

PORÓWNANIE PARAMETRÓW AKTYWNOŚCI WYMIANY GAZOWEJ
ORAZ PŁONU TRZECH ODMIAN WIERZBY WICIOWEJ
(*SALIX VIMINALIS* L.) POCHODZĄCYCH Z WIELOLETNIEJ PLANTACJI

Jacek Wróbel¹, Mariola Wróbel²

¹Katedra Fizjologii Roślin i Biochemii,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ul. Słowackiego 17, 70-434 Szczecin
e-mail: jacek.wrobel@zut.edu.pl

²Zakład Botaniki i Ochrony Przyrody,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ul. Słowackiego 17, 70-434 Szczecin

Streszczenie. Celem badań przeprowadzonych w latach 2010-2012 na jednorocznych, dwu- i trzyletnich pędach trzech odmian *Salix viminalis*: Bjor, Jorr i Tora, wyrosłych z 14. 15. i 16 letnich karp, było porównanie ich pod względem aktywności procesów asymilacji i transpiracji, a także parametrów wpływających na te procesy, tj. przewodności szaprkowej, stężenia podszparkowego CO₂, fotosyntetycznego współczynnika wykorzystania wody (WUE) i chwilowego fotosyntetycznego współczynnika wykorzystania wody (WUED) oraz pod względem plonowania. Pomiary wymiany gazowej wykonano za pomocą analizatora gazu typu TPS-2 z kamerą PLC-4 (PP System, USA), pracującego w układzie otwartym. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że pędy jednoroczne odmiany Jorr wykazały się najkorzystniejszymi parametrami wymiany gazowej, zaś najslabszymi trzyletnie pędy odmiany Tora. Wysoka ogólna aktywność procesów wymiany gazowej u odmiany Jorr pozwoliła mu osiągnąć największy plon biomasy pędów, niezależnie od cyklu zbioru. Mimo zaawansowanego wieku plantacji (14-16 rok uprawy) badane odmiany wykazały się dużą produktywnością biomasy. Prawdopodobnie, ze względu na duży przyrost masy drzewnej trzyletnich pędów u odmiany Bjor, stanowiący ok. 58% całego trzyletniego przyrostu, znacząco większy niż u Jorr i Tora (ok. 50%), najkorzystniejszy dla tej odmiany byłby zbiór co 4 lata.

Słowa kluczowe: *Salix viminalis* L., fotosynteza, transpiracja, współczynniki wykorzystania wody, plon biomasy

WSTĘP

Polityka energetyczna prowadzona obecnie w Europie i na świecie wymusza na gospodarkach krajowych obowiązek zwiększania udziału odnawialnych źródeł energii w produkcji energii elektrycznej i ciepłej, a tym samym zmniejszenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery. W Polsce stanowi to duży problem ze względu na dominujący udział węgla w produkcji energii. Mimo to, w naszym kraju w ostatnich latach ilość energii uzyskiwanej ze źródeł odnawialnych (OZE) znacząco wzrosła (Stolarski i in. 2011, GUS 2009). W związku z przyjętym przez Komisję Europejską w 2007 roku tzw. pakietem energetyczno-klimatycznym, kraje Unii Europejskiej mają obowiązek zwiększenia udziału energii ze źródeł odnawialnych w zużyciu energii końcowej do 20% w 2020 r. W przypadku Polski wyznaczonym celem jest zwiększenie udziału energii wytwarzanej z OZE do 15% całkowitego zużycia energii (GUS 2009).

W Polsce, spośród wszystkich odnawialnych źródeł energii, biomasa wytwarzana głównie z drewna ma największy udział.

W Polsce w ostatnich latach XX wieku wycofano się z uprawiania znacznej części użytków rolnych, a szczególnie ubogich i lekkich gruntów ornych oraz trudnych do uprawy terenów użytków zielonych. Jednym ze sposobów zagospodarowania tych terenów jest uprawa roślin energetycznych, między innymi szybko rosnących gatunków wierzby krzewiastej (Jurczuk i in. 2010). Stwierdzono również, że biomasa produkowana przez szybko rosnące gatunki *Salix* oraz *Populus*, w różnych warunkach środowiskowych jest uważana za optymalne alternatywne źródło energii (Hall 2002, Klasnja i in. 2002, Hinchee i in. 2009, Przyborowski i in. 2012, Tworkowski i in. 2006), a zwłaszcza do ogrzewania (Kisiel i in. 2001, Stolarski i in. 2005, Stolarski i in. 2006). Wydajność i jakość zebranej biomasy można poprawić poprzez stosowanie odpowiednich technologii uprawy oraz wykorzystanie potencjału genetycznego gatunków roślin uprawianych na cele energetyczne (Stolarski i in. 2011). Według Szczukowskiego i in. (2004), Dubasa i in. (2004) oraz Przyborowskiego i Sulimy (2010) w Polsce występują bardzo korzystne warunki pogodowe i siedliskowe do uprawy wierzby energetycznej, lepsze niż w Skandynawii, gdzie uprawia się jej najwięcej.

