



Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

w Warszawie

Instytut Nauk Ogrodniczych

mgr inż. Mariusz Przemysław Pożoga

**Sposoby rozmnażania roślin ozdobnych
metodą *in vitro*, a efektywność kosztowa
i organizacyjna**

In vitro methods of ornamental plant propagation and their cost
and organizational effectiveness

Rozprawa doktorska

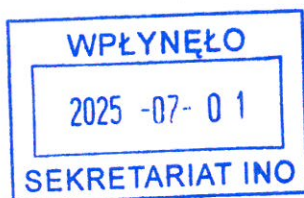
Doctoral thesis

Rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem

Dr. hab. Dawida Olewnickiego

Katedra Sadownictwa i Ekonomiki Ogrodnictwa

Instytut Nauk Ogrodniczych



Warszawa 2025

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora.

Data 01.07.2025.....

Czytelny podpis promotora .....

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadom/a odpowiedzialności prawnej, w tym odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia, oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. z dnia 28 października 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 2509 ze zm.)

Oświadczam, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej podstawą żadnej procedury związanej z uzyskaniem stopnia naukowego doktora.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Przyjmuję do wiadomości, że rozprawa doktorska poddana zostanie procedurze antyplagiatowej.

Data 01.07.2025.....

Czytelny podpis autora rozprawy Pojana Marian.....

Spis treści

PUBLIKACJE BĘDĄCE PODSTAWĄ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	11
LISTA SKRÓTÓW	12
WSTĘP	13
1. PRZEGLĄD LITERATURY	14
1.1. Metoda <i>in vitro</i> w rozmnażaniu roślin – historia i znaczenie.....	14
1.2. Bioreaktory w produkcji roślinnej.....	15
1.3. Uwarunkowania kosztowe i organizacyjne produkcji <i>in vitro</i>	17
1.4. Organizacja pracy w funkcjonowaniu przedsiębiorstwa produkującego rośliny metodą <i>in vitro</i>	18
2. CEL BADAŃ I HIPOTEZY BADAWCZE	20
3. MATERIAŁ I METODY	21
3.1. Analiza ekonomiczno-finansowa przedsiębiorstw produkujących rośliny metodą <i>in vitro</i>	23
3.2. Badania empiryczne obejmujące organizację pracy i metody mikrorozmnażania	24
3.2.1. Efektywność mikrorozmnażania i struktura kosztów produkcji <i>Paulownia tomentosa</i> × <i>Paulownia fortunei</i> w warunkach <i>in vitro</i>	24
3.2.2. Organizacja dnia pracy w laboratorium kultur tkankowych.....	25
3.2.3. Wpływ rodzaju pożywki i systemu uprawy na efektywność multiplikacji i ukorzenia <i>Pennisetum</i> × <i>advena</i> ‘Rubrum’	26
3.2.4. Analiza kosztów i wydajności mikrorozmnażania <i>Pennisetum</i> × <i>advena</i> ‘Rubrum’ przy użyciu systemu TIS i metody agarowej	26
3.2.5. Analiza statystyczna.....	27
4. WYNIKI I DYSKUSJA	28
4.1. Analiza ekonomiczno-finansowa przedsiębiorstw produkujących rośliny metodą <i>in vitro</i> w latach 2018–2021.....	28
4.2. Określenie struktury kosztów zmiennych produkcji roślin <i>in vitro</i> na pożywkach agarowych.....	30
4.3. Wpływ organizacji dnia pracy na wydajność pracowników przy rozmnażaniu roślin <i>in vitro</i>	31
4.4. Mikrorozmnażanie roślin.....	33
4.4.1. Porównanie pożywek i warunków fizycznych w mikrorozmnażaniu <i>Paulownia tomentosa</i> × <i>Paulownia fortunei</i>	33
4.4.2. Optymalizacja procesu mikrorozmnażania i ukorzenia <i>Pennisetum</i> × <i>advena</i> ‘Rubrum’ – porównanie agarowych kultur <i>in vitro</i> i TIS.....	34
4.5. Porównanie kosztów produkcji <i>Pennisetum</i> × <i>advena</i> ‘Rubrum’ w kulturach agarowych i TIS	36
5. WNIOSKI I REKOMENDACJE	38
6. SPIS LITERATURY	40
7. ARTYKUŁY NAUKOWE I OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW	48

STRESZCZENIE

Celem rozprawy doktorskiej jest analiza efektywności kosztowej, organizacyjnej i metod produkcji roślin ozdobnych metodą *in vitro*. Dokonano oceny kondycji ekonomiczno-finansowej wybranych przedsiębiorstw zajmujących się mikrorozmnażaniem, działających w zmiennych warunkach rynkowych w latach 2018–2021. Wykazano, że mimo wyzwań związanych z rosnącymi kosztami, badane podmioty utrzymały stabilność finansową, co wskazuje na potencjał dalszego rozwoju branży. Wykonano szczegółową analizę struktury kosztów zmiennych w produkcji roślin metodą *in vitro*. Wykazano, że największy udział w kosztach zmiennych stanowią koszty pracy, co uzasadnia potrzebę optymalizacji organizacji pracy w laboratoriach. Przeprowadzone badania nad różnymi modelami organizacji dnia pracy wykazały, że najwyższą produktywność osiąga się przy sześciogodzinnym nieprzerwanym cyklu pasażowania roślin, rozpoczynającym się od pierwszej godziny pracy. Wyniki te stanowią podstawę do sformułowania rekomendacji dotyczących zwiększenia efektywności pracy zespołów laboratoryjnych. W pracy opracowano także protokoły mikrorozmnażania dwóch gatunków: *Paulownia tomentosa* × *P. fortunei* oraz *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’. W przypadku *Paulownia tomentosa* × *P. fortunei* uzyskano wysoką efektywność mikrorozmnażania i ukorzeniania przy jednoczesnym zredukowaniu kosztów produkcji poprzez modyfikację warunków fizycznych. W przypadku *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’ zastosowano zarówno klasyczne kultury agarowe, jak i system bioreaktora okresowego-zalewowego (TIS), wskazując jednoznacznie na większą efektywność metody TIS pod względem liczby otrzymanych roślin i czasu produkcji. Ostatecznie przeprowadzono porównanie kosztów zmiennych dla obu sposobów mikrorozmnażania. TIS okazał się bardziej efektywny kosztowo, oferując niższe koszty produkcji oraz większą wydajność. Uzyskane wyniki potwierdzają, że wdrożenie technologii TIS, w połączeniu z optymalną organizacją pracy, może zwiększyć rentowność produkcji roślin metodą *in vitro*.

Słowa kluczowe: *in vitro*, mikrorozmnażanie, koszty zmienne, TIS, organizacja dnia pracy.

SUMMARY

The aim of the doctoral dissertation is to analyze the cost-effectiveness, organizational efficiency and methods of production of ornamental plants using the *in vitro* method. The economic and financial condition of selected tissue culture companies operating in changing market conditions in 2018–2021 was assessed. It was shown that despite the challenges related to rising costs, the entities studied maintained financial stability, which indicates the potential for further development of the industry. A detailed analysis of the structure of variable costs in the production of plants using the *in vitro* method was performed. It was shown that labour costs account for the largest share of variable costs, which justifies the need to optimize the organization of work in laboratories. The studies conducted on various organizational models of the working day showed that the highest productivity is achieved with a six-hour uninterrupted cycle of plant passage, starting from the first hour of work. These results constitute the basis for formulating recommendations on increasing the efficiency of laboratory teams. The paper also developed protocols for micropropagation of two species: *Paulownia tomentosa* × *P. fortunei* and *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’. In the case of *Paulownia tomentosa* × *P. fortunei*, high efficiency of micropropagation and rooting was achieved while reducing costs by modifying physical conditions. In the case of *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’, both agar cultures and the temporary immersion system (TIS) were used, clearly indicating the superiority of the TIS method in terms of the number of plants obtained and production time. Finally, a comparison of variable costs for both micropropagation methods was carried out. TIS turned out to be more cost-effective, offering lower production costs and higher efficiency. The obtained results confirm that the implementation of TIS technology combined with optimal work organization can increase the profitability of *in vitro* plant production.

Keywords: *in vitro*, micropropagation, variable costs, TIS, workday organisation.

**PUBLIKACJE BĘDĄCE PODSTAWĄ ROZPRAWY
DOKTORSKIEJ**

1. **Požoga M.**, Cichočka K., Olewnicki D. 2024. Ocena kondycji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstw produkujących rośliny metodami *in vitro*. *Marketing i Rynek*, (11), 23–37. <https://doi.org/10.33226/1231-7853.2024.11.3>
2. **Požoga M.**, Olewnicki D., Jabłońska L. 2019. *In vitro* propagation protocols and variable cost comparison in commercial production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* hybrid as a renewable energy source. *Applied Sciences*, 9(23), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app9112272>
3. **Požoga M.**, Olewnicki D. 2023. The impact of the organization of the working day on production efficiency in the laboratory of plant tissue cultures. *Scientific Papers of Silesian University of Technology – Organization and Management Series*, (170), 1–10. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.170.25>
4. **Požoga M.**, Olewnicki D., Wójcik-Gront E., Latocha, P. 2023. An efficient method of *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’ plantlets production using the temporary immersion bioreactor systems and agar cultures. *Plants*, 12(1534), 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants12081534>
5. **Požoga M.**, Olewnicki D., Latocha P. 2024. A temporary immersion system as a tool for lowering planting material production costs using the example of *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’. *Agriculture*, 14(1177), 1–14. <https://doi.org/10.3390/agriculture14061177>

Sumaryczna punktacja MNiSW: 410

Sumaryczny IF: 9,66

LISTA SKRÓTÓW

BAP – 6-benzyloaminopuryna

IBA – kwas indolo-3-masłowy

MS – pożywka Murashige i Skoog (1962)

NAA – kwas naftalenoctowy

TIS – bioreaktor okresowo-zalewowy

WSTĘP

Współczesne rolnictwo i ogrodnictwo stoją przed koniecznością wdrażania nowoczesnych i wydajnych metod rozmnażania roślin, odpowiadających na rosnące zapotrzebowanie rynku na zdrowy, jednorodny i wolny od patogenów materiał roślinny. Jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin w tym zakresie są kultury *in vitro*, pozwalające na całoroczne, niezależne od warunków pogodowych, rozmnażanie roślin w kontrolowanym środowisku laboratoryjnym. Techniki te wykorzystywane są z powodzeniem, zarówno w produkcji roślin ozdobnych, użytkowych, jak i leczniczych, umożliwiając ich szybkie namnażanie oraz eliminację patogenów.

W odpowiedzi na potrzebę zwiększenia wydajności oraz automatyzacji procesów mikrorozmnażania, coraz większe zainteresowanie budzą systemy bioreaktorowe. Szczególnie obiecującym rozwiązaniem są bioreaktory okresowo-zalewowe (TIS – Temporary Immersion Systems), które pozwalają na cykliczne zanurzenie eksplantatów w pożywce, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej wymiany gazowej. Dodatkowo, TIS umożliwiają produkcję większej liczby sadzonek na mniejszej przestrzeni, skracają cykl produkcyjny i ułatwiają standaryzację procesów.

Pomimo widocznych korzyści produkcja roślin metodą *in vitro* napotyka liczne bariery, głównie natury ekonomicznej. Rosnące koszty energii elektrycznej, będącej niezbędnym elementem utrzymania ciągłości pracy laboratoriów *in vitro*, w znacznym stopniu wpływają na opłacalność całego procesu. Równocześnie, laboratoria mierzą się z trudnościami kadrowymi — brak wykwalifikowanych pracowników, wysoka rotacja personelu oraz rosnące koszty zatrudnienia stanowią poważne wyzwania dla stabilności produkcji. Wymusza to poszukiwanie rozwiązań, które nie tylko zwiększą wydajność mikrorozmnażania, ale również pozwolą ograniczyć zależność produkcji od zasobów ludzkich i energetycznych.

