

GRZEGORZ DURŁO

## Efekt zastosowania biowęgla jako składnika polepszającego właściwości retencyjne substratu torfowego

Effect of biochar application as a component improving the retention properties of peat moss substrate

### ABSTRACT

Durło G. 2018. Efekt zastosowania biowęgla jako składnika polepszającego właściwości retencyjne substratu torfowego. Sylwan 162 (10): 828-836.

Physical and chemical properties of biochar from wood biomass indicate that it can be a valuable supplement to nursery substrates, mainly to improve sorption capacity as well as nutrient and water retention. The paper presents the results of a pilot experiment on the impact of biochar on the moisture content of peat moss substrate and its retention properties. The experiment was carried out in the autumn of 2017 at the Soil Water and Environmental Science laboratory at the University of Arizona, Tucson (USA). 15 cubic decimeter of peat substrate with grain size  $\leq 2$  mm and 0.70 kg biochar, with the same grain size, obtained as a result of pyrolysis (450-500°C) from *Pinus ponderosa* Dougl. Ex C.Lawson branches. The experimental series consisted of 25 black PP containers with a volume of 265 cm<sup>3</sup> (5 replicates) filled with peat moss (control sample PM) and a mixture of peat and biochar in 10% (PMB10), 20% (PMB20), 30% (PMB30) and 50% (PMB50) share. After soaking of mixture, most of the water was retained by 50% and 30% peat samples with biochar, followed by samples in which the proportion of biochar was 20% and 10% respectively. The least water was retained by the sample with the pure peat moss substrate (PM) – on average 76.5 g which is 255.3% of the initial weight. After 96 hours the water losses were the highest in the pure peat moss samples (44.2%), while the smallest were noted in PMB30 and PMB50 samples (fig. 2b). The favourable properties of the peat and biochar mixture in the range of moisture parameters were observed. In the PWB10 series, the average moisture was 5.2% higher than the peat sample, in the PWB20 the average humidity was 7.9% higher than the PM sample, in the PWB30 and PWB50 series the differences were larger: 15.0% and 14.2% respectively (fig. 4). The significant variation in physical parameters between the individual series was confirmed as well as the assumption of variance uniformity (tab. 3, fig. 4).

### KEY WORDS

biochar, peat moss substrate, retention, container nursery

### ADDRESSES

Grzegorz Durło – e-mail: rldurlo@cyf-kr.edu.pl

Zakład Ochrony Lasu, Entomologii i Klimatologii Leśnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie;  
al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

## Wstęp

Drobnoziarnisty karbonizat o wysokiej zawartości węgla oraz niskiej podatności na rozkład jest od kilku lat uznawany za istotny element polepszający właściwości fizyczne gleb, szczególnie w zakresie zdolności sorpcyjnych oraz retencji składników pokarmowych i wody. Jest on otrzymywany w procesie pirolizy biomasy roślinnej oraz odpadów organicznych różnego pochodzenia [Ok i in. 2006; Lehmann, Joseph 2009; Verheijen i in. 2010; Thomas, Gale 2015]. Stosunkowo prosta i tania technologia produkcji biowęgla sprawia, że stanowi on doskonały materiał wykorzystywany m.in. do poprawy cech fizycznych, chemicznych i biologicznych gleb oraz podłoży organicznych stosowanych w szkółkarstwie leśnym i produkcji sadowniczej. Do jego najcenniejszych walorów zalicza się dużą reaktywność chemiczną, zdolność do wiązania węgla organicznego (ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>), zdolność wiązania makro- i mikroelementów (wspomaganie nawożenia), przyspieszanie tempa mineralizacji azotu, zwiększanie zawartości i dostępności fosforu, stabilność i odporność na rozkład biologiczny, działanie alkalizujące oraz poprawę retencji wodnej [Dumroese i in. 2001; Liang i in. 2006; Ok i in. 2006; Chan i in. 2008; Chan, Xu 2009; Laird i in. 2010; Atriola i in. 2012; Liu i in. 2013; Medyńska-Juraszek 2016; Zong i in. 2016]. Podejmowane w ostatnim czasie działania w kierunku optymalizacji produkcji szkółkarskiej na pierwszy plan wysuwają zabiegi poprawiające efektywność fertygacji oraz racjonalną gospodarkę wodną. Zagadnienia te dotyczą przede wszystkim kontenerowej technologii produkcji sadzonek, w tym przypadku bowiem zawieszono w powietrzu kasety wypełnione niewielką ilością substratu o dużej pojemności powietrznej oraz niskiej kapilarnej pojemności wodnej wymagają częstego zraszania w celu zrekompensowania niewielkiej w początkowym etapie produkcji retencji [Lamack, Niemiera 1993; Cameron i in. 2004; Durlo i in. 2018]. W tym aspekcie wydaje się, że biowęgiel pochodzący np. z odpadów drzewnych może spełnić oczekiwania szkółkarzy, a jego walory przyczynią się do zwiększenia pojemności sorpcyjnej podłoża torfowego oraz poprawy właściwości wodno-powietrznych substratu.