Obecnie najczęściej uprawianym gatunkiem na cele energetyczne jest wierzba wiciowa (*Salix viminalis* L.) oraz jej formy mieszańcowe, charakteryzujące się intensywnym wzrostem, łatwością ukorzeniania sadzonek, odpornością na szkodniki i choroby oraz wysokim plonem biomasy o dużej kaloryczności (Szczukowski i in. 2004, Wu i in. 2010). Odpowiedni dobór genotypu ma ogromne znaczenie w uzyskaniu przez wiele lat oczekiwanego, wysokiego plonu. Produkcja biomasy na plantacji wierzby może przebiegać bez zakłóceń przez 20-25 lat (Szczukowski

i in. 2004). Jej zbiór następuje najczęściej w cyklach jednorocznych, dwu-, trzy- lub czteroletnich, w zależności od obsady roślin.

Wysoka produktywność wierzby wiciowej (*Salix viminalis* L.) jest warunkowana głównie jej genotypem i związanymi z nim właściwościami fizjologicznymi, szczególnie z aktywnością procesów asymilacji i transpiracji (Wróbel 2006).

Celem trzyletnich badań była porównawcza ocena aktywności procesów wymiany gazowej oraz plonowania różnych wiekowo pędów trzech odmian wierzby wiciowej pochodzących z wieloletniej plantacji uprawianej w cyklu rotacyjnym.

MATERIAŁ I METODY

Badania zostały przeprowadzone w latach 2010-2012 na wieloletniej plantacji wierzby wiciowej (*Salix viminalis* L.) założonej w roku 1997, uprawianej w 3-letnim cyklu rotacyjnym, po którym następuje zbiór biomasy pędów. Obsada roślin wynosiła ok. 20 tys. szt./ha. Cykle liczone od 1998 r., ponieważ po pierwszym roku pędy jednoroczne ścięto, w celu lepszego krzewienia się roślin w drugim roku. Plantacja o powierzchni 450 m² należąca do Katedry Fizjologii Roślin i Biochemii zlokalizowana jest na terenie przyległym do hali wegetacyjnej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Materiał biologiczny doświadczenia stanowiły trzy odmiany *Salix viminalis*: BJOR, JORR i TORA, których sadzonki (zrzezy) pochodziły z matecznej certyfikowanej plantacji Hvidsted Energy Forest w Danii. Trzyletnie badania prowadzono w piątej rotacji, na pędach: jednorocznych (14 rok uprawy – 2010 r.), dwuletnich (15 rok uprawy – 2011 r.) i trzyletnich (16 rok uprawy – 2012 r.). Plantacja *Salix viminalis* założona została na urbanoziemnej glebie antropogenicznej należącej do gleb lekkich (piasek gliniasty mocno pylasty – pgmp), o odczynie obojętnym (pH = 6,7), średniej zawartości węgla organicznego i fosforu oraz o dużej zawartości azotu ogólnego, potasu, wapnia i magnezu. Teren wegetacji wierzby charakteryzuje się wysoką średnią roczną sumą opadów – ponad 600 mm.

W czasie wegetacji odmian wierzby wiciowej: Bjor, Jorr i Tora, w pierwszych dekadach: czerwca, lipca i sierpnia w poszczególnych latach, wykonano pomiary parametrów wymiany gazowej, które obejmowały: intensywność asymilacji CO₂ netto (P_n) – μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹, intensywność transpiracji H₂O (E) - mmol H₂O·m⁻²·s⁻¹, przewodnictwo szparkowe H₂O (g_s) – mmol H₂O·m⁻²·s⁻¹, oraz podszparkowe stężenie CO₂ (c_i) - μmol CO₂·mol⁻¹powietrza. Dla każdej odmiany pomiary wykonywano w środkowej części ósmego liścia licząc od wierzchołka pędu, u dziesięciu losowo wybranych roślin. Wyniki pomiarów wymiany gazowej zostały uśrednione dla każdego roku badań.

Pomiary wykonano za pomocą analizatora gazu typu TPS-2 z kamerą PLC-4 (PP System, USA), pracującego w układzie otwartym, w którym powietrze przepuszczane było przez aparat w sposób ciągły.

Dodatkowo na podstawie ilorazu intensywności fotosyntezy do transpiracji (P_n/E) obliczono fotosyntetyczny współczynnik wykorzystania wody (WUE). Z kolei na podstawie ilorazu intensywności fotosyntezy do przewodnictwa szparkowego (P_n/g_s) obliczono chwilowy fotosyntetyczny współczynnik wykorzystania wody (WUEI).

Zbiór biomasy pędów jednorocznych, dwuletnich i trzyletnich badanych odmian wierzby dokonywano w trzeciej dekadzie stycznia: 2011, 2012 i 2013 roku na reprezentatywnej próbie 10 roślin. Plon biomasy (Y) przeliczono w kg na roślinę.