1. PRZEGLĄD LITERATURY

1.1. Metoda *in vitro* w rozmnażaniu roślin – historia i znaczenie

Rozmnażanie roślin metodą *in vitro* jest zaawansowaną technologią, która jest bardzo popularna z uwagi na rosnące zapotrzebowanie na rośliny o jednolitej strukturze genetycznej i doskonałej jakości. Technika ta umożliwia efektywne rozmnażanie materiału roślinnego wolnego od chorób, co ma kluczowe znaczenie dla wielu dziedzin rolnictwa i ogrodnictwa. Początki kultur *in vitro* sięgają wczesnych lat XX wieku, kiedy to niemiecki fizjolog Gottlieb Haberlandt, w 1902 roku, zaproponował ideę hodowli komórek roślinnych w sztucznych warunkach. Był pionierem w izolacji pojedynczych komórek roślinnych różnych gatunków oraz ich wzrostu w laboratorium. Niestety, mimo tych przełomowych badań, badaczowi nie udało się osiągnąć podziałów komórkowych (Haberlandt 1902). Dzięki swojej wizjonerskiej pracy oraz rozprawom naukowym dotyczącym warunków hodowli *in vitro*, Haberlandt zyskał tytuł „ojca kultur tkankowych”. Kolejnym ważnym krokiem w rozwoju tej technologii była izolacja auksyny – pierwszego fitohormonu, którego dokonał F.W. Went w 1928 roku (Yoshio i Seiichiro 2000). Przełomem było również opracowanie przez Murashige i Skooga w 1962 roku składu pożywki MS, zawierającej makro- i mikroelementy, która do dziś jest powszechnie stosowana w kulturach *in vitro* (Murashige i Skoog 1962). Te osiągnięcia umożliwiły dynamiczny rozwój technik mikrorozmnażania, które szybko znalazły zastosowanie w komercyjnym rozmnażaniu roślin na masową skalę. Technologia *in vitro* znajduje zastosowanie nie tylko w mikrorozmnażaniu, ale także w takich procesach, jak hodowla nowych odmian roślin poprzez poliploidyzację (Escandon i in. 2006) czy hodowlę podwojonych haploidów (Chaikam i in. 2020). Używana jest również w ochronie zagrożonych gatunków (Sarasan i in. 2006), eliminacji wirusów (Wang i in. 2018) oraz w produkcji związków bioaktywnych z wykorzystaniem korzeni włośnikowatych (Kareem i in. 2019, Kowalczyk i in. 2020).

Biorąc pod uwagę powyższe, najważniejszą jednak rolę kultury *in vitro* pełnią w produkcji roślinnej. Wzrost konkurencji na rynku roślin wymusił konieczność poszukiwania innowacyjnych i bardziej efektywnych rozwiązań, takich jak bioreaktory, które pozwalają na obniżenie kosztów i zwiększenie efektywności.

1.2. Bioreaktory w produkcji roślinnej

Bioreaktory w produkcji roślin *in vitro* są kluczowym narzędziem umożliwiającym masową produkcję zdrowych roślin w kontrolowanych warunkach, co jest istotne zarówno w badaniach naukowych, jak i w komercyjnej produkcji materiału roślinnego. Pomagają one w optymalizacji procesów rozmnażania roślin, zwiększając wydajność i jakość uprawy. Przez lata opracowano wiele rodzajów bioreaktorów, w tym bioreaktory z mieszadłem, bioreaktory typu „air-lift”, bioreaktory okresowo-zalewowe (TIS, takie jak SETIS i RITA), bioreaktory z obrotowymi bębniami, bioreaktory z mgiełką odżywczą, bioreaktory z przepływem promieniowym oraz bioreaktory falowe (Steingroewer i in. 2013, Takayama i Akita 1994, Werner i in. 2017).

Bioreaktor okresowo-zalewowy (TIS) jest zaawansowanym systemem uprawy roślin w kulturach tkankowych, która opiera się na wykorzystaniu dwóch naczyń autoklawowalnych, połączonych za pomocą rurek oraz pompy powietrza. Jedno z naczyń pełni funkcję zbiornika na płynną pożywkę, podczas gdy drugie zawiera eksplantaty roślinne. Dzięki zastosowaniu ciśnienia powietrza, pożywka jest transportowana rurkami z pierwszego naczynia do drugiego, gdzie przez określony czas zanurza eksplantaty. Następnie pożywka powraca do pierwszego naczynia, co może odbywać się zarówno przy użyciu podwyższonego ciśnienia powietrza, jak i pod wpływem grawitacji, w zależności od zastosowanego systemu (Ahloowalia i Savangikar 2002). System TIS został zaprojektowany tak, aby można go było dostosować do hodowli różnych gatunków roślin. Znajduje zastosowanie zarówno w laboratoriach badawczych, gdzie umożliwia analizowanie fizjologii roślin, jak i w warunkach komercyjnych, gdzie jest wykorzystywany do propagacji roślin na szeroką skalę (García-Ramírez i in. 2019, Martre i in. 2001). Metoda ta znalazła szczególne zastosowanie w uprawie takich roślin jak ziemniaki (Piao i in. 2003, Septi i in. 2021), ananasy (Escalona i in. 1999, Lawan i in. 2021, Scherer i in. 2013) oraz bananowce (Abdulmalik i in. 2021, Costa i in. 2021, Uma i in. 2021, Uma i in. 2023). Hodowla w bioreaktorze okresowo-zalewowym pozwala na efektywne pobieranie składników odżywczych przez tkanki roślinne w trakcie zanurzenia, a także na wymianę gazów. Kontrolowane cykle zanurzania są kluczowe dla zapewnienia szybkiego wzrostu i rozwoju uprawianych roślin (Mirzabe i in. 2022, Schumann i in. 2012). W porównaniu z tradycyjnymi metodami uprawy *in vitro* na podłożu agarowym, technologia ta zapewnia lepszą jakość kultur. Badania

potwierdzają, że TIS prowadzi do zwiększenia liczby liści, korzeni oraz długości pędów w porównaniu z kulturami agarowymi (Zhang i in.2018).

Wiele systemów TIS zostało zaprojektowanych w sposób umożliwiający automatyzację, co pozwala na precyzyjną kontrolę cykli zanurzenia eksplantatów. Dzięki temu proces uprawy wymaga mniej czynności manualnych, co znacząco poprawia powtarzalność i efektywność (Hwang i in. 2022). Automatyzacja TIS pozwala na obsługę większej liczby kultur jednocześnie, co zwiększa przepustowość i czyni system szczególnie atrakcyjnym dla zastosowań komercyjnych oraz produkcji na dużą skalę. Dzięki tym rozwiązaniom możliwe jest skalowanie produkcji bez utraty jakości wytwarzanych roślin (Businge i in. 2017, Gianguzzi i in. 2024, Mamun i in. 2015). Do głównych zalet systemów TIS należy zwiększenie wydajności, ograniczenie potrzeby użycia siły roboczej oraz poprawa tempa wzrostu roślin w porównaniu z tradycyjną metodą uprawy na agarze. Systemy te umożliwiają bardziej efektywne wykorzystanie przestrzeni w laboratoriach i halach produkcyjnych, co jest szczególnie istotne w przypadku ograniczonej dostępności miejsca. Zastosowanie TIS pozwala również na optymalizację zużycia zasobów, takich jak media hodowlane i inne materiały eksploatacyjne, co prowadzi do ograniczenia kosztów produkcji (Georgiev i in. 2014, Lyam i in. 2012, Ragueira i in. 2018). Dodatkową zaletą TIS jest możliwość zintegrowania systemów automatyzacji z innymi technologiami, takimi jak robotyka, czujniki czy systemy obrazowania komputerowego, co dodatkowo zwiększa wydajność technik kultury tkankowej. Umożliwia to bardziej precyzyjne planowanie produkcji, co pomaga lepiej dostosować się do wymagań rynku. Elastyczność w planowaniu produkcji pozwala uniknąć nadprodukcji oraz związanych z nią kosztów, jak również lepiej wykorzystać zasoby w długim okresie. Chociaż systemy TIS oferują wiele korzyści, ich skuteczność zależy od specyficznych wymagań gatunku rośliny oraz zastosowanej metodyki. Należy również uwzględnić początkową inwestycję wymaganą na zakup i konfigurację systemów. Niemniej jednak, w długim okresie, korzyści wynikające z większej wydajności, spójności produkcji i obniżonych kosztów pracy mogą przewyższać początkowe nakłady, czyniąc TIS atrakcyjnym rozwiązaniem w nowoczesnej hodowli roślin na dużą skalę. Systemy TIS wspierają również bardziej zrównoważone podejście do kultury tkankowej, minimalizując marnotrawstwo zasobów. To czyni je szczególnie przydatnymi w produkcji na szeroką skalę, gdzie ważna jest równowaga pomiędzy wydajnością, a dbałością o środowisko.

1.3. Uwarunkowania kosztowe i organizacyjne produkcji *in vitro*

Rynek roślin produkowanych metodą *in vitro* opiera się na zaawansowanych technologiach i należy do perspektywicznych obszarów gospodarki. W porównaniu z tradycyjnymi metodami produkcji szkółkarskiej roślin ozdobnych, technologie *in vitro* pozwalają na masową produkcję milionów roślin przy minimalnym zużyciu wody i niewielkiej powierzchni. Co więcej, w wielu dziedzinach zastosowań metody *in vitro*, takich jak produkcja mięsa komórkowego, generowany jest znacznie mniejszy ślad węglowy w porównaniu z konwencjonalną produkcją rolniczą (Kumar i in., 2021).

Produkcja roślin *in vitro* umożliwia w stosunkowo krótkim czasie uzyskanie dużych, jednorodnych partii roślin o bardzo wysokiej jakości handlowej. Rośliny te są wolne od szkodników i patogenów oraz spełniają międzynarodowe normy fitosanitarne, co czyni je niezwykle pożądanymi na rynku globalnym. Szacuje się, że rynek ten będzie się dynamicznie rozwijał w nadchodzących latach, osiągając skumulowane roczne tempo wzrostu (CAGR) na poziomie 8,6%. Przewiduje się, że w USA wartość rynku wzrośnie z 167,46 mln USD w 2022 r. do 277,27 mln USD w 2028 r., co daje CAGR na poziomie 8,8% w latach 2023–2028. W Europie natomiast rynek ten ma wzrosnąć z 128,52 mln USD w 2022 r. do 211,16 mln USD w 2028 r., przy CAGR wynoszącym 8,6% (Precision Reports 2022).

Polska od wielu lat odgrywa ważną rolę w produkcji roślin metodą *in vitro* na skalę europejską, jak i światową. Pod koniec XX wieku kraj ten zajmował trzecie miejsce w Europie pod względem wielkości produkcji. Jednakże na początku XXI wieku nastąpił znaczący spadek produkcji w Europie, co było wynikiem przenoszenia laboratoriów do Azji. Do 2000 roku w Europie funkcjonowało około 140 działających laboratoriów komercyjnych, z czego ponad 40 znajdowało się w Polsce. W 2013 roku liczba ta spadła do około 20 aktywnych laboratoriów w Polsce, które rocznie produkowały od 40 do 100 milionów roślin, głównie gatunków ozdobnych (stanowiących 80–90% produkcji) (Gabryszewska 2013). W ostatnich latach, według danych szacunkowych opartych na bazach Emerging Markets Information Service (EMIS) oraz Panoramy Firm, w Polsce funkcjonowało około 15 laboratoriów komercyjnych. Na podstawie wywiadów z głównymi producentami oszacowano, że roczna produkcja wynosi około 80 milionów roślin.

