospodarstwie rolniczym w ujęciu długookresowym*. Puławy, 2012.