Wyniki badań dotyczące parametrów wymiany gazowej i plonu pędów oraz współczynników wykorzystania wody zostały poddane analizie statystycznej. Przeprowadzono dwuczynnikową analizę wariancji. Pierwszym czynnikiem doświadczalnym były trzy odmiany wierzby wiciowej, a drugim – wiek pędów. W celu określenia istotności interakcji i efektów głównych wykonano analizę statystyczną przy pomocy testu Duncana, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Określono grupy jednorodne. Wyniki opracowano za pomocą programu Statistica 10.

Obliczono również współczynnik korelacji liniowej Pearsona (r) pomiędzy parametrami wymiany gazowej oraz między plonem biomasy pędów a intensywnością fotosyntezy i transpiracji pędów wierzby. Gdy współczynnik korelacji (r) między tymi parametrami był istotny ($\alpha = 0,05$) lub wysoce istotny ($\alpha = 0,01$) oznaczono go odpowiednio jedną lub dwoma gwiazdkami (*, **).

WYNIKI I DYSKUSJA

Wyniki badań pomiarów wymiany gazowej u trzech odmian wierzby wiciowej oraz plonu biomasy pędów jednorocznych, dwuletnich i trzyletnich wyrosłych odpowiednio na czternastoletniej, piętnasto- i szesnastoletniej karpie przedstawiono w tabeli 1. Analiza statystyczna wykazała dużą zmienność asymilacji netto (P_n), transpiracji (E), przewodności szparkowej (g_s) i podszparkowego stężenia CO_2 (c_i) w zależności od odmiany oraz wieku pędów (tab. 1). Zdecydowanie najintensywniej asymilowały pędy jednoroczne odmiany Jorr ($11,75 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), zaś najslabiej pędy jednoroczne ($5,64 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) i dwuletnie ($6,34 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) odmiany Bjor oraz trzyletnie ($6,10 \mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) odmiany Tora. Różnice te były statystycznie istotne. U odmian Jorr i Tora intensywność asymilacji znacząco malała wraz z wiekiem pędów, natomiast u odmiany Bjor znacząco rosła.

Analiza statystyczna wykonana dla efektów głównych wykazała, że spośród badanych odmian znacząco intensywniejszym średnim natężeniem asymilacji charakteryzowała się odmiana Jorr w porównaniu z Tora i Bjor. Natomiast pędy jednoroczne istotnie intensywniej asymilowały niż pędy trzyletnie. Znaczących różnic nie stwierdzono w porównaniu z pędami dwuletnimi.

Aktywność procesów asymilacji i transpiracji w roślinach jest głównie warunkowana ich właściwościami genetycznymi i modyfikowana przez warunki siedliskowe (Starck 1999). Potwierdziły to również badania prowadzone przez Wróbla i in. (2006) nad aktywnością wymiany gazowej opisywanych odmian wierzby wiciowej, rosnących w zasolonych podłożach. Wykazali oni znaczące różnice w aktywności procesów asymilacji między genotypami, wskazując również na wyższą asymilację odmiany Jorr w porównaniu z Bjor i Tora, i to niezależnie od poziomu zasolenia. Natomiast nie wykazali istotnych różnic w natężeniu transpiracji.

Z kolei najwyższymi wartościami procesu transpiracji oraz przewodności szparkowej w niniejszych badaniach charakteryzowały się trzyletnie pędy odmiany Bjor (odpowiednio 2,56 i 183,5 mmol H₂O·m⁻²·s⁻¹). Natomiast najniższymi wartościami tych parametrów wykazały się analogiczne pędy odmiany Tora (odpowiednio: 1,56 i 121,4 mmol H₂O·m⁻²·s⁻¹), które były istotnie mniejsze w porównaniu z pozostałymi kombinacjami doświadczenia (tab. 1). W przypadku odmiany Jorr nie stwierdzono istotnych różnic dla tych dwóch parametrów między różniącymi się wiekiem pędami.

Pośród trzech badanych odmian najwyższą transpiracją i przewodnością szparkową wyróżniał się Bjor, istotnie mniejszą Tora. Nie stwierdzono statystycznych różnic w intensywności transpiracji pomiędzy pędami, a w przypadku przewodności szparkowej odmiana Tora osiągnęła istotnie mniejsze wartości niż Bjor i Jorr.

Hall i in. 1998 badając transpirację i przewodność szparkową dla trzyletnich pędów *Salix buriatica* wyrosłych na czteroletnich karpach, odnotowali bardzo wysokie wartości tych parametrów, co zostało częściowo potwierdzone w niniejszych badaniach.

Stężenie podszparkowego CO₂ było bardzo zróżnicowane w zależności od odmiany wierzby oraz wieku pędów. Najwyższe wartości tego parametru dla odmiany Bjor stwierdzono dla pędów jednorocznych (336,3 μmol CO₂·mol⁻¹), z kolei dla odmiany Jorr – dla pędów trzyletnich (310 μmol CO₂·mol⁻¹), natomiast dla odmiany Tora – dla pędów dwuletnich (308 μmol CO₂·mol⁻¹). Statystycznie najmniejsze stężenie podszparkowego CO₂ stwierdzono dla pędów trzyletnich odmiany Tora (237 μmol CO₂·mol⁻¹). Analiza dla efektów głównych wykazała, że odmiana Bjor charakteryzowała się istotnie większą koncentracją podszparkowego CO₂ niż odmiana Tora, a pędy dwuletnie większą koncentracją niż trzyletnie.