Chociaż produkcja roślin *in vitro* na świecie rozwija się dynamicznie i ma ogromny potencjał, jest to branża wymagająca dużych nakładów finansowych. Największe koszty

inwestycyjne związane z amortyzacją i zakupem sprzętu laboratoryjnego stanowią ponad 40% całkowitych kosztów, przewyższając łączne koszty amortyzacji budynków i szklarni. Wyposażenie standardowego laboratorium kultur tkankowych obejmuje m.in. autoklawy do sterylizacji pożywek i naczyń laboratoryjnych, komory laminarnego przepływu powietrza do pracy w sterylnych warunkach, lampy UV do dezynfekcji pomieszczeń oraz urządzenia chłodnicze (Bhoite i Palshikar 2014). Wysokie koszty pracy stanowią kolejne wyzwanie dla laboratoriów *in vitro*. W krajach rozwiniętych koszty te mogą wynosić 60–80% ogólnych kosztów (Tomar i in. 2007, Chiachung 2016), podczas gdy w krajach rozwijających się stanowią około 40% (Bhoite i Palshikar 2014). W obliczu rosnącej inflacji i presji na wzrost wynagrodzeń, udział ten nadal rośnie, co wpływa na rentowność produkcji. Rosnące koszty energii również wpływają na sytuację ekonomiczną przedsiębiorstw z tej branży. W przyszłości konieczne będą inwestycje w technologie redukujące koszty operacyjne, takie jak bioreaktory i automatyczne transplantery. Produkcja roślin metodą *in vitro* jest również obciążona stosunkowo wysokim podatkiem od działów specjalnych produkcji rolnej, co wynika z obowiązujących norm szacunkowych dochodu. Przykładowo, w 2025 roku norma dochodu wynosi 315,98 zł na 1 m² półki (Dz.U. 2024 poz. 1628). Badanie rentowności przedsiębiorstw z tego sektora oraz wprowadzanie usprawnień w produkcji są kluczowe do dalszego rozwoju branży, ponieważ analiza kosztów oraz przepływów pieniężnych pozwala na skuteczne zarządzanie zasobami finansowymi firmy. Dzięki dokładnemu monitorowaniu wydatków i wpływów, przedsiębiorcy mogą lepiej planować inwestycje, unikać niepotrzebnych kosztów oraz zapewnić płynność finansową. Regularna kontrola tych aspektów umożliwia szybsze reagowanie na zmiany rynkowe, optymalizację procesów produkcyjnych i dostosowanie strategii zarządzania do zmieniających się warunków rynkowych, co ma kluczowe znaczenie dla długofalowej rentowności i konkurencyjności przedsiębiorstwa.

1.4. Organizacja pracy w funkcjonowaniu przedsiębiorstwa produkującego rośliny metodą *in vitro*

Pracownicy są niezbędni w funkcjonowaniu firm i nadal w wielu zawodach nie mogą być zastąpieni przez maszyny. Masowa produkcja roślin *in vitro* w laboratorium kultur tkankowych jest właśnie takim przykładem. Praca w laboratorium wymaga dokładności, precyzji i umiejętności podejmowania właściwych decyzji. Szczególnie ważna jest dobrej jakości praca ludzka, gdy laboratorium nie specjalizuje się w wąskiej

liczbie gatunków roślin. Każdy gatunek rośliny powinien być cięty w inny sposób, dlatego też bardzo ważne jest doświadczenie pracownika. Tak więc oferowanie szerokiego spektrum gatunków stwarza trudności, a wtedy wydajna i dokładna kadra pracownicza jest bardzo istotna. Dlatego też ważne są badania nad wydajnością pracy ludzkiej. Poprzez zwiększenie wydajności pracy człowieka przedsiębiorstwa mogą osiągnąć lepsze wyniki i obniżyć koszty produkcji. Wzrost ten można osiągnąć na wiele sposobów. Może to być stymulacja za pomocą muzyki (Lesiuk 2005, Haake 2011), intensywność światła (Karlikova i in. 2016), jakość środowiska i zadowolenie pracowników (Garris i Monroe 2005, Staw i Barsade 1993, Vischer 1989). Ponadto Street i in. (2019) wskazują, że stres jest również kluczowym czynnikiem wydajności i redukcji kosztów pracy. Zmniejszenie stresu wśród pracowników może znacznie zwiększyć wyniki przedsiębiorstwa.

Szybki rozwój technologii, zwłaszcza związanych z komunikacją, stworzył w ostatnich latach „społeczeństwo 24-godzinne”. Pracownicy są zawsze gotowi podnieść słuchawkę telefonu lub odpowiedzieć na e-mail po skończeniu pracy. Ludzie spędzają wieczory próbując osiągnąć cele wyznaczone przez pracodawcę. Ostra granica między czasem pracy, a czasem relaksu nie jest obecnie tak oczywista. Bardzo często ludzie muszą pracować po godzinach. Golden (2012), O’Conner (1969) oraz Haneiko i in. (1991) wykazali, że praca po godzinach powoduje utratę wydajności. Firmy dostrzegają ten problem i próbują go rozwiązać. Wiele firm prowadzi prywatne badania wskazujące, że praca w krótszych godzinach zwiększa produktywność. Może to obejmować pracę w krótszych godzinach w ciągu dnia lub pracę w krótszym wymiarze w ciągu tygodnia. Również elastyczne godziny pracy mogą zwiększyć produktywność (Kossek i Van Dyne 2008, Kossek i Lee, 2008). Ważne jest także wprowadzenie krótszych warunków pracy, zgodnie z prawem Parkinsona. Parkinson (1955) mówi, że „praca rozszerza się tak, aby wypełnić czas dostępny na jej ukończenie”. Oznacza to, że im bliżej pracownik jest terminu zakończenia pracy, tym wyższa staje się jego produktywność. Tak więc obowiązki w ośmiogodzinnym dniu pracy można wykonać szybciej. Można to osiągnąć poprzez odpowiednie planowanie pracy i system zachęt dla pracowników.

2. CEL BADAŃ I HIPOTEZY BADAWCZE

Cel główny: ocena sposobów rozmnażania roślin ozdobnych metodą *in vitro* i ich wpływu na efektywność kosztową i organizacyjną w laboratoriach kultur tkankowych.

Cele szczegółowe:

- ocena kondycji ekonomiczno-finansowej wybranych polskich przedsiębiorstw produkujących rośliny metodą *in vitro*,
- ocena struktury kosztów zmiennych w produkcji roślin metodą *in vitro* w kulturach agarowych oraz płynnych w bioreaktorze okresowo-zalewowym,
- opracowanie metody rozmnażania *in vitro* wybranych gatunków roślin,
- porównanie wydajności ilościowej produkcji wybranych gatunków roślin w kulturach *in vitro* agarowych oraz płynnych w bioreaktorze okresowo-zalewowym,
- opracowanie systemu organizacji dnia pracy zwiększającego wydajność pracowników w laboratoriach kultur tkankowych *in vitro*.

Hipotezy badawcze:

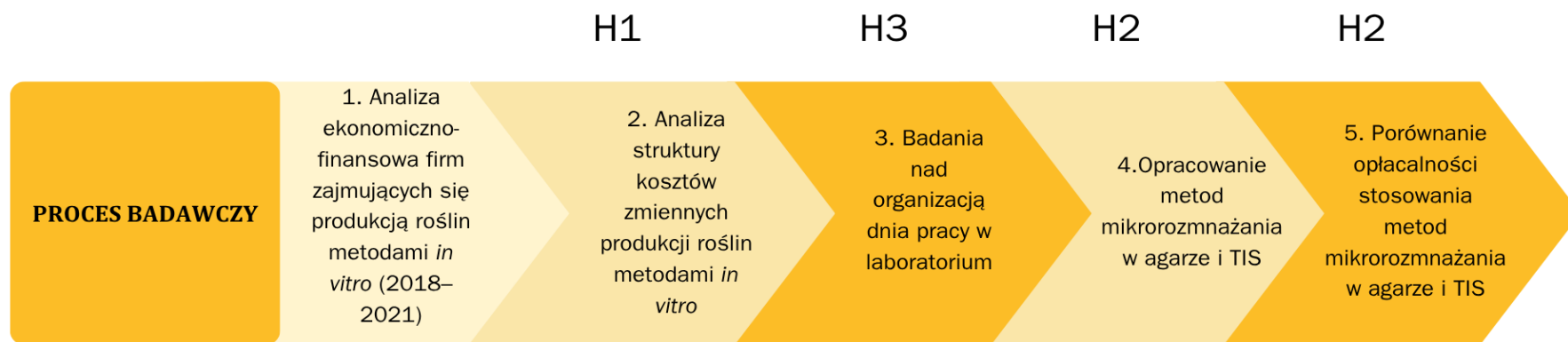
H1. Poznanie struktury kosztów zmiennych produkcji roślin metodą *in vitro* umożliwi zaproponowanie odpowiednich rozwiązań poprawiających efektywność kosztową i organizacyjną oraz jakościową produkcji roślin metodą *in vitro*.

H2. Mikrorozmnażanie w połączeniu z systemami automatyzacji produkcji za pomocą bioreaktorów okresowo-zalewowych, umożliwi poprawę efektywności produkcji.

H3. Odpowiednia i efektywna organizacja dnia pracy wpływa na wyniki ilościowe produkcji *in vitro*.

3. MATERIAŁ I METODY

Szczegółowy opis materiałów oraz metod badawczych użytych do przygotowania niniejszej rozprawy doktorskiej został przedstawiony w publikacjach wchodzących w jej skład (publikacje 1-5). W rozdziale tym uwzględniono układ, w jakim realizowane były poszczególne etapy badań, a także ich zakres, co ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Schemat badań

Źródło: opracowanie własne.

3.1. Analiza ekonomiczno-finansowa przedsiębiorstw produkujących rośliny metodą *in vitro*

Analiza ekonomiczno-finansowa spółek z ograniczoną odpowiedzialnością produkujących rośliny metodą *in vitro*, która stanowiła podstawę do badań empirycznych została przeprowadzona na podstawie sprawozdań finansowych dostępnych w systemie EMIS (Publikacja 1). Badaniem objęto podmioty zarejestrowane pod kodem PKD 01.30.Z (rozmnażanie roślin). Kryterium doboru stanowiła dostępność czteroletniego szeregu czasowego sprawozdań finansowych obejmujących lata 2018–2021, co pozwoliło na uwzględnienie także wpływu pandemii COVID-19 na kondycję finansową przedsiębiorstw.

W celu zachowania anonimowości jednostki badawcze oznaczono jako:

- Spółka A – z siedzibą w województwie mazowieckim, zatrudniająca 129 osób, z kapitałem podstawowym 8 000 zł,
- Spółka B – z siedzibą w województwie małopolskim, zatrudniająca 79 osób, z kapitałem podstawowym 11 000 zł,
- Spółka C – z siedzibą w województwie kujawsko-pomorskim, zatrudniająca 19 osób, z kapitałem podstawowym 220 000 zł.

Podstawowe dane finansowe wskazują na zróżnicowane modele funkcjonowania przedsiębiorstw: Spółka A to podmiot o rozwiniętej działalności sprzedażowej, finansujący się zewnętrznie; Spółka B to samofinansująca się spółka produkcyjna z przewagą aktywów trwałych; natomiast Spółka C łączy działalność produkcyjną i sprzedażową, korzystając z finansowania zewnętrznego. Oceny kondycji ekonomiczno-finansowej dokonano poprzez analizę pionową i poziomą bilansu oraz rachunku zysków i strat, a także analizę wskaźnikową. Analiza pionowa określała procentowy udział poszczególnych pozycji w sumie bilansowej po stronie aktywów i pasywów, natomiast analiza pozioma pozwoliła na ocenę dynamiki zmian wartości poszczególnych pozycji bilansu oraz rachunku wyników. W ramach analizy wskaźnikowej obliczono oraz zinterpretowano wskaźniki płynności, rentowności, zadłużenia oraz wybrane wskaźniki ekonomiczne. Analiza ta umożliwiła dokładniejsze określenie specyfiki działalności badanych spółek, co było kluczowe z punktu widzenia celu badawczego.