Celem badań było ustalenie, w jaki sposób drobnoziarnisty karbonizat wpływa na wilgotność substratu torfowego oraz jego właściwości retencyjne w zależności od zawartości biowęgla. Hipoteza badawcza zakładała, że biowęgiel korzystnie wpływa na właściwości wilgotnościowe substratu torfowego, przez co zwiększa jego potencjał retencyjny.

## Materiał i metody

W okresie od września do listopada 2017 roku w laboratorium SWES (Soil Water and Environmental Science) na Uniwersytecie Arizona w Tucson przeprowadzono eksperyment dotyczący możliwości wykorzystania biowęgla (PWB) pochodzącego z gałęzi sosnowych jako składnika substratu torfowego wykorzystywanego w kontenerowej produkcji sadzonek drzew leśnych. Do badań wykorzystano substrat torfowy o wielkości ziaren  $\leq 2$  mm, którego składnikami były w 98,68% torf wysoki, 1,18% nawóz wieloskładnikowy (N – azot amonowy plus azotan azotu, P – tlenek fosforu P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> oraz K – tlenek potasu K<sub>2</sub>O), ponadto środek zwilżający – 0,14%. Naturalny nieodkwaszony substrat torfowy charakteryzował się luźną strukturą, brązowym zabarwieniem oraz średnią wilgotnością wynoszącą 50%. W badaniach użyto łącznie ponad 15 dm<sup>3</sup> świeżego torfu (tab. 1). Jako karbonizat zastosowano biowęgiel uzyskany w wyniku pirolizy (450-500°C) z gałęzi sosny żółtej (*Pinus ponderosa* Dougl. ex C.Lawson) rosnącej na obszarze północno-wschodniej części stanu Arizona w dystrykcie północnym na terenie Coconino National Forest. Proces spalania przeprowadzono w piecu typu Woodgas Gasifier Stove<sup>®</sup> na otwartym powietrzu [Uchimiya 2006; Brever i in. 2009]. Całkowity czas spalania wyniósł 60 minut, a czas schładzania około

Tabela 1.

Właściwości fizyczne i chemiczne substratu torfowego (ST) oraz biowęgla (PWB) użytych w doświadczeniu  
Physical and chemical properties of peat moss (ST) and biochar (PWB) used in the experiment

	ST	PWB
Ciężar objętościowy [g/cm <sup>3</sup> ] Bulk density	0,353	0,131
Wielkość ziaren [mm] Particle size	1,5-2,0	1,5-2,0
N [%]	1,509	0,544
P [ppm]	1755,5	198,0
K [%]	0,5164	0,2205
Mg [%]	0,3361	0,0909
Ca [%]	1,5748	0,3790
S [%]	0,625	0,062
C [%]	46,40	77,32

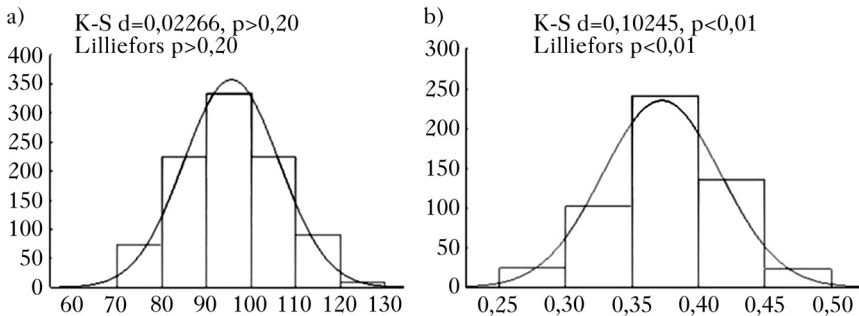
3-4 godzin. W trakcie spalania redukcja biomasy wyniosła przeciętnie 75%. Łącznie w doświadczeniu wykorzystano około 0,6 kg biowęgla o średnicy ziaren  $\leq 2$  mm (tab. 1). Przed przystąpieniem do mieszania karbonizat przesiano przez sito laboratoryjne ASTM E-11 No 10 [Brantley i in. 2015].