Wyniki badań własnych, dotyczących plonu świeżej biomasy pędów badanych odmian, wskazują na proporcjonalny przyrost biomasy wraz z ich wiekiem (tab. 1). Największym plonem świeżej biomasy pędów w przeliczeniu na roślinę, dla poszczególnych grup wiekowych, charakteryzowała się odmiana Jorr (1,93 kg dla jednorocznych, 3,07 kg dla dwuletnich i 6,11 kg dla trzyletnich). Przy czym istotne różnice wykazano w plonie biomasy pędów jednorocznych między odmianami Jorr a Bjor oraz trzyletnich, między odmianami Jorr a Tora. Natomiast nie wykazano znaczących różnic w plonie pędów dwuletnich.

Rozpatrując procentowy przyrost biomasy pędów wraz z ich wiekiem, to dla odmiany Bjor był zdecydowanie większy niż dla Jorr i Tora. W drugim roku wyniósł on 92%, a w trzecim aż 140%. Dla odmiany Jorr wyniósł proporcjonalnie 60 i 99%, a dla Tora – 94 i 91%.

W dostępnej literaturze jest wiele informacji na temat plonowania różnych genotypów *Salix viminalis* (Stolarski i in. 2002, Stolarski i in. 2008, Stolarski i in. 2011, Szczukowski i Budny 2003, Szczukowski i in. 2005). Jednak wielkości uzyskiwanego plonu były zróżnicowane. Zależały one przede wszystkim od odpowiedniego doboru genotypu do warunków siedliskowych oraz od odpowiedniej agrotechniki uprawy, w tym terminu i techniki zbioru.

Według tych autorów najkorzystniejszym, ze względu na przyrost biomasy pędów, jest zbiór co trzy lata, gdyż w trzecim roku obserwuje się największy przyrost masy drzewnej, stanowiący ponad 40% całego trzyletniego przyrostu.

Wyniki badań własnych to potwierdzają, gdyż w przypadku odmiany Bjor przyrost ten wyniósł ok. 58%, dla Jorr 50%, a dla Tora ok. 47%. Prawdopodobnie, ze względu na duży przyrost masy drzewnej trzyletnich pędów u odmiany Bjor (skorelowany z intensywną asymilacją), znacząco większy niż dla Jorr i Tora, najkorzystniejszy dla tego odmiany byłby zbiór co 4 lata.

Uzyskany średni plon świeżej biomasy jednorocznych, dwuletnich i trzyletnich pędów badanych odmian wyrosłych z wieloletnich karp był porównywalny (ok. 10-15% wyższy) do średniego plonu uzyskanego z analogicznych pędów różnych odmian *Salix viminalis* wyrosłych z młodych karp, tj. dwu-, trzy- i czteroletnich (Szczukowski i Budny 2003).

Z badań własnych wynika, iż odmiana Jorr ma wyższe potencjalne możliwości produkcji biomasy w porównaniu z odmianami Bjor i Tora. Zdecydowanie miała na to wpływ wysoka średnia aktywność fotosyntetyczna pędów, zwłaszcza jednorocznych i dwuletnich, a także wysoka efektywność wykorzystania wody w fotosyntezie (tab. 1 i 2). Podobnie, o wyższym przyroście biomasy trzyletnich pędów odmiany Bjor w porównaniu z Jorr i Tora, z pewnością zdecydowała ich wyższa aktywność fotosyntetyczna. Ponadto dla odmian Jorr i Bjor wykazano wysoce istotne, dodatnie zależności między wielkością plonowania a intensywnością asymilacji, co potwierdza ich wysoką produktywność.

W badaniach Górnego i Garczyńskiego (2002) oraz Jeżowskiego i in. (2009) nad różnymi roślinami należącymi do szlaku C3, dowiedziono, że genotypy o wyższych parametrach fotosyntezy plonowały lepiej.

Jak podaje Jeżowski i in. (2009), fotosyntetyczny współczynnik wykorzystania wody (WUE) determinowany jest przede wszystkim warunkami zewnętrznymi (środowiskowymi) wzrostu roślin, natomiast chwilowy fotosyntetyczny współczynnik wykorzystania wody (WUEI) uwarunkowany jest warunkami wewnętrznymi samej rośliny (genetycznymi).