3.2. Badania empiryczne obejmujące organizację pracy i metody mikrorozmnażania

Badania empiryczne dotyczące sposobów mikrorozmnażania oraz organizacji dnia pracy przeprowadzono w przedsiębiorstwie zajmującym się produkcją roślin metodą *in vitro* Plant Research Laboratories Sp. z o.o. na materiale roślinnym, którym firma dysponowała w danych terminach prowadzenia badań (*Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei*, *Alternanthera dentata* oraz *Pennisetum* × *advena* 'Rubrum').

3.2.1. Efektywność mikrorozmnażania i struktura kosztów produkcji *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* w warunkach *in vitro*

Na przykładzie *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* zostały porównane warunki fizyczne uprawy wraz z kombinacjami pożywek agarowych multiplikacyjnych i ukorzeniających w celu określenia kosztów zmiennych produkcji sadzonki, nadwyżki bezpośredniej oraz zaprezentowania struktury kosztów zmiennych produkcji z uwzględnieniem: kosztów pracy ludzkiej, materiałów i odczynników, kosztów uprawy oraz kosztów ogólnych (Publikacja 2). Koszty przedstawiono w dolarach amerykańskich USD, a więc według oryginalnych jednostek zaprezentowanych w publikacjach składających się na pracę doktorską. Użycie tych jednostek było konieczne ze względu na międzynarodowy charakter czasopisma. Wartości przeliczono zgodnie ze średnim kursem NBP w roku prowadzenia badań i miesiącu opracowywania wyników - kurs średni w styczniu 2019 wynosił 1,00 PLN = 3,7619 USD. Kultury *in vitro* były prowadzone na pożywce 1/2 MS z dodatkiem witamin i różnymi stężeniami regulatora wzrostu BAP. Uprawa prowadzona była w stabilnych warunkach o kontrolowanym fotoperiodzie i temperaturze. Eksplantaty pasażowano co 4 tygodnie. Dodatkowo testowano wpływ ograniczonego światła na liczbę uzyskanych węzłów. Rośliny z co najmniej trzema węzłami poddano ukorzenianiu na pożywkach MS, zarówno bez hormonów, jak i z dodatkiem regulatora wzrostu. Po czterech tygodniach rośliny zostały przeniesione do wysterylizowanego podłoża i umieszczone w miniszklarenkach, gdzie stopniowo aklimatyzowano je do warunków otoczenia. Po zakończeniu aklimatyzacji rośliny przeniesiono do warunków polowych. Analiza kosztów uwzględniała główne kategorie kosztów, takie jak zużycie materiałów, pracy oraz energii elektrycznej. Koszty stałe, związane z infrastrukturą laboratoryjną, które mają mocno indywidualny charakter, nie były brane pod uwagę. W celu określenia kosztu jednostkowego produkcji rośliny uwzględniono średnią liczbę eksplantatów uzyskiwanych w określonym czasie oraz

koszty pracy ludzkiej i energii elektrycznej. Obliczono także marżę brutto, umożliwiającą ocenę opłacalności procesu.

3.2.2. Organizacja dnia pracy w laboratorium kultur tkankowych

Dzięki otrzymanej strukturze kosztów, z której wynikało, że największym kosztem zmiennym jest praca ludzka zaplanowano eksperyment mający na celu zwiększenie efektywności pracy osób zatrudnionych (Publikacja 3). Badanie przeprowadzono wśród dziesięciu pracowników laboratorium Plant Research Laboratories Sp. z o.o. w Warszawie, którzy wykonywali głównie pasaż roślin *A. dentata* oraz dodatkowo różne zadania związane z uprawą roślin *in vitro*. W laboratorium praca była świadczona w godzinach 9:00-17:00. Eksperyment powtarzano trzykrotnie dla każdej kombinacji warunków i każdego pracownika. Praca odbywała się w zoptymalizowanych warunkach, minimalizujących ryzyko kontaminacji oraz zmęczenie pracowników. Wykorzystywano standardowe narzędzia i materiały. Każdy dzień kończył się czyszczeniem i przygotowaniem stanowiska do kolejnej zmiany.

Badanie polegało na analizie wydajności pracy w pięciu różnych wariantach organizacji dnia. Porównywano efektywność pasażowania roślin przez pracowników w kontrolnym ośmiogodzinnym dniu pracy (C1) oraz w sześciogodzinnym systemie pracy przy pasażowaniu z dwiema godzinami przeznaczonymi na przygotowanie pożywki, sterylizację oraz usuwanie skażonych kultur. W kombinacji C2 przeznaczono czas między 11:00, a 17:00 na pasażowanie; w kombinacji C3 od 9:00 do 11:00, a następnie od 13:00 do 17:00; w kombinacji C4 od 9:00 do 13:00, a następnie od 15:00 do 17:00; w kombinacji C5 przeznaczono na pasażowanie czas od 9:00 do 15:00. Liczbę wykonanych pasażów roślin rejestrowano co godzinę. W badaniach uwzględniona była przerwa zgodna z normami pracy. Oceniono wpływ organizacji pracy na wydajność pracowników, badając dynamikę produktywności w czasie. Obliczono również wskaźniki efektywności pracy: Wskaźnik Produktywności (PI) oraz Wskaźnik Produktywności Pracy (LPI), które pozwoliły na ocenę relacji między liczbą pasażowanych roślin, a czasem pracy. Wyniki analizy umożliwiły ocenę optymalnej organizacji dnia pracy w laboratorium.

3.2.3. Wpływ rodzaju pożywki i systemu uprawy na efektywność multiplikacji i ukorzenia *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’

W kolejnych badaniach porównywane były efekty działania wytypowanych kombinacji pożywek multiplikacyjnych oraz ukorzeniających agarowych na rośliny *Pennisetum × advena* 'Rubrum' w zestawieniu jakościowym oraz ilościowym. Działanie najlepszej pożywki agarowej multiplikacyjnej dla *Pennisetum × advena* 'Rubrum' zostało porównane z tą samą pożywką płynną w bioreaktorze okresowo-zalewowym (Publikacja 4). Eksplantatem był fragment rośliny o długości 1 cm zawierający merystem interkalarny. Materiał roślinny został wysterylizowany i przeniesiony na pożywkę multiplikacyjną. Do oceny optymalnej pożywki dla namnażania użyto podłoża MS z witaminami o następujących stężeniach BAP: 0,5 mg/l (M1); 1 mg/l (M2); 1,5 mg/l (M3) i 2 mg/l (M4) oraz bioreaktor okresowo-zalewowy (TIS). Do ukorzenia użyto podłoża ½MS z witaminami (R1), jego kombinację z 2% węglem aktywnym (RAC1); podłoża ½MS z witaminami i 0,5 mg/l IBA (R2); podłoża ½MS z witaminami, 0,5 mg/l IBA i dodatkiem 2% węgla aktywnego (RAC2); podłoża ½MS z witaminami, 0,5 mg/l IBA i 0,5 mg/l NAA (R3); ½MS z witaminami, 0,5 mg/l IBA, 0,5 mg/l NAA i dodatkiem 2% węgla aktywnego (RAC3). Eksperyment powtarzano trzykrotnie, każdorazowo wykorzystując 10 pojemników z 10 eksplantatami. Kultury prowadzone były w pojemnikach plastikowych (350 ml) lub w bioreaktorze (1,8 L). Warunki hodowli obejmowały 12-godzinny fotoperiod (światło fluorescencyjne, 3100 lm) oraz stałą temperaturę 23°C. Czas subkultury wynosił osiem tygodni dla kultur na agarze i cztery tygodnie dla TIS, a ukorzenie trwało trzy tygodnie. Po zakończeniu uprawy rośliny aklimatyzowano do warunków szklarniowych.

3.2.4. Analiza kosztów i wydajności mikrorozmnażania *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ przy użyciu systemu TIS i metody agarowej

W badaniach własnych (zaprezentowanych w publikacji 5) porównano efektywność pasażowania eksplantatów roślin *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ przy użyciu dwóch metod: tradycyjnej uprawy na pożywce agarowej oraz systemu TIS. Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z optymalnym schematem organizacji pracy, obejmującym sześciogodzinną pracę przy pasażowaniu oraz dwugodzinną czas przeznaczony na inne czynności laboratoryjne. W ramach badania analizowano liczbę przepasażowanych eksplantatów, efektywność ukorzenia oraz różnice między oboma sposobami – agarowym oraz TIS. Każdy eksperyment powtarzano trzykrotnie, a w każdej

serii wykorzystywano po dziesięć pojemników lub jednostek TIS z dziesięcioma eksplantatami każda.

Następnie porównano według metody opracowanej przez autora niniejszej rozprawy (przedstawionej w publikacji 2), strukturę kosztów zmiennych produkcji *Pennisetum × advena* 'Rubrum' w bioreaktorze okresowo-zalewowym oraz kulturach agarowych, a także określono koszt produkcji sadzonki dla obu sposobów. Analiza kosztów zmiennych obejmowała wydatki na materiały, pracę, zużycie energii elektrycznej oraz koszty ogólne. Koszty produkcji roślin w obu systemach obliczono na podstawie cen zakupu składników pożywki, kosztów pojemników oraz nakładów pracy. Uwzględniono także koszty związane z eksploatacją systemu TIS, w tym amortyzację sprzętu oraz dodatkowe wydatki na sterylizację. Oszacowano całkowity koszt produkcji pojedynczego pojemnika oraz koszt jednostkowy wyprodukowanej rośliny. Podobnie jak w publikacji 2 wartości przedstawiono w dolarach amerykańskich USD, zgodnie ze średnim kursem NBP w roku prowadzenia badań i miesiącu opracowywania wyników - kurs z maja 2024 wynoszący 1 PLN= 4,0474 USD.

Ostatecznie, przy wykorzystaniu modelu marży brutto, oceniono rentowność obu sposobów, co pozwoliło na ocenę ekonomicznej opłacalności stosowania systemu TIS w porównaniu z tradycyjną metodą hodowli *in vitro*.

3.2.5. Analiza statystyczna

Analizę statystyczną której wyniki zaprezentowano w niniejszej pracy przeprowadzono przy użyciu oprogramowania STATISTICA wersja 13.0 (TIBCO Software Inc. 2017).

W publikacji 4, aby ustalić, czy rozkład próby jest zgodny z rozkładem normalnym, zastosowano test Kołmogorowa-Smirnowa. Ponieważ dane nie były zgodne z tym rozkładem zastosowano nieparametryczny test ANOVA Kruskala-Wallisa, aby ocenić różnice między testowanymi mediami. Statystyka testu opierała się na różnicach między średnimi rangami grup. Do określenia, które grupy istotnie różniły się od siebie, zastosowano test post-hoc Dunna. Również wyniki badań zaprezentowane w publikacji 3, są rezultatem analiz przy zastosowaniu powyższego testu ANOVA Kruskala-Wallisa. Poziom istotności statystycznej ustalono na $p < 0,05$ dla wszystkich przeprowadzonych obliczeń.

4. WYNIKI I DYSKUSJA

4.1. Analiza ekonomiczno-finansowa przedsiębiorstw produkujących rośliny metodą *in vitro* w latach 2018–2021

W celu uzyskania informacji o sytuacji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstw produkujących rośliny metodą *in vitro* dokonano analizy struktury bilansu trzech firm. Badanie wykazało istotne różnice w strukturze aktywów i sposobach finansowania działalności. Spółka A przez większość badanego okresu charakteryzowała się dominacją aktywów obrotowych, jednak ich udział w aktywach ogółem sukcesywnie malał na rzecz aktywów trwałych. W 2018 r. aktywa obrotowe stanowiły 99,69% aktywów, natomiast w 2021 r. ich udział zmniejszył się do 68,42%. Spółka stopniowo zwiększała udział aktywów trwałych, co wynikało m.in. z nabycia nieruchomości w 2021 r. oraz wcześniejszych inwestycji w środki trwałe w budowie. W zakresie finansowania spółka A wykazywała początkowo niski poziom kapitału własnego (11,48% w 2018 r.), który w 2019 r. spadł do 1,89%, by w kolejnych latach rosnąć i osiągnąć 48,37% w 2021 r. Jednocześnie zaobserwowano zmianę struktury zobowiązań – w 2020 r. pojawiły się zobowiązania długoterminowe, a ich udział w pasywach wzrósł do 10,32% w 2021 r., przy jednoczesnym spadku zobowiązań krótkoterminowych.