Pojedynczy zestaw doświadczalny składał się z 25 czarnych pojemników poliwęglanowych o objętości 265 cm<sup>3</sup> wypełnionych substratem torfowym (próba kontrolna PM) oraz mieszaną substratu i biowęgla w udziale 10% (PMB10), 20% (PMB20), 30% (PMB30) oraz 50% (PMB50). Ciężar początkowy każdej próbki wynosił 30 g. W trakcie eksperymentu każda próba została powtórzona 5 razy. Czas nawilżania materiału wynosił 24 godziny (woda zdemineralizowana), natomiast czas odsączania 96 godzin (4 dni). Średnia temperatura otoczenia (laboratorium) wynosiła 23°C ( $\pm 0,43^\circ\text{C}$ ), zaś wilgotność względna powietrza 40% ( $\pm 2,5\%$ ). Analizę właściwości chemicznych obu składników wykonano w Laboratorium Geochemii Środowiska Zakładu Ekologii Lasu i Rekultywacji UR w Krakowie przy pomocy spektrometru emisyjnego ICP OES iCAP 6000. Do pomiaru ciężaru próbek zastosowano wagę laboratoryjną OCHAUS NVT1601/1, natomiast suszenie materiału wykonano w suszarce 30AFE-LT Thomas Scientific F67. Kontrolę wilgotności substratu prowadzono przy użyciu interfejsu LQ2-LE 6391A Vernier z zestawem czujników SMS-BTA 1.02. Pomiaru prowadzono na 5 seriach (3 próbki w każdej serii) w dwóch powtórzeniach. Przed rozpoczęciem pomiarów wykonano kalibrację sond (Logger Pro 3.14.1) zgodnie z metodyką zawartą w pracach Sakakiego i in. [2008] oraz Rowlandson i in. [2013]. Mieszanie składników (3 minuty) wykonano ręcznie w sterylnym worku o wymiarach 26,8×27,3 cm serii Ziploc BBSM 500596. Kontrolę warunków otoczenia prowadzono przy użyciu dwóch precyzyjnych rejestratorów U23-001 HPV2 HOB0 Onset. Parametry fizyczne materiału wyznaczono zgodnie z metodyką zawartą w pracy Maciaka i Liwskiego [1996]. Do analizy danych wykorzystano aplikacje: HOBOWare 3.7.12 Onset, MS Excel, LoggerPro 3.14. Vernier oraz Statistica 13.1. Rozkład statystyczny danych pomiarowych był symetryczny we wszystkich analizowanych próbach oraz powtórzeniach (ryc. 1). Istotność różnic pomiędzy seriami testowano przy pomocy jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA.

## Wyniki

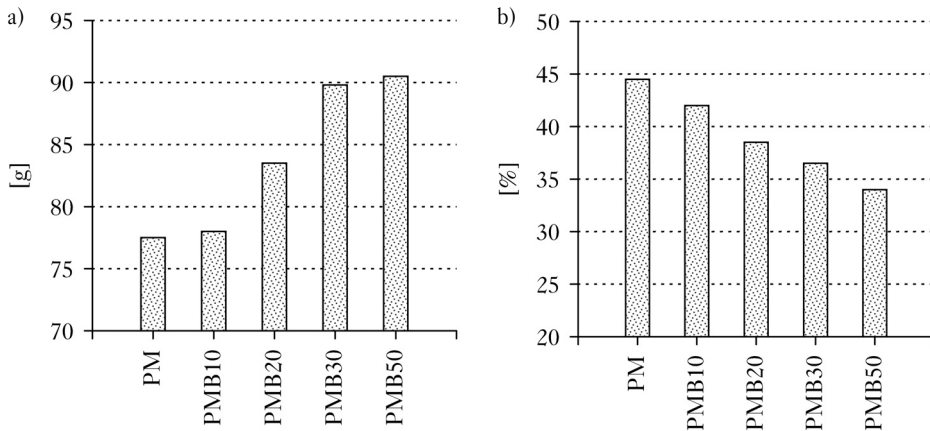
Po 24-godzinnym nasączeniu materiału stwierdzono, że najwięcej wody zatrzymały próbki torfu z biowęgłem w udziale 50 i 30%, następnie próbki, w których udział karbonizatu wynosił 20 oraz