Tabela 1. Średnie wartości parametrów wymiany gazowej oraz plonu biomasy pędów dla interakcji między odmianami a wiekiem pędów *Salix viminalis* L., a także dla efektów głównych, tj. odmian i pędów**Table 1.** Mean values of gas exchange parameters and yield of shoot biomass for interaction between varieties and age of shoots of *Salix viminalis* L., and for the primary effects, i.e. varieties and shoots

| Odmiana – Variety | Pędy – Shoots | Parametry wymiany gazowej – Gas exchange parameters | | | | Y Plon świeżej biomasy (kg/roślina) Yield of fresh biomass (kg/plant) |
|--|------------------------|---|--|--|---|---|
| | | P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | E ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | g_s^s ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | c_i ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$) | |
| Bjor | 1-roczne 1-year old | 5,64 d | 1,97 b | 152,3 b | 336,3 a | 1,16 e |
| | 2-letnie 2-year old | 6,34 d | 1,92 b, | 163,7 ab | 309,7 b | 2,23 cd |
| | 3-letnie 3-year old | 8,67 bc | 2,56 a | 183,5 a | 286,0 b | 5,38 ab |
| Jorr | 1-roczne 1-year old | 11,75 a | 2,27 ab | 149,0 bc | 260,3 c | 1,93 d |
| | 2-letnie 2-year old | 10,87 b | 1,87 b | 150,6 bc | 298,1 b | 3,07 c |
| | 3-letnie 3-year old | 7,80 c | 1,90 b | 145,0 bc | 310,0 b | 6,11 a |
| Tora | 1-roczne 1-year old | 10,10 b | 2,21 ab | 160,0 b | 290,3 b | 1,32 de |
| | 2-letnie 2-year old | 8,26 bc | 2,01 b | 168,7 b | 308,7 b | 2,57 c |
| | 3-letnie 3-year old | 6,10 d | 1,56 c | 121,4 d | 237,0 cd | 4,93 b |
| Średnie dla efektów głównych – Means for primary effects | | | | | | |
| Odmian Varie- ties | Bjor | 6,88 c | 2,15 a | 166,5 a | 310,7 a | 2,93 b |
| | Jorr | 10,14 a | 2,01 ab | 148,2 b | 289,5 ab | 3,70 a |
| | Tora | 8,15 b | 1,93 b | 150,03 b | 278,6 b | 2,94b |
| Pędów Shoots | 1-roczne 1-year old | 9,16 a | 2,15 a | 163,8 a | 295,6 ab | 1,47 c |
| | 2-letnie 2-year old | 8,49 ab | 1,93 ab | 161,0 a | 305,5 a | 2,62 b |
| | 3-letnie 3-year old | 7,52 b | 2,01 a | 150,0 b | 277,7 b | 5,47 a |

wartości w tabelach zaznaczone tymi samymi literami stanowią te same grupy jednorodne, tzn. nie różnią się istotnie statystycznie między sobą – values denoted with the same letters in the Table constitute homogeneous groups, i.e. do not differ statistically significantly from one another.

W tabeli 2. przedstawiono średnie wartości fotosyntetycznych współczynników wykorzystania wody (WUE i WUEI) w zależności od odmiany wierzby i wieku pędów. Na podstawie uzyskanych wyników można jednoznacznie stwierdzić, że pędy jednoroczne i dwuletnie odmiany Jorr charakteryzowały się istotnie wyższymi wartościami tych współczynników (WUE 5,18-5,81; WUEI 0,079-0,072 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$), w porównaniu z pozostałymi kombinacjami doświadczenia (WUE: od 2,86 do 4,57, WUEI: od 0,037 do 0,063 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$).

Tabela 2. Średnie wartości fotosyntetycznego współczynnika wykorzystania wody (WUE) oraz chwilowego fotosyntetycznego współczynnika wykorzystania wody (WUEI) dla interakcji między odmianą a wiekiem pędów *Salix viminalis* L., a także dla efektów głównych, tj. odmian i pędów

Table 2. Mean values of photosynthetic index of water use efficiency (WUE) and instantaneous photosynthetic index of water use efficiency (WUEI) for interaction between variety and age of shoots of *Salix viminalis* L., and for the primary effects, i.e. varieties and shoots

| Odmiana – Variety | Pędy – Shoots | WUE | WUEI |
|--|------------------------|---|----------|
| | | ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$) | |
| Bjor | 1-roczone / 1-year old | 2,86 d | 0,037 d |
| | 2-letnie / 2-year old | 3,30 c | 0,039 d |
| | 3-letnie / 3-year old | 3,38 c | 0,047 cd |
| Jorr | 1-roczone / 1-year old | 5,18 a | 0,079 a |
| | 2-letnie / 2-year old | 5,81 a | 0,072 a |
| | 3-letnie / 3-year old | 4,11 bc | 0,053 bc |
| Tora | 1-roczone / 1-year old | 4,57 b | 0,063 b |
| | 2-letnie / 2-year old | 4,01 bc | 0,049 c |
| | 3-letnie / 3-year old | 3,91 bc | 0,050 c |
| Średnie dla efektów głównych – Means for primary effects | | | |
| Odmian – Varieties | Bjor | 3,18 b | 0,041 b |
| | Jorr | 5,03 a | 0,068 a |
| | Tora | 4,16 ab | 0,054 ab |
| Pędów – Shoots | 1-roczone / 1-year old | 4,20 a | 0,060 a |
| | 2-letnie / 2-year old | 4,37 a | 0,053 a |
| | 3-letnie / 3-year old | 3,80 b | 0,050 a |

Wartości w tabelach zaznaczone tymi samymi literami stanowią te same grupy jednorodne, tzn. nie różnią się istotnie statystycznie między sobą – Values denoted with the same letters in the Table constitute homogeneous groups, i.e. do not differ statistically significantly from one another.