Spółka B, w przeciwieństwie do spółki A, przez cały okres analizy (2019–2021) wykazywała przewagę aktywów trwałych nad obrotowymi, co jest typowe dla branży producentów roślin używających metody *in vitro*. W 2019 r. aktywa trwałe stanowiły 80,21% aktywów ogółem, a na koniec badanego okresu ich udział wynosił 68,83%. Struktura majątku trwałego spółki B zmieniała się w czasie – początkowo dominowały wartości niematerialne i prawne (35,46% aktywów w 2019 r.), jednak ich udział stopniowo malał na rzecz rzeczowych aktywów trwałych, zwłaszcza nieruchomości. W zakresie finansowania spółka B bazowała głównie na kapitale własnym, który w 2019 r. stanowił 76,17% pasywów, lecz w kolejnych latach jego udział spadał do 66,19% w 2021 r. Równocześnie rosło znaczenie finansowania długoterminowego – udział pożyczek długoterminowych wzrósł z 2,26% w 2019 r. do 12,65% w 2020 r.

Spółka C początkowo wykazywała przewagę aktywów obrotowych, lecz w kolejnych latach rosło znaczenie aktywów trwałych. W 2018 r. aktywa obrotowe stanowiły 59,83% aktywów ogółem, a w 2019 r. ich udział wzrósł do 67,47%, jednak od 2020 r. obserwowano sukcesywny wzrost wartości inwestycji długoterminowych, co skutkowało wzrostem udziału aktywów trwałych. Jednocześnie w zakresie aktywów

obrotowych odnotowano istotny wzrost wartości środków pieniężnych (z 1,10% w 2019 r. do 11,87% w 2021 r.) oraz spadek wartości należności handlowych. Spółka C finansowała się głównie kapitałem obcym – jego udział w pasywach wynosił od 66,14% w 2019 r. do 66,14% w 2021 r. W strukturze zobowiązań większy udział miały zobowiązania krótkoterminowe, jednak przez cały badany okres spółka posiadała również długoterminowe kredyty i pożyczki.

Analiza dynamiki bilansu wskazuje na wysoką dynamikę wzrostu aktywów w spółce A – w 2021 r. ich wartość była 17 razy wyższa niż w 2019 r., a aktywa trwałe wzrosły aż 1716 razy względem 2018 r. Równocześnie kapitał własny spółki zwiększył się 71,4 razy, co należy ocenić pozytywnie. Wartość kapitału obcego wzrosła 9,9 razy, choć w 2020 r. jego wartość była 19,5 razy wyższa niż w 2018 r., co wynikało ze zwiększonego poziomu zobowiązań. W kolejnych latach wartość zobowiązań krótkoterminowych spadła, co wskazuje na ich spłatę.

Dynamika zmian w spółkach B i C była znacznie niższa. W spółce B w 2021 r. aktywa ogółem były 1,6 razy wyższe niż w 2019 r., a wartość aktywów trwałych wzrosła do 134,72% wartości bazowej, co wynikało z nabycia nowych środków trwałych. Wzrost aktywów obrotowych był jeszcze większy (2,5-krotność wartości bazowej), przy czym największy wzrost dotyczył środków pieniężnych (10,4 razy). Po stronie pasywów obserwowano wzrost wartości zarówno kapitału własnego (1,4-krotność), jak i obcego (2,2-krotność), głównie za sprawą zobowiązań długoterminowych.

W spółce C wartość aktywów ogółem w 2021 r. stanowiła 118% wartości bazowej z 2018 r., przy czym aktywa trwałe rosły szybciej niż obrotowe (1,9-krotność wartości bazowej). Wzrost aktywów trwałych wynikał głównie z inwestycji długoterminowych i środków trwałych w budowie. Jednocześnie odnotowano spadek należności handlowych, które w 2021 r. stanowiły jedynie 37,77% wartości z 2018 r., co może sugerować spadek sprzedaży.

Analiza rachunku zysków i strat wykazała, że w 2021 r. wszystkie spółki odnotowały wzrost przychodów, przy czym najwyższy wzrost odnotowała spółka A (51,5-krotność wartości początkowej), a najniższy – spółka C (1,2-krotność). W spółce A wzrost przychodów przewyższył wzrost kosztów, co skutkowało 54,6-krotnym wzrostem zysku operacyjnego i 55,9-krotnym wzrostem zysku netto. W spółce B w 2019 r. odnotowano stratę operacyjną, jednak w kolejnych latach nastąpiła poprawa wyników dzięki szybszemu wzrostowi przychodów niż kosztów. Spółka C osiągnęła najniższy

wzrost przychodów (124% wartości bazowej), przy czym wzrost kosztów był wyższy (126%), co skutkowało spadkiem zysku operacyjnego do 61% wartości z 2018 r.

W latach 2018–2021 badane przedsiębiorstwa zajmujące się produkcją roślin metodą *in vitro*, pomimo pandemii Covid-19, nie odnotowały pogorszenia wyników finansowych, a wręcz przeciwnie – wykazały wzrost przychodów i zysków. Świadczy to o dobrej kondycji finansowej branży i możliwościach inwestowania w nowe technologie. Wyniki te pokrywają się z raportem Precision Reports, (2022) dla Europy i Stanów Zjednoczonych, które również wskazują na rozwój tej branży.

4.2. Określenie struktury kosztów zmiennych produkcji roślin *in vitro* na pożywkach agarowych

W publikacji 2 skupiono się na zbadaniu struktury kosztów zmiennych produkcji *in vitro* *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei*. Stwierdzono, że w ciągu jednej godziny pracy jedna osoba jest w stanie przygotować 159,86 eksplantatów, co odpowiada prawie 16 pojemnikom z roślinami. Cięcie pędów do ukorzenia jest bardziej efektywne, ponieważ można w ten sposób uzyskać 213,2 pędów na godzinę. Łatwość w umieszczeniu eksplantatów w agarze sprawia, że jest to prostsze niż sadzenie eksplantatów węzłowych, które są problematyczne z powodu dużych liści. Koszt odczynników potrzebnych do przygotowania 1 litra pożywki multiplikacyjnej w 2019 roku wynosiła 0,880 USD, natomiast ta sama objętość pożywki do ukorzenia kosztowała 0,879 USD. Koszt pracy przy produkcji pożywki wynosił 0,200 USD, a koszt wzrostu roślin w pojemnikach przez 4 tygodnie wynosił 0,030 USD. Całkowity koszt produkcji jednej ukorzonej rośliny wynosił 0,084 USD w pełnym świetle i 0,082 USD w ograniczonym świetle. Po 20 tygodniach można uzyskać 48 020 roślin w pełnym świetle przy koszcie 3173,78 USD, a w ograniczonym świetle 414 720 roślin przy koszcie 26 067,97 USD. Czas produkcji 10 000 nieukorzonych roślin w pełnym świetle wynosi 16 tygodni, a w ograniczonym świetle o cztery tygodnie krócej. Najwyższy koszt produkcji *in vitro* to koszt pracy, który stanowi 48% kosztów zmiennych. Koszty pojemników i odczynników stanowią 33% kosztów zmiennych produkcji. Koszt wzrostu roślin to zaledwie 2%, a koszty ogólne 17% kosztów zmiennych.

4.3. Wpływ organizacji dnia pracy na wydajność pracowników przy rozmnażaniu roślin *in vitro*

W publikacji 3 opisano wyniki badań dotyczących organizacji dnia pracy w laboratorium. Wykazano, że niezależnie od sposobu organizacji pracy, najwyższą wydajność pracownika osiągnano między czwartą, a szóstą godziną dnia pracy. Nawet w kombinacjach, gdzie praca przy pasażowaniu roślin rozpoczynała się później, efektywność w piątej godzinie była o 23–30% wyższa niż w pierwszej godzinie. Co istotne, mimo zmiany zadań w ciągu dnia, pod koniec pracy produktywność była wyższa niż na początku.

Analiza statystyczna nie wykazała istotnych różnic w wydajności między poszczególnymi sposobami organizacji dnia pracy ($p = 0,9595$). W próbie kontrolnej najwyższą produktywność osiągnięto w piątej godzinie, gdzie wycięto 388,67 roślin, a w C5 - w czwartej godzinie, gdzie wycięto 389,33 roślin.

Indeks Produktywności był najwyższy w środkowych godzinach pracy, a najniższy w pierwszej godzinie C3 (0,76). Najlepszą kombinacją okazała się C5, z najwyższą średnią liczbą wyciętych roślin na godzinę (361,44), a najgorszą C4 (345,42). Przerwywanie pracy innymi zadaniami niż zadanie główne w kombinacjach C3 i C4 prowadziło do spadku efektywności.

Współczesny rynek pracy stawia przed przedsiębiorstwami wyzwania związane z maksymalizacją wydajności pracowników, zwłaszcza w obliczu ograniczeń związanych z zastępowaniem ich przez roboty i programy komputerowe. Badania własne wykazały, że największą produktywność (LPI) osiągnano, gdy pierwsze sześć godzin pracy było przeznaczone na główne zadania, a pozostałe dwie godziny na inne obowiązki. Wskazuje to, że skoncentrowana praca nad kluczowym zadaniem w krótszych, nieprzerwywanych blokach czasowych przynosi lepsze rezultaty. Analiza dostępnej literatury naukowej oraz źródeł internetowych o tematyce biznesowej wskazuje na tendencję do skracania czasu pracy w środowisku korporacyjnym, szczególnie w biurach. Choć praktyka ta jest promowana jako sposób na poprawę efektywności, wciąż brakuje solidnych dowodów naukowych potwierdzających jej skuteczność. Istnieją jednak badania pokazujące spadek produktywności przy wydłużonym czasie pracy. Shepard i Clifton (2000) przeanalizowali 18 branż produkcyjnych, wykazując, że nadgodziny skutkowały spadkiem średniej wydajności. Wzrost nadgodzin o 10% prowadził do zmniejszenia produktywności o 2,4%. Wyniki te znajdują potwierdzenie

w innych sektorach gospodarki. Praca w nadmiernym wymiarze godzin może również prowadzić do negatywnych skutków zdrowotnych, zarówno fizycznych, jak i psychicznych. Udowodniono, że długotrwała praca zwiększa ryzyko chorób układu sercowo-naczyniowego (Bosma i in. 1997, Stansfeld i Candy 2006, Theorell i in. 2015). Problemy psychiczne mogą bezpośrednio wpływać na spadek produktywności. Street i Lacey (2018) wykazali, że w jednej z firm wydobywczych w Queensland pracownicy odczuwający stres mieli wydajność niższą o 19% w porównaniu z tymi, którzy nie doświadczali stresu w miejscu pracy. Wskazuje to, że skrócenie czasu pracy oraz stworzenie przyjaznej atmosfery mogą pozytywnie wpływać na efektywność pracowników. Warto jednak zaznaczyć, że nie we wszystkich przypadkach dłuższy czas pracy oznacza spadek jakości. Collewet i Sauermann (2017) przeprowadzili badanie w firmie zajmującej się telefoniczną obsługą klienta, gdzie wykazali, że jakość obsługi nie spadała wraz ze wzrostem liczby przepracowanych godzin, a nawet wykazywała tendencję do nieznacznej poprawy. Wyniki te sugerują, że wpływ czasu pracy na produktywność może być zależny od specyfiki wykonywanej pracy.