10%. Najmniej wody zatrzymały próbki z substratem torfowym (PM), przeciętnie 76,5 g, co stanowi 255,3% ciężaru początkowego. Dla porównania – w próbce 1:1 woda stanowiła 308,7% (ryc. 2a). W trakcie doświadczenia względne różnice pomiędzy ciężarem próbek (między grupami) wraz z upływem czasu stopniowo zwiększały się i wynosiły od około 3,2% na początku doświadczenia do 17,0% na końcu (ryc. 3). Bezwzględne wartości różniły się dość znacznie. W przypadku próbki kontrolnej (PM) wynosiły przeciętnie 32%, a dla mieszaniny o wzrastającym udziale biowęglu odpowiednio 29,1, 28,0, 27,1 i 25,9%. Po upływie czterech dób ustalono, że straty wody wynikające z odcieku oraz ewaporacji łącznie były największe w przypadku próbki z substratem torfowym bez dodatku karbonizatu (PM) i wyniosły 44,2%, natomiast najmniejsze w próbkach z biowęglem o udziale 30 oraz 50% (ryc. 2b). W seriach kontrolnych uzyskano wyniki potwierdzające korzystne właściwości mieszaniny torfu i biowęglu w zakresie parametrów wilgotnościowych. W serii PWB10 średnia wilgotność była o 5,2% wyższa od próbki z torfem, w serii PWB20 o 7,9% wyższa, a w seriach PWB30 i PWB50 różnice były większe i wynosiły odpowiednio 15,0 oraz 14,2% w stosunku do próby kontrolnej (tab. 2, ryc. 4).



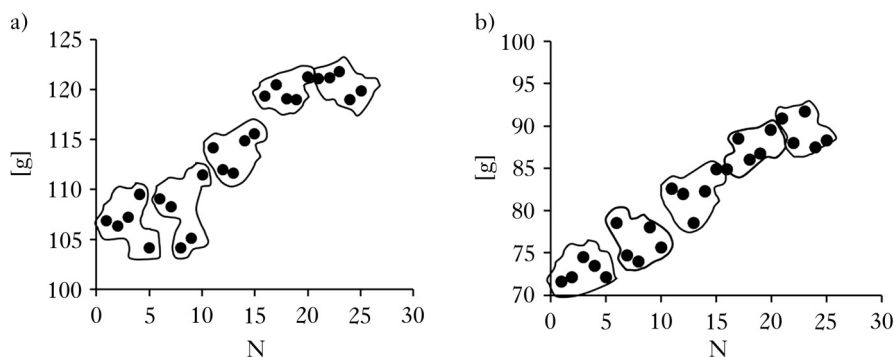
**Ryc. 1.**

Rozkład ciężaru [g] (a) i gęstości objętościowej materiału [g/cm<sup>3</sup>] (b)  
Distribution of the substrate weight [g] (a) and bulk density [g/cm<sup>3</sup>] (b)



**Ryc. 2.**

Ilość wody zatrzymanej [g] (a) oraz udział [%] wody utraconej w wyniku ewaporacji i odsiaku łącznie (b) w próbkach podłoża torfowego (PM) oraz z dodatkiem biowęglu (PMB)  
Amount of retained water [g] (a) and water loss [%] as a result of evaporation and percolation together (b) in peat substrate samples (PM) and with biochar (PMB)



Ryc. 3.

Rozkład ciężaru próbek [g] na początku (a) i na końcu (b) doświadczenia

Distribution of average samples weight [g] at the beginning (a) and at the end (b) of the experiment

Tabela 2.