Dla odmian (efektu głównego) analiza statystyczna wykazała, że Jorr znacząco lepiej wykorzystywał wodę w procesie fotosyntezy niż Bjor. W przypadku pędów nie wykazano znaczących różnic w wielkości WUEI w zależności od ich wieku, natomiast wartość WUE dla pędów trzyletnich była istotnie mniejsza niż dla jednorocznych i dwuletnich.

W literaturze przedmiotu dostępne są nieliczne prace dotyczące wpływu fotosyntetycznych współczynników wykorzystania wody na produktywność różnych genotypów wierzby energetycznej. Takie badania prowadzili Wróbel (2006) oraz Wróbel i in. (2006) dla opisywanych odmian Bjor, Jorr i Tora, rosnących w zdegradowanych podłożach. Podobnie, jak w badaniach własnych istotnie wyższą wartość WUE stwierdzili dla odmiany Jorr.

Z kolei liczne są badania w tym zakresie nad innymi roślinami. Prowadzili je między innymi Jaroszewska i in. (2011), którzy dla wiśni rosnącej w warunkach stresu wodnego i pokarmowego (niedoboru) wykazali wyższe wartości fotosyntetycznego współczynnika wykorzystania wody (WUE) w porównaniu z warunkami kontrolnymi. Podobne zależności stwierdzili Olszewska i Gregorczyk (2013) dla różnych gatunków traw poddanych stresowi wodnemu. Uważa się bowiem, że decydującym czynnikiem produktywności roślin w warunkach stresowych jest współczynnik WUE (Turner 1997). Z kolei prace prowadzone przez Ziemblińską i in. (2013) nad dobowym i sezonowym przebiegiem wskaźnika wykorzystania wody w lesie sosnowym, wykazały, że może on posłużyć do oceny produktywności lasu sosnowego w zmieniającym się środowisku. Wielkości tych wskaźników były różnicowane czynnikami doświadczalnymi.

Uzyskane w badaniach własnych średnie wartości współczynników wykorzystania wody dla odmian Bjor, Jorr i Tora (tab. 2) wahały się dla WUE: od 2,8 do 5,8 a dla WUEI: od 0,07 do 0,079 i były zbliżone do wartości wskaźników otrzymanych przez wyżej cytowanych autorów. Natomiast były one zdecydowanie mniejsze (prawie 2-krotnie) od tych uzyskanych przez Jeżowskiego i in. (2009) dla różnych genotypów miskanta, należącego do szlaku fotosyntetycznego C4. Różnice te wynikają z większej asymilacji i mniejszej transpiracji oraz podobnej przewodności szparkowej miskanta w stosunku do badanych odmian wierzby, należących do innego szlaku fotosyntetycznego (C3). Generalnie rośliny C3 charakteryzują się niższą produkcją biomasy niż rośliny C4.

W badaniach własnych na podstawie uzyskanych wyników parametrów wymiany gazowej dla odmian przeprowadzono analizę korelacji prostoliniowej Pearsona. Zbadano wzajemne zależności między plonem biomasy pędów a intensywnością fotosyntezy i transpiracji oraz pomiędzy asymilacją i transpiracją a przewodnością szparkową i podszparkowym stężeniem CO₂ (tab. 3).

U wszystkich badanych odmian stwierdzono istotne, przy czym u BJOR i JORR-wysocze istotne, dodatnie zależności między plonem a asymilacją oraz transpiracją. Ponadto w niniejszych badaniach u odmian JORR i BJOR wykazano istotną ujemną korelację między asymilacją netto a stężeniem podszparkowego CO₂. Świadczy to o intensywniejszym zużywaniu międzykomórkowego CO₂ w procesie asymilacji. Jest to potwierdzeniem badań Wróbla (2006) oraz Wróbla i in. (2006), którzy wykazali takie zależności dla odmiany JORR, rosnącej na podłożach zdegradowanych. Badania Tuzet i in. (2003) dowiodły, że apertura aparatów szparkowych jest ujemnie skorelowana ze stężeniem CO₂, z tym że bezpośrednio zależy od międzykomórkowego stężenia CO₂, a nie od atmosferycznego.