Wyniki uzyskane w badaniu własnym wskazują również na istotny aspekt kosztowy związany z organizacją czasu pracy. Literatura przedmiotu (Tomar i in. 2007, Chiachung 2016) pokazuje, że koszty pracy mogą stanowić nawet 80% całkowitych kosztów produkcji roślin *in vitro*. Odpowiednia organizacja dnia pracy może pomóc w ich redukcji. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że środkowa część dnia pracy na przykładzie badanego laboratorium jest najbardziej efektywna, co sugeruje, że najbardziej wymagające zadania powinny być realizowane właśnie w tym czasie. Podobne zależności zaobserwowali Bryson i Forth (2007), analizując produktywność w cyklu tygodniowym. Dowiedli oni, że poniedziałek i piątek były najmniej efektywnymi dniami, a najlepsza wydajność przypadała na środek tygodnia. Prawdopodobnie wynika to z faktu, że po weekendowym odpoczynku pracownicy potrzebują czasu na ponowne osiągnięcie optymalnego poziomu koordynacji pracy, natomiast w piątek ich uwaga często skupia się na planach weekendowych.

4.4. Mikrorozmnażanie roślin

4.4.1. Porównanie pożywek i warunków fizycznych w mikrorozmnażaniu *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei*

Oprócz struktury kosztów zmiennych produkcji *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei*, w publikacji 2 opisano także metodykę jej rozmnażania *in vitro*. Metoda dezynfekcji eksplantatów była skuteczna w 80%. Najbardziej efektywna okazała się pożywka multiplikacyjna 1/2 MS z dodatkiem 0,5 mg/l BAP, która po 4 tygodniach generowała 7 nowych eksplantatów możliwych do pobrania. Venkateswarlu i in. (2001), stosując ten sam skład pożywki, ale przy intensywności światła 3000 lm po 6 tygodniach, uzyskali 6 eksplantatów. Różnice mogą wynikać ze stosowania wyższej temperatury 28°C i 14-godzinnego fotoperiodu.

Eksplantaty utrzymywane w warunkach ograniczonego światła dawały wydłużone pędy i generowały kalus. W tych warunkach uzyskiwano 12 nowych możliwych do pobrania eksplantatów. Venkateswarlu i in. (2001) uzyskali 8 eksplantatów przy zastosowaniu oświetlenia o strumieniu świetlnym 1200 lm. Po przeniesieniu 4-tygodniowego kalusa na 1/2 MS z dodatkiem 0,5 mg/l BAP, po kolejnych 4 tygodniach powstały 34 rośliny, jednak wykazywały one fenotypowe odchylenia, co czyniło je nieodpowiednimi do dalszej uprawy. Podobne zmiany odnotowano w przypadku doświadczeń z ziemniakami (Lindeque i in. 1991) oraz *Curcuma aromatica* (Mohanty i in. 2008). Stężenie 1mg/L BAP powodowało kalusowanie i szklistość pędów. Z kolei Chunchukov i Yancheva (2015) analizowali różne gatunki *Paulownia*, gdzie dla *P. elongata* uzyskano 55,2 eksplantatów, w *P. tomentosa* x *P. fortunei* 33,54, a w hybrydzie (*P. elongata* x *P. tomentosa*) x *P. elongata* 44,67.

Najlepsze ukorzenie uzyskano w 1/2 MS z dodatkiem 1 mg/l IBA, (100%), jednak korzenie były łamliwe i trudne do oczyszczenia z agaru. Pożywka 1/2 MS bez hormonów miała 95% skuteczności ukorzenia, ale korzenie były dłuższe, lepiej rozgałęzione i niełamliwe co ułatwiało przenoszenie roślin do podłoża przed aklimatyzacją. Rośliny były w 90% skutecznie aklimatyzowane. Ważnym elementem było odpowiednie nawadnianie i wentylacja miniszklarenek. Dzięki temu uniknięto porażenia chorobami grzybowymi.

4.4.2. Optymalizacja procesu mikrorozmnażania i ukorzenia *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ – porównanie agarowych kultur *in vitro* i TIS

W publikacji 4 omawiającej sposoby mikrorozmnażania *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ w kulturach agarowych najlepszy wskaźnik namnażania tej rośliny po ośmiu tygodniach uzyskano na pożywkach M2 i M3, gdzie średnia liczba nowych roślin wynosiła odpowiednio 19,5 i 18,1. Minimalna liczba roślin dla M2 wynosiła 7, a maksymalna 34, podczas gdy dla M3 zakres wynosił od 5 do 31 nowych roślin. Znacznie niższe wartości uzyskano dla M1 i M4 – średnio 12,7 i 12,9 nowych roślin. Rośliny uzyskane na pożywkach M1, M2 i M3 charakteryzowały się smukłym pokrojem i zielonym ubarwieniem. Natomiast rośliny z pożywki M4 były bardziej stwardniałe, wykazywały cechy lekkiej witrifikacji, a liście na końcach przyjmowały czerwony odcień.

Najwyższą liczbę nowych roślin uzyskano w bioreaktorze na pożywce M5, gdzie po czterech tygodniach średnia liczba roślin na eksplantat wynosiła 36,9, z zakresem od 15 do 55 nowych roślin. Wyniki te były istotnie różne w porównaniu z metodą agarową. Morfologia roślin w TIS była zbliżona do tej obserwowanej w pożywkach M1-M3. Analiza statystyczna wykazała, że rozkłady próbek nie spełniały warunków rozkładu normalnego, a test Kruskala-Wallisa potwierdził istotne różnice między metodami ($p < 0,05$). Test wielokrotnych porównań wskazał brak istotnych różnic między pożywkami M1 i M4 oraz między M2 i M3.

Stopień ukorzenia oceniono po trzech tygodniach. Największą skuteczność osiągnięto na pożywce R3 – 84% roślin wykazywało dobrze rozwinięte, długie i nierozgałęzione korzenie. Minimalna liczba ukorzenionych roślin wynosiła 5 na 10, a maksymalna 10. Na pożywce R2 ukorzeniło się jedynie 36% roślin, a na R1 tylko 12%. Korzenie rozwinięte na R2 były krótsze i lekko rozgałęzione, natomiast rośliny na R1 miały bardzo krótkie, nierozgałęzione korzenie. Dodatek węgla aktywnego całkowicie zahamował proces ryzogenezy. Test Kruskala-Wallisa potwierdził istotne różnice między metodami ($p < 0,05$), a analiza wielokrotnych porównań wykazała, że wszystkie metody różniły się istotnie między sobą. Wszystkie rośliny pomyślnie przeszły etap aklimatyzacji w wielodonniczkach i w 100% przeżyły w warunkach szklarniowych, wykazując szybki wzrost. Ze względu na wysoką wartość rynkową *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ istotne jest opracowanie efektywnej metody rozmnażania tej rośliny. W badaniu wykazano, że najlepsze rezultaty w kulturach agarowych osiągnięto na pożywce MS z dodatkiem

1 mg/l BAP. Wei i in. (2015) stwierdzili, że optymalnym medium dla *Pennisetum × advena* 'Rubrum' jest MS z 1,5 mg/l BAP, 0,1 mg/l NAA i 0,5 mg/l IBA, gdzie współczynnik namnażania wynosił 6,5 po 30 dniach. W badaniu własnym, na MS z 1,5 mg/l BAP, ale bez auksyn, uzyskano 18,1 nowych roślin po ośmiu tygodniach, co sugeruje, że czas pasażu znacząco wpływa na efektywność mikrorozmnażania. Zastosowanie wyższego stężenia BAP może dodatkowo zwiększyć liczbę nowych roślin – w *Pennisetum glaucum* na MS z 4 mg/l BAP uzyskano 26,6 nowych pędów po 30 dniach (Maity i in. 2009). Najwyższy procent ukorzenia *Pennisetum × advena* 'Rubrum' osiągnięto na ½ MS z dodatkiem 0,5 mg/l IBA i 0,5 mg/l NAA (84%). Wei i in. (2015) na tym samym medium uzyskali 100% ukorzenia, co może wynikać z różnic genotypowych. Niektórzy badacze sugerują, że węgiel aktywny poprawia ukorzenie (Lambé i in. 1998, Dumas i Monteouis 1995, Sanchez i in. 1996), jednak w badaniu własnym stwierdzono, że dodatek węgla hamował ryzogenezę, prawdopodobnie z powodu adsorpcji auksyn.

Dotychczas nie opisano metod mikrorozmnażania *Pennisetum* w bioreaktorach chociaż TIS wydaje się obiecującą technologią dla komercyjnych laboratoriów kultur tkankowych. Jego główne zalety to kompaktowość i łatwość obsługi oraz ograniczenie witrifikacji w porównaniu ze stałym zanurzeniem (Oakes i in., 2016). TIS charakteryzuje się znacznie szybszym procesem produkcyjnym w porównaniu z kulturami agarowymi. Po czterech miesiącach produkcji z 10 roślin początkowych w TIS uzyskano 474 379 roślin, podczas gdy w kulturach agarowych było to jedynie 195. Oznacza to, że metoda TIS oferuje większą wydajność oraz znacząco skraca czas produkcji. Podobne wyniki osiągnęli inni badacze – Harris i Mason (1983) uzyskali 7-krotnie więcej roślin *Vitis vinifera* w TIS niż w kulturach agarowych, natomiast Tiessera i Vandercook (1985) uzyskali czterokrotnie więcej roślin *Potineria* stosując TIS. W badaniu własnym witrifikacji nie zaobserwowano, a liczba uzyskanych roślin w TIS była o 90% wyższa niż w kulturach agarowych, przy dwukrotnie krótszym czasie namnażania. Podobne rezultaty uzyskali Wojtania i in. (2020) w przypadku suchodrzewu siniego (*Lonicera caerulea* var. *kamtschatica*). Businge i in. (2017) zaobserwowali 100% większy wskaźnik namnażania *Betula pendula*, a w przypadku *Eucalyptus* aż o 500% wyższą wydajność oraz 1100% większą świeżą masę. Uma i in. (2021) stwierdzili, że w TIS mnożenie pędów bananowca było 2,7 razy większe niż w kulturach agarowych. Jiménez i in. (1999) oraz Yan i in. (2010) również wykazali przewagę TIS nad metodą agarową.

4.5. Porównanie kosztów produkcji *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ w kulturach agarowych i TIS

W publikacji 5 przedstawiono porównanie kosztów produkcji *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ w kulturach agarowych i TIS. Analiza liczby pojemników uzyskiwanych dziennie w kulturach agarowych wykazała średnią wartość 107,6, co odpowiada 17,6 pojemnikom na godzinę. Najbardziej efektywną metodą okazał się system TIS, w którym średnia dzienna liczba pojemników wyniosła 191,1, a wydajność godzinowa osiągnęła 31,5. Dla ukorzenia w agarze wartości te były niższe i wyniosły odpowiednio 138,8 dziennie oraz 22,8 na godzinę. Najwyższą efektywność pracy w każdym systemie odnotowano w czwartej godzinie dnia roboczego. W kulturach agarowych liczba pojemników uzyskanych w tym czasie była o 44,4% wyższa niż w pierwszej godzinie pracy, natomiast w TIS i ukorzeniu w agarze wzrost wyniósł odpowiednio 35,0% i 39,2%.

Analiza kosztów zmiennych produkcji *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ wykazała istotne różnice między kulturami agarowymi, a TIS. Największym kosztem zmiennym na rok 2024 w kulturach agarowych była praca ludzka, wynosząca 0,309 USD na jednostkę produkcji czyli wyprodukowanie roślin w jednym pojemniku, podczas gdy w TIS koszt ten był znacznie niższy i wynosił 0,172 USD. W produkcji roślin systemem TIS najwyższą pozycję kosztów zmiennych stanowiły materiały i odczynniki (0,326 USD). Koszt wzrostu roślin był porównywalny – 0,114 USD dla kultur agarowych i 0,113 USD dla TIS. Całkowity koszt produkcji pojedynczej rośliny w agarze wyniósł 0,004 USD, natomiast w TIS produkcja była dwukrotnie tańsza 0,002 USD. Faza ukorzenia stanowiła jeden z najbardziej kosztownych etapów – koszt ukorzenia jednej rośliny wynosił 0,055 USD co znacząco wpływa na ostateczny koszt produkcji, wynoszący 0,068 USD w kulturach agarowych i 0,067 USD w TIS.