Średnia  $\pm$ odchylenie standardowe wilgotność [%] substratu torfowego w trakcie doświadczenia w próbkach kontrolnych (PM) oraz z dodatkiem biowęglu (PMB)

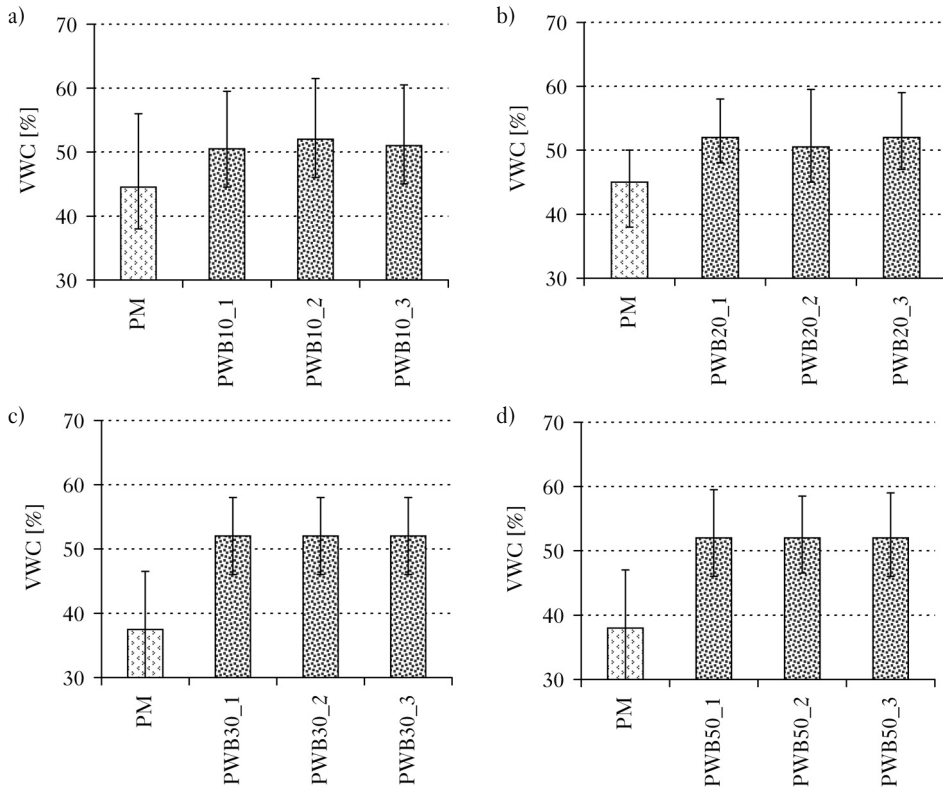
Average  $\pm$ standard deviation moisture content [%] of peat substrate during the experiment in control samples (PM) and with biochar (PMB)

	PM	PMB10	PMB20	PMB30	PMB50
Wilgotność substratu	66,49 $\pm$ 3,00	67,84 $\pm$ 2,83	69,37 $\pm$ 2,79	70,37 $\pm$ 2,38	70,55 $\pm$ 2,56
Gravimetric moisture					
Wilgotność objętościowa	39,80 $\pm$ 5,20	48,30 $\pm$ 4,61	51,05 $\pm$ 3,21	51,47 $\pm$ 3,28	51,15 $\pm$ 2,56
Volumetric moisture content					

W przypadku ciężaru próbek średnie różniły się istotnie, z wyjątkiem grup PBM30 i PMB50 (RIR Tukeya  $p=0,29986$ ). W przypadku wilgotności założenie jednorodności wariancji zostało potwierdzone we wszystkich grupach (tab. 3, ryc. 4).

## Dyskusja

Przyjęta na wstępie hipoteza badawcza została zweryfikowana pozytywnie, okazało się bowiem, że wzrost zawartości karbonizatu w substracie torfowym zwiększał jego wilgotność już od momentu zakończenia fazy nasączenia aż do chwili zakończenia eksperymentu, tj. po czterech dobach. Zauważono korzystne właściwości mieszanki już w serii z dodatkiem 10% biowęglu (PMB10). Dalsze zwiększenie proporcji powodowało wzrost retencji wody głównie w początkowym okresie, co potwierdza, jak duży potencjał posiada badany materiał i jakie daje możliwości w zakresie przygotowywania podłoża szkółkarskiego. Na podobne zależności zwracają uwagę Brye [2003], Novak i in. [2009] oraz Brantley i in. [2016], którzy w doświadczeniach stosowali biowęgiel uzyskany z biomasy drzewnej zmieszany z glebą mineralną w warunkach polowych. Badacze przyznają jednak, że wzrost retencji wody w glebie jest funkcją wielu zmiennych, m.in. jakości karbonizatu (sposób wytworzenia, pyroliza), składu chemicznego, stopnia rozdrobnienia oraz sposobu zmieszania z materiałem podstawowym. To dowodzi, że warunki początkowe doświadczeń z biowęglem mają kluczowe znaczenie w procesie badawczym i decydują o ostatecznym rezultacie. Z kolei Abel i in. [2013] podobne doświadczenie z biowęglem i glebą piaszczystą przeprowadzili w warunkach polowych. Pomimo iż udział biowęglu był znacznie mniejszy, bo wynosił od 1 do 5%, uzyskano dobre efekty w postaci zmniejszenia gęstości objętościowej, zwiększenia