Tabela 3. Wartości współczynników korelacji prostoliniowej między badanymi parametrami wymiany gazowej oraz plonem

Table 3. Values of coefficients of linear correlation between the parameters of gas exchange and the yield

| Odmiana Variety | Parametry – Parameters | | Współczynnik korelacji Correlation coefficient (r) |
|--------------------|------------------------|----------------|--|
| BJOR | Y | P _n | 0,787** |
| | Y | E | 0,692** |
| | P _n | c _i | -0,411* |
| | P _n | g _s | 0,263 |
| JORR | Y | P _n | 0,877** |
| | Y | E | 0,587* |
| | P _n | g _s | 0,334 |
| | P _n | c _i | -0,648* |
| TORA | Y | P _n | 0,638* |
| | Y | E | 0,612* |
| | P _n | g _s | 0,293 |
| | P _n | c _i | 0,231 |

(r) *istotny na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, **wysocze istotny na poziomie $\alpha = 0,01$. Oznaczenia literowe parametrów: P_n - intensywność asymilacji CO₂ netto, E - intensywność transpiracji H₂O, g_s - przewodnictwo szparkowe, c_i - podszparkowe stężenie CO₂, Y - plon biomasy,

(r) *significant at $\alpha = 0.05$, **highly significant at $\alpha = 0.01$. Letter designation of the parameters: P_n - net intensity of CO₂ assimilation, E - intensity of H₂O transpiration, g_s - stomatal conductance, c_i - sub-stomatal concentration of CO₂, Y - yield of biomass.

WNIOSKI

1. Najkorzystniejszymi parametrami wymiany gazowej decydującymi o produktywności roślin, tj. asymilacją netto, transpiracją, fotosyntetycznymi współczynnikami wykorzystania wody (WUE i WUEI) oraz efektywniejszym zużyciem międzykomórkowego CO₂ w procesie asymilacji charakteryzowała się odmiana Jorr, zwłaszcza jej pędy jednoroczne. Najmniej korzystnymi parametrami charakteryzowały się pędy trzyletnie odmiany Tora.

2. Wysoki średni plon biomasy pędów badanych odmian *Salix viminalis* uzyskany w 5-tej rotacji, czyli w 14., 15. i 16. roku uprawy świadczy o ciągłej, dużej ich produktywności, porównywalnej do innych plantacji. Wykazane różnice w plonie wynikają z cech genotypowych.

3. Wysoka aktywność procesów wymiany gazowej dla odmiany Jorr, warunkowana właściwościami genetycznymi, pozwoliła jej osiągnąć największy plon biomasy pędów, niezależnie od cyklu zbioru.

PIŚMIENNICTWO

- Dubas J.W., Grzybek A., Kotowski W., Tomczak A., 2004. Wierzba energetyczna – uprawa i technologie przetwarzania. WSEiA.
- Górny A.G., Garczyński S., 2002. Genotype and nutrition-dependent variation in water use efficiency and photosynthetic activity of leaves in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). J. Appl. Genet., 43(2), 145-160.
- GUS., 2009. Energy from Renewable Sources in 2008. Information and Statistics. GUS, Warsaw.
- Hall J.P., 2002. Sustainable production of forest biomass for energy. Forest. Chron., 7, Bytom, 138.8, 391-396.
- Hall R.L., Allen S.J., Rossier P.T.W., Hopkins R., 1998. Transpiration from coppiced poplar and willow measured using sap-flow methods. Agric. Forest Meteorol., 90, 275-290.
- Hinchee M., Rottmann W., Mullinax L., Zhang C., Chang S., Cunningham M., Pearson L., Nehra N., 2009. Short-rotation woody crops for bioenergy and biofuels applications. In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant, 45, 619-629.
- Jaroszewska A., Podsiadło C., Kowalewska R., 201. Analiza wykorzystania wody przez wiśnię w różnych warunkach wodnych i nawozowych. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 6 PAN, Kraków, 165-173.
- Jeżowski S., Głowacka K., Kaczmarek Z., 2009. Wstępna ocena głównych parametrów wymiany gazowej związanych z fotosyntezą w odniesieniu do plonowania traw energetycznych z rodzaju *Misnathus* w pierwszym roku uprawy. Acta Agrophysica, 14(1), 73-81.
- Jurczuk S., Chrzanowski S., Jaszczyński J., 2010. Plonowanie wierzby energetycznej w różnych warunkach glebowo-wodnych. Problemy Inżynierii Rolniczej, 2, 113-121.
- Kisiel R., Szczukowski S., Stolarski M., Leniec K., 2001. Wykorzystanie biomasy wierzby krzewiastej do wytwarzania energii cieplnej. Problemy Inżynierii Rolniczej 2, 65-72.
- Klasnja B., Kopitovic S., Orlovic S., 2002. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. Biomass Bioenergy, 23, 427-432.