Faza ukorzenia okazała się jednym z najdroższych etapów produkcji. Koszt ukorzenia jednej rośliny wynosił 0,055 USD, podczas gdy koszt namnażania w kulturach agarowych wynosił 0,004 USD, a w TIS – 0,002 USD. W związku z tym warto skupić się na optymalizacji tej fazy w systemie TIS, który może pozwolić na dalsze obniżenie kosztów. Spinoso-Castillo i in. (2024) skutecznie ukorzeniaли trzcinę cukrową w systemie TIS, a Lopez i in. (2018) uzyskali *in vitro* regenerację, namnażanie i ukorzenie *Thapsia garganica*.

Koszty pracy stanowią kluczowy czynnik wpływający na opłacalność produkcji *in vitro*. Jak wskazali Tomar i in. (2007), Mirzabe i in. (2022) oraz Pożoga i Olewnicki (2023), udział kosztów pracy w produkcji *in vitro* może wynosić od 60–80% w krajach rozwiniętych i około 40% w krajach rozwijających się (Bhoite i Palshikar 2014). Wyniki badań własnych potwierdzają, że zastosowanie TIS skutecznie redukuje te koszty, zmniejszając ich udział w zmiennych kosztach produkcji z 43% do 23%. Jest to szczególnie istotne w kontekście wzrostu kosztów wynagrodzeń oraz rosnącej inflacji.

5. WNIOSKI I REKOMENDACJE

Na podstawie wyników badań przedstawionych w niniejszej pracy, sformułowano następujące wnioski, które odnoszą się do celu pracy i sformułowanych hipotez.

Dzięki poznaniu struktury kosztów zmiennych produkcji roślin metodą *in vitro* w których koszty pracą mają największy udział, zaproponowano sposoby na zmniejszenie tych kosztów poprzez wprowadzenie odpowiedniego systemu organizacji dnia pracy. Efektywność produkcji została poprawiona poprzez wykorzystanie bioreaktorów okresowo-zalewowych (TIS). Ponadto odpowiednia organizacja dnia pracy w laboratorium kultur tkankowych korzystnie wpływa na wyniki ilościowe produkcji roślin metodą *in vitro*.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Badane przedsiębiorstwa produkujące rośliny metodą *in vitro* w latach 2018-2021, nie odnotowały pogorszenia wyników finansowych, a wręcz przeciwnie, wykazały wzrost przychodów i zysków. Może świadczyć to o dobrej kondycji finansowej branży i dalszych możliwościach inwestowania w nowe technologie.
2. Największym kosztem zmiennym produkcji w kulturach agarowych jest praca ludzka, podczas gdy w bioreaktorze okresowo-zalewowym (TIS) dominują koszty materiałów i odczynników, a udział kosztów pracy jest znacznie niższy.
3. System TIS znacząco zwiększa wydajność produkcji roślin *in vitro*, a także jest bardziej opłacalną metodą mikrorozmnazania w porównaniu z kulturami agarowymi, redukując o 50% koszt produkcji pojedynczej sadzonki.
4. Etap ukorzenia jest najbardziej kosztowną fazą produkcji, niezależnie od wybranej technologii.
5. Efektywność pracy w laboratorium kultur tkankowych nie jest stała w ciągu dnia. Najwyższa produktywność przypada na środek dnia pracy, co wskazuje na potrzebę planowania najbardziej wymagających zadań właśnie na ten czas.
6. Najwyższą produktywność odnotowano, gdy pracownicy przez sześć godzin nieprzerwanie wykonywali główne zadanie polegające na pasażowaniu roślin, co wskazuje, że częste zmiany obowiązków obniżają efektywność pracy.

Rekomendacje

Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące rekomendacje:

1. Zalecane wdrożenie technologii TIS

W laboratoriach produkujących rośliny metodą *in vitro* rekomenduje się wdrożenie systemu bioreaktorów okresowo-zalewowych, które umożliwiają zwiększenie wydajności, skrócenie czasu produkcji oraz obniżenie kosztów jednostkowych sadzonek.

2. Optymalizacja organizacji dnia pracy

Pracę w laboratoriach kultur tkankowych należy organizować zgodnie z rytmem dobowym efektywności – najtrudniejsze zadania powinny przypadać na środek dnia roboczego, a początek i koniec dnia powinien być zarezerwowany na czynności mniej wymagające. Główne zadania powinny być skumulowane między pierwszą, a szóstą godziną pracy.

3. Efektywne zarządzanie kosztami produkcji

Szczególną uwagę należy zwrócić na optymalizację kosztów pracy oraz dobór odczynników i materiałów o wysokiej jakości i przystępnej cenie, gdyż te czynniki mają największy udział w strukturze kosztów zmiennych.

6. SPIS LITERATUREY

1. Abdulmalik M., Usman I.S., Nasir A.U., Lawan A. 2021. Micropropagation of banana (*Musa* spp) using temporary immersion bioreactor system. Bayero J. Pure Appl. Sci. 12: 197–200. <https://doi.org/10.4314/bajopas.v12i2.31>
2. Ahloowalia B.S., Savangikar V.A. 2002. Low cost energy and labour. In: Low-cost options for tissue culture technology in developing countries. Proceedings of a Technical Meeting organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in Vienna. International Atomic Energy Agency, Vienna: 41–46.
3. Bhoite H.A., Palshikar G.S. 2014. Plant tissue culture: A review. World J. Pharm. Sci. 2(6): 565–572.
4. Bosma H., Marmot M.G., Hemingway H., Nicholson A.C., Brunner E., Stansfeld S.A. 1997. Low job control and risk of coronary heart disease. Whitehall II (prospective cohort) study. BMJ 314: 558–565. <https://doi.org/10.1136/bmj.314.7080.558>
5. Bryson A., Forth J. 2007. Productivity and days of the week. Discussion Paper. Royal Society for the Encouragement of Arts, Manufactures & Commerce.
6. Businge E., Trifonova A., Schneider C., Rödel P., Egertsdotter U. 2017. Evaluation of a new temporary immersion bioreactor system for micropropagation of cultivars of Eucalyptus, Birch and Fir. Forests 8: 196. <https://doi.org/10.3390/f8060196>
7. Chaikam V., Gowda M., Martinez L., Ochieng J., Omar H.A., Prasanna B. 2020. Improving the efficiency of colchicine-based chromosomal doubling of maize haploids. Plants 9: 459. <https://doi.org/10.3390/plants9040459>
8. Chiachung C. 2016. Cost analysis of plant micropropagation of *Phalaenopsis*. Plant Cell Tiss. Organ Cult. 126: 167–175. <https://doi.org/10.1007/s11240-016-0987-4>
9. Chunchukov A., Yancheva S. 2015. Micropropagation of *Paulownia* species and hybrids. Ann. Univ. Sofia “St. Kliment Ohridski” Fac. Biol. 100(4): 223–230.
10. Collewet M., Sauermann J. 2017. Working hours and productivity. Discussion Paper Series. IZA Institute of Labor Economics.
11. Costa B.N.S., Neto A.R., Chagas P.C., Chagas E.A., Pasqual M., Vendrame W.A. 2021. Silicon in the anatomy and physiology of banana plant leaves under

- temporary immersion bioreactors. *Agric. Environ. Sci.* 7. <https://doi.org/10.36725/agries.v7i1.5372>
12. Dumas E., Monteuis O. 1995. *in vitro* rooting of micropropagated shoots from juvenile and mature *Pinus pinaster* explants: influence of activated charcoal. *Plant Cell Tiss. Organ Cult.* 40: 231–235. <https://doi.org/10.1007/BF00048128>
 13. EMIS. 2024. <https://www.emis.com/php/macro/overview/index> (dostęp: 2.01.2024).
 14. Escalona M., Lorenzo F.J., González B., Daquinta M., Gonzalez O.J., Desjardins Y., Borroto C. 1999. Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr) micropropagation in temporary immersion systems. *Plant Cell Rep.* 18: 743–748. <https://doi.org/10.1007/s002990050653>
 15. Escandón A.S., Hagiwara J.C., Alderete L.M. 2006. A new variety of *Bacopa monnieri* obtained by *in vitro* polyploidization. *Electron. J. Biotechnol.* 9(3). <https://doi.org/10.4067/S0717-34582006000300002>
 16. Gabryszewska E. 2013. Rozmnażanie *in vitro* roślin ozdobnych. In: Rabiza-Świder J., Skutnik E. (red.), *Ogrodnictwo ozdobne sektorem gospodarki narodowej*. Wydawnictwo SGGW: 41–48.
 17. García-Ramírez Y., Barrera G.P., Freire-Seijo M., Barbón R., Concepción-Hernández M., Mendoza-Rodríguez M.F., Torres-García S. 2019. Effect of sucrose on physiological and biochemical changes of proliferated shoots of *Bambusa vulgaris* Schrad. ex Wendl in temporary immersion. *Plant Cell Tiss. Organ Cult.* 137: 239–247. <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01564-z>
 18. Garris L.B., Monroe L.K. 2005. The color factor. *J. Build.* 99(10): 72–73.
 19. Georgiev V., Schumann A., Pavlov A., Bley T. 2014. Temporary immersion systems in plant biotechnology. *Eng. Life Sci.* 14. <https://doi.org/10.1002/elsc.201300166>
 20. Gianguzzi V., Sottile F. 2024. Temporary Immersion System as an Innovative Approach for *in vitro* Propagation of *Sorbus domestica* L. *Horticulturae* 10: 164. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020164>
 21. Golden L. 2012. The Effects of Working Time on Productivity and Firm Performance, Research Synthesis Paper. *Conditions of Work and Employment Series* 33.

22. Haake A.B. 2011. Individual music listening in workplace settings: An exploratory survey of offices in the UK. *Musicae Scientiae* 15(1): 107–129. <https://doi.org/10.1177/1029864911398065>
23. Haberlandt G. 1902. Kulturversuche mit isolierten Pflanzenzellen. *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien Math. Nat.* 111: 69–91.
24. Haneiko J.B., Henry W.C. 1991. Impacts to construction productivity. *Proc. Am. Power Conf.* 53-II: 897–900.
25. Harris R.E., Mason E.B. 1983. Two machines for *in vitro* propagation of plants in liquid media. *Can. J. Plant Sci.* 63: 311–316. <https://doi.org/10.4141/cjps83-032>
26. Hwang H.D., Kwon S.H., Murthy H.N., Yun S.W., Pyo S.S., Park S.Y. 2022. Temporary Immersion Bioreactor System as an Efficient Method for Mass Production of *in vitro* Plants in Horticulture and Medicinal Plants. *Agronomy* 12: 346. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020346>
27. Jiménez E., Pérez N., Feria M., Barbón R., Capote A., Chávez M., Quiala E., Pérez J.C. 1999. Improved production of potato microtubers using a temporary immersion system. *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 59: 19–23. <https://doi.org/10.1023/A:1006312029055>
28. Kareem Z.J., Su L., Rathgeb A., Sirrenberg A., Hadacek F., Rashid A.H., Karlovsky P. 2019. Small-Scale Bioreactor for Sterile Hydroponics and Hairy Roots: Metabolic Diversity and Salicylic Acid Exudation by Hairy Roots of *Hyoscyamus niger*. *Appl. Sci.* 9: 3044. <https://doi.org/10.3390/app9153044>
29. Karlikova R., Pinosova M., Hricova B. 2016. Lighting quality and its effects on productivity and human health. *Int. J. Interdisciplin. Theory Pract.* 10: 8–12.
30. Kossek E.E., Lee M.D. 2008. Implementing a Reduced-Workload Arrangement to Retain High Talent: A Case Study. *Psychologist-Manager J.* 11(1): 49–64. <https://doi.org/10.1080/10887150801966995>
31. Kossek E.E., Van Dyne L. 2008. Face time matters: A cross-level model of how work-life flexibility influences work performance of individuals and groups. In: *Handbook of Work-Family Integration: Research Theory and Best Practices*, 305–330.
32. Kowalczyk T., Wieczfinska J., Skala E., Śliwiński T., Sitarek P. 2020. Transgenesis as a Tool for the Efficient Production of Selected Secondary