**Ryc. 4.**

Średnia (słupki)  $\pm$  odchylenie standardowe (wąsy) wilgotność objętościowa substratu [%] w seriach kontrolnych PMB10 (a) PMB20 (b) PMB30 (c) i PMB50 (d)

Average (bar)  $\pm$  standard deviation (whisker) volumetric moisture content [%] of the peat substrate in the control series PMB10 (a), PMB20 (b), PMB30 (c) and PMB50 (d)

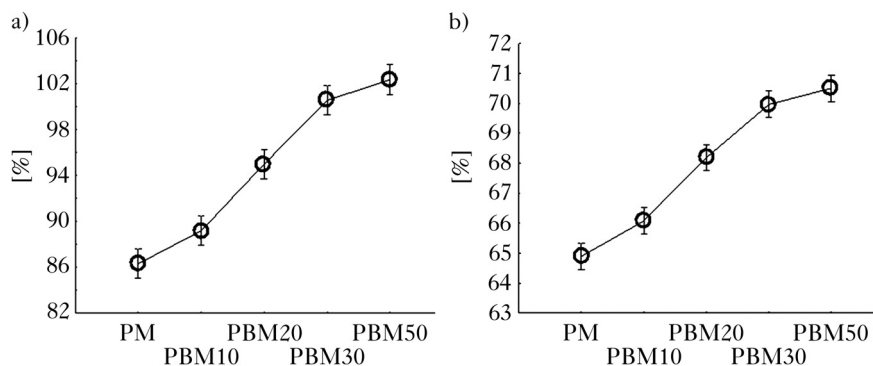
**Tabela 3.**

Analiza wariancji ciężaru [g] oraz wilgotności grawimetrycznej [%] substratu torfowego (PM) oraz mieszaniny torfu z biowęglem (PMB)

ANOVA for weight [g] and gravimetric moisture [%] peat moss (PM) and peat with biochar (PMB)

		SSA	SSR	MSA	MSR	F	p
Ciężar	ANOVA	32090,04	58657,61	6022,51	71,530	112,151	<0,001
Weight	Lavene	17,744	16929,49	4,436	20,645	0,214	0,930
Wilgotność grawimetryczna	ANOVA	3868,083	6886,343	996,520	8,397	115,089	<0,001
Gravimetric moisture	Lavene	89,619	1935,985	22,404	2,360	9,489	<0,001

całkowitej objętości porów, jak również zwiększenia zawartości wody w próbkach gleby. Z publikacji Brockhoffa i in. [2010] wynika, że efekt dodania biowęglu do podłoża przygotowanego z gleby piaszczystej oraz darni zwiększa dość wyraźnie potencjał retencyjny mieszaniny. Udział karbonizatu w ilości 25% pozwolił na zatrzymanie ponad 260% więcej wody aniżeli w próbce pozbawionej biowęglu. Dalszy wzrost jego zawartości dał rezultat w postaci związania 350% wody w stosunku do próby kontrolnej. Większość autorów zwraca także uwagę na korzystny wpływ biowęglu na gospodarkę azotową roślin, zatrzymywanie makroelementów, poprawę odżywienia roślin (szczególnie w początkowym okresie ich wzrostu), a także korzystny efekt oczyszczający,



Ryc. 5.

Średnia (okrąg) i 95-procentowy przedział ufności (wąs) ciężaru [%] (a) i wilgotności [%] (b) w próbkach substratu torfowego (PM) oraz mieszaniny torfu i biowęgla (PMB)

Average (circle) and 95% confidence interval (whiskers) for weight [%] (a) and moisture [%] (b) in peat moss (PM) and mixture of peat and biochar (PMB) samples

tj. zmniejszenie zasolenia gleb oraz koncentracji metali ciężkich [Chan i in. 2008; Sohi i in. 2010; Atriola i in. 2012; Di Lonardo i in. 2017]. Wyniki te wskazują, że w niedługim czasie biowęgla może okazać się niezwykle cennym składnikiem różnego rodzaju podłoża wykorzystywanych do produkcji roślin w szerokim zakresie. W Polsce bardzo dobre efekty fenotypowe uzyskano w halach vegetacyjnych w trakcie produkcji roślin warzywnych na podłożu z dodatkiem karbonizatu pochodzącego z biomasy roślinnej [Medyńska-Juraszek 2016].