- Olszewska M., Grzegorzczak S., 2013. Oddziaływanie stresu wodnego na wybrane gatunki traw uprawianych na glebie organicznej. *Fragm. Agron.*, 30(3), 140-147.
- Przyborowski J.A., Jędryczka M., Ciszewska-Marciniak J., Sulima P., Wojciechowicz K.M., Zenkteler E., 2012. Evaluation of the yield potential and physicochemical properties of the biomass of *Salix viminalis* × *Populus tremula* hybrids. *Ind. Crop. Prod.*, 36, 549-554.
- Przyborowski J.A., Sulima P., 2010. The analysis of genetic diversity of *Salix viminalis* genotypes as a potential source of biomass by RAPD markers. *Ind. Crops Prod.*, 31, 395-400.
- Starck Z., 1999. Niektóre aspekty zróżnicowania reakcji roślin na niekorzystne warunki środowiskowe – stare problemy, nowa interpretacja. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 469, 145-159.
- Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworowski J., 2002. Produktywność odmian wierzby krzewiastych uprawianych na gruntach ornych w zależności od częstotliwości zboru i gęstości sadzenia. *Fragm. Agron.*, 2, 39-51.
- Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworowski J., Klasa A., 2008. Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles. *Biomass Bioenergy*, 32, 1227-1234.
- Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworowski J., Kopaczek M., 2006. Production of willow (*Salix* spp.) biomass on arable land in short-term harvesting cycles. *Pol. J. Nat. Sci.* 20 (1), 53-65.
- Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworowski J., Wróblewska H., Krzyżaniak M., 2011. Short rotation willow coppice biomass as an industrial and energy feedstock. *Ind. Crop. Prod.*, 33, 217-223.
- Stolarski M.J., Wróblewska H., Cichy W., Szczukowski S., Tworowski J., 2005. Skład chemiczny oraz wartość opałowa drewna wierzby krzewiastej pozyskanego z gruntów. *Drewno*, 48(174), 5-16.
- Szczukowski S., Budny J., 2003. Wierzba krzewiasta – roślina energetyczna. *Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, Olsztyn*, 56.
- Szczukowski S., Stolarski M., Tworowski J., Przyborowski J., Klasa A., 2005. Productivity of willow coppice plants grown in short rotations. *Plant Soil Environ.*, 51, (9), 423-430.
- Szczukowski S., Tworowski J., Stolarski M., 2004. Wierzba energetyczna. *Plantpress, Kraków*, 46.
- Tuner N.C., 1997. Further progress in crop water relations. *Adv. Agron.*, 58, 293-338.
- Tuzet A., Perrier A., Leuning R., 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell Environ.*, 26, 1097-1112.
- Tworowski J., Szczukowski S., Stolarski M., 2006. Productivity and calorific value of willow (*Salix* spp.) biomass in relation to selected agronomical factors. In: *Alternative Plants for Sustainable Agriculture*. Institute of Plant Genetics, PAN, Poznań, 5, 45-50.
- Wróbel J., 2006. Kinetyka wzrostu oraz wybrane wskaźniki fizjologiczne *Salix viminalis* uprawianej na refulacji piaszczystym nawożonym osadem ściekowym. *Rozprawy nr 239, Szczecin*, 133.
- Wróbel J., Mikiciuk M., Stolarska A., 2006. Wpływ warunków zasolenia gleby na aktywność wymiany gazowej u trzech odmian wierzby wiciowej (*Salix viminalis* L.). *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 509, 269-281.
- Wu X.R., McLaren J., Madl R., Wang D.H., 2010. Biofuels from lignocellulosic biomass. *Sustain. Biotechnol.*, 19-41.
- Ziemlińska K., Urbaniak M., Danielewska A., Baran M., Juszcak R., Chojnicki B.H., 2013. Sezonowy przebieg wskaźnika wykorzystania wody (WUE) w lesie sosnowym. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 15, 2780-2798.

COMPARISON OF PARAMETERS OF GAS EXCHANGE ACTIVITY
AND YIELDS OF THREE VARIETIES OF COMMON OSIER
(*SALIX VIMINALIS* L.) FROM A MULTI-YEAR PLANTATION

*Jacek Wróbel*¹, *Mariola Wróbel*²

¹Department of Plant Physiology and Biochemistry,
West Pomeranian University of Technology in Szczecin
ul. Słowackiego 17, PL 71-434 Szczecin
e-mail: jacek.wrobel@zut.edu.pl

²Department of Botany and Nature Protection,
West Pomeranian University of Technology in Szczecin
ul. Słowackiego 17, PL 71-434 Szczecin

Abstract. The objective of the study conducted in the period of 2010-2012 on one-, two- and three-year old shoots of three varieties of *Salix viminalis*: Bjor, Jorr and Tora, grown from 14-, 15- and 16-year old rootstocks, was their comparison with regard to the processes of assimilation and transpiration, and of the parameters affecting those processes, i.e. stomatal conductance, substomatal concentration of CO₂, indices WUE and WUEI, and in terms of their yields. Measurements of gas exchange were performed with the use of the gas analyser type TPS-2 with PLC-4 camera (PP System, USA), operating on the open system. Based on the results obtained it was concluded that one-year shoots of variety Jorr were characterised by the most favourable parameters of gas exchange, while the poorest were noted for the shoots of variety Tora. The high overall activity of the processes of gas exchange of variety Jorr allowed it to achieve the highest yield of shoot biomass, irrespective of the harvest cycle. In spite of the advanced age of the plantation (14th -16th year of cultivation) the varieties studied were characterised by high biomass productivity. Probably, due to the large increase of wood matter of three-year old shoots of variety Bjor, accounting for ca. 58% of the entire three-year growth, significantly greater than in the case of Jorr and Tora (ca. 50%), for that variety a 4-year harvest cycle would be the most favourable.

Keywords: *Salix viminalis* L., CO₂ assimilation, transpiration, water use efficiency, biomass yield