Z powyższych doniesień wynika, że podłoże szkółkarskie wzbogacone biowęgłem może utrzymywać korzystne warunki wilgotnościowe w pojemnikach z substratem dłużej niż stosowane dotychczas (torf wysoki z dolomitom), co może mieć duże znaczenie w okresie suszy atmosferycznej i przy ograniczonych zasobach wody. Możliwość uzyskania podłoża szkółkarskiego o lepszych parametrach jakościowych, przy jednoczesnej oszczędności drogiego i pożądanego na krajowym rynku torfu, stanowi atrakcyjną ofertę dla leśników. Biorąc pod uwagę aktualne zapotrzebowanie na substrat torfowy przeznaczony do szkółek kontenerowych PGL LP, może się okazać, że biowęgla pochodzący np. ze zrębków sosnowych (których dostępność na krajowym rynku zwiększyła się w ostatnim czasie) obniży koszty produkcji, a tym samym jednostkowa cena sadzonki z zakrytym systemem korzeniowym może okazać się niższa. Dla potwierdzenia tej tezy należy jednak przeprowadzić szczegółowe badania w warunkach terenowych z wykorzystaniem wszystkich rodzajów pojemników.

## Podsumowanie

Kompozycja mieszaniny substratu torfowego i biowęgla cechuje się korzystnymi właściwościami wilgotnościowymi. Uzyskano bardzo dobre efekty w postaci zwiększonej retencji oraz poprawy wilgotności w mieszaninach z biowęgłem, od 10 do 50% zawartości. Bardzo dobre rezultaty uzyskano w trakcie analizy ubytków wody z pojemników, bowiem po upływie 96 godzin w próbkach z biowęgłem były one nawet o 11% niższe od próby kontrolnej. Średnia wilgotność kompozycji torfu i karbonizatu była w badanym materiale wyższa nawet o 14% i więcej w stosunku do wilgotności czystego substratu torfowego. Otrzymane wyniki wskazują, że istnieją uzasadnione przesłanki do praktycznego wykorzystania drobnoziarnistego karbonizatu w produkcji podłoża szkółkarskiego o zmodyfikowanej formule.

## Podziękowania

Składam podziękowania JM Rektorowi Uniwersytetu Rolniczego im. H. Kołłątaja w Krakowie za sfinansowanie stypendium na Uniwersytecie Arizyna w Tucson, USA. Dziękuję prof. Janickowi Atriola, kierownikowi Water and Environmental Science Laboratory CALS UA, za udostępnienie laboratorium i aparatury badawczej oraz Pani doktor Lois Wardell za pomoc i współpracę w ramach projektu. Dziękuję również Panu prof. Stanisławowi Małkowi, kierownikowi Zakładu Ekologii Lasu i Rekultywacji UR w Krakowie, za pomoc w analizie chemicznej materiału doświadczalnego.

## Literatura

- Abel S., Peters A., Trinks S., Schonsky H., Facklam M., Wessolek G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma* 202-203: 183-191. doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003
- Atriola J., Rasmussen C., Freitas R. 2012. Effects of a biochar-amended alkaline soil on the growth of romaine lettuce and bermudagrass. *Soil Sci.* 177 (9): 561-570.
- Brantley K. E., Brye K. R., Savin M. C., Longer D. E. 2016. Biochar source and application rate effects on soil water retention determined using wetting curves. *Soil Sci.* 5: 1-10. doi.org/10.4236/ojss.2015.51001
- Breuer C. E., Schmidt-Rohr K., Satorio J. A., Brown R. C. 2009. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification system. *Envir. Prog. Sustain. Energ.* 28: 386-396.
- Brockhoff S. R., Christians N. E., Killorn R. J., Horton R., Davis D. D. 2010. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. *Agron. Journ.* 102 (6): 1627-1631.
- Brye K. R. 2003. Long-term effects of cultivation on particle size and water-retention characteristics determined using wetting curves. *Soil Sci.* 168: 459-468. doi.org/10.1097/01.ss.0000080331.10341.36
- Cameron R. W., Wilkinson S., Davies W. J., Harrison-Murray R. S., Dunstan D., Burgess C. 2004. Regulation of plants growth in container grown ornamentals through the use of controlled irrigation. *Acta Hort.* 630: 305-312.
- Chan K. Y., Van Zwieten L., Meszaros I. A., Downie A., Joseph S. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Res.* 46: 437-444.
- Chan K. Y., Xu Z. 2009. Biochar: nutrient properties and their enhancement. W: Lehmann J., Joseph S. [red.]. *Biochar for environmental management: science and technology.* Earthscan, London, UK. 67-84.
- Di Lonardo S., Baronti S., Vaccari F. P., Albanese L., Battista P., Miglietta F., Bacci L. 2017. Biochar-based nursery substrates: The effect of peat substitution on reduced salinity. *Urb. For. Urb. Gard.* 23: 27-34. doi.org/10.1016/j.ufug.2017.02.007
- Dumroese R. K., Heiskanen J., Englund K., Tervahauta A. 2001. Pelleted biochar: chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biom. Bioen.* 35 (5): 2018-2027.
- Durlo G., Jagiełło-Leńczuk K., Kormanek M., Małek S., Banach J. 2018. Supplementary irrigation at container nursery. *For. Lett.* 79 (1): 13-21. doi.org/10.2478/frp-2018-0002
- Laird D., Fleming P., Davis D., Horton R., Wang B., Karlen D. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158: 443-449.
- Lamack W. F., Niemiera A. X. 1993. Application method affects water application efficiency of spray stake-irrigated containers. *Hort. Sci.* 28: 6625-6627.
- Lehmann J., Joseph S. 2009. *Biochar for environmental management: science and technology.* Earthscan, London, UK.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J. O., Thies J., Luizão F. J., Peterson J., Neves E. G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1719-1730.
- Liu X., Zhang A., Ji C., Joseph S., Bian R. L., Li L. 2013. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions – A meta-analysis of literature data. *Plant and Soil.* 373: 583-594.
- Maciak F., Liwski S. 1996. *Ćwiczenia z torfoznawstwa.* Wyd. SGGW, Warszawa.
- Medyńska-Juraszek A. 2016. Biowęgiel jako dodatek do gleb. *Soil. Sci. Ann.* 67 (3): 151-157. doi.org/10.1515/ssa-2016-0018
- Novak J. M., Lima I., Xing B., Gaskin J. W., Steiner C., Das K. C., Ahmedna M., Rehrah D., Watts D. W., Busscher W. J., Schomberg H. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Ann. Envir. Sci.* 3: 195-206.
- Ok Y. S., Uchimiya S. M., Chang S. X., Bolan C. N. [red.]. 2006. *Biochar: production, characterization, and applications.* CRC Press. Tylor & Francis Group.
- Rowlandson T. L., Berg A. A., Bullock P. R., RoTimi Ojo E., McNairn H., Wiseman G., Cosh M. H. 2013. Evaluation of several calibration procedures for a portable soil moisture sensor. *Journ. Hydrol.* 498: 335-344. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.021



- Sakaki T., Limsuwat A., Smits K. M., Illangasekare T. H. 2008. Empirical two-point  $\alpha$ -mixing model for calibrating the ECH<sub>2</sub>O EC-5 soil moisture sensor in sands. *Water Resour. Res.* 44, W00D08. doi.org/10.1029/2008WR006870
- Sohi S., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Adv. Agron.* 105: 47-82.
- Thomas S. C., Gale N. 2015. Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests*: 1-16. doi.org/10.1007/s11056-015-9491-7
- Uchimiya S. 2006. Biochar production, technology. W: Ok Y. S., Uchimiya S. M., Chang S. X., Bolan C. N. [red.]. Biochar: production, characterization, and applications. CRC Press. Tylor & Francis Group.
- Verheijen F., Jeffery S., Bastos A. C., van der Velde M., Diafas I. 2010. Biochar application to soils. *JCR Sci. Tech. Rep.* 55799. doi.org/10.2788/472
- Zong Y., Xiao Q., Lu S. 2016. Acidity, water retention, and mechanical physical quality of a strongly acidic ultisol amended with biochars derived from different feedstocks. *Journ. Soils Sedim.* 16 (1): 177-190.