- Metabolites from Plant *in vitro* Cultures. *Plants* 9: 132.
<https://doi.org/10.3390/plants9020132>
33. Kumar P., Sharma N., Sharma S., Mehta N., Verma A.K., Chemmalar S., Sazili A.Q. 2021. In-vitro meat: A promising solution for sustainability of meat sector. *J. Anim. Sci. Technol.* 63(4): 693–724. <https://doi.org/10.5187/jast.2021.e85>
 34. Lambé P., Mutambel H.S., Deltour R. 1998. Somatic embryogenesis in pearl millet (*Pennisetum glaucum*): Strategies to reduce genotype limitation and to maintain long-term totipotency. *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 55: 23–29. <https://doi.org/10.1023/A:1026402229460>
 35. Lawan A., Usman I.S., Nasir A.U., Abdulmalik M. 2021. Micropropagation of pineapple (*Ananas comosus* L. var. Smooth Cayenne) in temporary immersion bioreactor system (TIPS). *Bayero J. Pure Appl. Sci.* 12: 207–209. <https://doi.org/10.4314/bajopas.v12i2.29>
 36. Lesiuk T. 2005. The effect of music listening on work performance. *Psychol. Music* 33(2): 173–191. <https://doi.org/10.1177/0305735605050650>
 37. Lindeque J.M., van der Meschtz A., Slabbert M.M., Henn G. 1991. Variation in phenotype and proteins in plants regenerated from cell suspensions of potato cv. BP1. *Euphytica* 54: 41–44. <https://doi.org/10.1007/BF00145629>
 38. López C.Q., Corral P., Lorrain-Lorrette B. 2018. Use of a temporary immersion bioreactor system for the sustainable production of thapsigargin in shoot cultures of *Thapsia garganica*. *Plant Methods* 14: 79. <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0346-z>
 39. Lyam P.T., Musa M.L., Jamaledine Z.O., Okere U.A., Odofin W.T. 2012. The potential of temporary immersion bioreactors (TIBs) in meeting crop production demand in Nigeria. *J. Biol. Life Sci.* 3: 66–86. <https://doi.org/10.5296/jbls.v3i1.1156>
 40. Maity P.J., Yadav C., Anjaiah V., Bhat V. 2009. *in vitro* plant regeneration through somatic embryogenesis and direct shoot organogenesis in *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. *in vitro Cell. Dev. Biol. Plant* 45: 145–154. <https://doi.org/10.1007/s11627-009-9198-6>
 41. Mamun N.H., Egertsdotter U., Aidun C.K. 2015. Bioreactor technology for clonal propagation of plants and metabolite production. *Front. Biol.* 10: 177–193. <https://doi.org/10.1007/s11515-015-1355-1>

42. Martre P., Lacan D., Just D., Teisson C. 2001. Physiological effects of temporary immersion on *Hevea brasiliensis* callus. *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 67: 25–35. <https://doi.org/10.1023/A:1011666531233>
43. Mirzabe A.H., Hajiahmad A., Fadavi A., Rafiee S. 2022. Temporary immersion systems (TISs): A comprehensive review. *J. Biotechnol.* 357: 56–83. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.08.003>
44. Mohanty S., Panda M.K., Subudhi E., Nayak S. 2008. Plant regeneration from callus culture of *Curcuma aromatica* and *in vitro* detection of somaclonal variation through cytophotometric analysis. *Biol. Plant.* 52: 783–786. <https://doi.org/10.1007/s10535-008-0153-x>
45. Murashige T., Skoog F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.* 15: 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
46. O’Conner L.V. 1969. Overcoming the problems of construction on large central station boilers. *Proc. Am. Power Conf.* 31: –.
47. Oakes A.D., Desmarais T., Powell W.A., Maynard C.A. 2016. Improving rooting and shoot tip survival of micropropagated transgenic American chestnut shoots. *HortScience* 51: 171–176. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.2.171>
48. Parkinson C.N. 1955. Parkinson’s law. *Economist* –: –.
49. Piao X., Chakrabarty D., Hahn E.H., Peak K. 2003. A simple method for mass production of potato microtubers using a bioreactor system. *Curr. Sci.* 84: 1129–1132.
50. Pożoga M., Olewnicki D. 2023. The impact of the organization of the working day on production efficiency in the laboratory of plant tissue cultures. *Sci. Pap. Silesian Univ. Technol. Organ. Manag. Ser.* 170. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.170.25>
51. Precision Reports. 2022. Global plant tissue culture industry research report, growth trends and competitive analysis 2022–2028. [dostęp: 4.02.2024].
52. Regueira M., Rial E., Blanco B., Bogo B., Aldrey A., Correa B. 2018. Micropropagation of axillary shoots of *Salix viminalis* using a temporary immersion system. *Trees Struct. Funct.* 32: 61–71. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1285-5>

53. Rozporządzenie Ministra Finansów z dnia 29 października 2024 r. w sprawie norm szacunkowych dochodu z działów specjalnych produkcji rolnej. Dz.U. z 2024 r., poz. 1628.
54. Sanchez M.C., San-Jose M.C., Ballester A., Vieitez A.M. 1996. Requirements for *in vitro* rooting of *Quercus robur* and *Q. rubra* shoots derived from mature trees. *Tree Physiol.* <https://doi.org/10.1093/treephys/16.8.673>
55. Sarasan V., Cripps R., Ramsay M.M., Atherton C., McMichen M., Prendergast G., Rowntree J.K. 2006. Conservation *in vitro* of threatened plants – progress in the past decade. *in vitro Cell. Dev. Biol. Plant* 42: 206–214. <https://doi.org/10.1079/IVP2006769>
56. Scherer R.F., Garcia A.C., de Freitas Fraga H.P., Dal Vesco L.L., Steinmacher D.A., Guerra M.P. 2013. Nodule cluster cultures and temporary immersion bioreactors as a high performance micropropagation strategy in pineapple (*Ananas comosus* var. *comosus*). *Sci. Hortic.* 151: 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.11.027>
57. Schumann A., Berkov S., Claus D., Gerth A., Bastida J., Codina C. 2012. Production of galanthamine by *Leucojum aestivum* shoots grown in different bioreactor systems. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 167: 1907–1920. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-9743-3>
58. Septi A., Luthfi A.M.S., Irda S. 2021. Microtuber production using temporary immersion system (TIS) bioreactor in potato varieties. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 886. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/886/1/012005>
59. Shepard E., Clifton T. 2000. Are longer hours reducing productivity in manufacturing? *Int. J. Manpow.* 21: 540–553.
60. Spinoso-Castillo J.L., Serrano-Fuentes M.K., Sorcia-Morales M., Bello-Bello J.J. 2024. Temporary immersion bioreactors for sugarcane multiplication and rooting. In: Ramírez-Mosqueda M.A., Cruz-Cruz C.A. (eds) *Micropropagation methods in temporary immersion systems.* *Methods Mol. Biol.* 2759. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3654-1_5
61. Stansfeld S., Candy B. 2006. Psychosocial work environment and mental health—a meta-analytic review. *Scand. J. Work Environ. Health* 32: 443–462. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1050>

62. Staw B.M., Barsade S.G. 1993. Affect and managerial performance: A test of the sadder-but-wiser vs. happier-and-smarter hypotheses. *Adm. Sci. Q.* 38: 304–333. <https://doi.org/10.2307/2393415>
63. Steingroewer J., Bley T., Georgiev V., Ivanov I., Lenk F., Marchev A., Pavlov A. 2013. Bioprocessing of differentiated plant *in vitro* systems. *Eng. Life Sci.* 13. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100226>
64. Street T.D., Lacey S.J., Somoray K. 2019. Employee stress, reduced productivity, and interest in a workplace health program: A case study from the Australian mining industry. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16: 94. <https://doi.org/10.3390/ijerph16010094>
65. Street T.D., Lacey S.J. 2018. Accounting for employee health: The productivity cost of leading health risks. *Health Promot. J. Aust.* 30: 228–237. <https://doi.org/10.1002/hpja.200>
66. Takayama S., Akita M. 1994. The types of bioreactors used for shoots and embryos. *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 39: 147–156. <https://doi.org/10.1007/BF00033922>
67. Theorell T., Hammarström A., Aronsson G., Träskman Bendz L., Grape T., Hogstedt C., Marteinsdottir I., Skoog I., Hall C. 2015. A systematic review including meta-analysis of work environment and depressive symptoms. *BMC Public Health* 15: 738. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-1954-4>
68. Tisserat B., Vandercook C.E. 1985. Development of an automated plant culture system. *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 5: 107–117. <https://doi.org/10.1007/BF00040307>
69. Tomar U.K., Negi U., Sinha A.K., Kumar P. 2007. An overview on economic factors influencing micropropagation. *My Forest* 43: 523–534.
70. Uma S., Karthic R., Kalpana S. 2021. A novel temporary immersion bioreactor system for large scale multiplication of banana (Rasthali AAB—Silk). *Sci. Rep.* 11: 20371. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99923-4>
71. Uma S., Karthic R., Kalpana S., Backiyarani S. 2023. Evaluation of temporary immersion bioreactors for *in vitro* micropropagation of banana (*Musa* spp.) and genetic fidelity assessment using flow cytometry and simple-sequence repeat markers. *S. Afr. J. Bot.* 157: 553–565. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.04.006>

72. Venkateswarlu B., Mukhopadhyay J., Sreenivasan E., Kumar Moses. 2001. Micropropagation of *Paulownia fortunei* through *in vitro* axillary shoot proliferation. *Indian J. Exp. Biol.* 39: 594–599.
73. Vischer J.C. 1989. Environmental quality in office. Van Nostrand Reinhold, New York.
74. Wang M.R., Cui Z.H., Li J.W., Hao X.Y., Zhao L., Wang Q.C. 2018. *in vitro* thermotherapy-based methods for plant virus eradication. *Plant Methods* 14: 87. <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0355-y>
75. Wei J.J., Li L.F., Yu X.B. 2015. Tissue culture and rapid propagation of *Pennisetum setaceum* 'Rubrum'. *Plant Physiol. J.* 51: 207–211. <https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2014.0622>
76. Werner S., Maschke R., Eibl D., Eibl R. 2017. Bioreactor technology for sustainable production of plant cell-derived products. *Eng. Life Sci.* 17. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54600-1_6
77. Wojtania A., Markiewicz M., Góraj-Koniarska J. 2020. Ex vitro rooting, acclimatization and genetic stability of *Lonicera caerulea* var. *kamtschatica*. *J. Hortic. Res.* 28: 61–70. <https://doi.org/10.2478/johr-2020-0019>
78. Yan H., Liang C., Li Y. 2010. Improved growth and quality of *Siraitia grosvenorii* plantlets using a temporary immersion system. *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 103: 131–135. <https://doi.org/10.1007/s11240-010-9752-2>
79. Yoshio M., Seiichiro K. 2000. Discovery of auxin. In: Kung S.D., Yang S.F. (eds) *Discoveries in plant biology*. World Scientific, pp. 43–57.
80. Zhang B.S., Pan X., Jin L., Xu D., Zhang B., Duns G.J., Shi J., Chen J. 2018. Optimization of nutritional conditions using a temporary immersion bioreactor system for the growth of *Bletilla striata* pseudobulbs and accumulation of polysaccharides. *Sci. Hortic.* 240: 155–161. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122414>

**7. ARTYKUŁY NAUKOWE I OŚWIADCZENIA
WSPÓLAUTORÓW**

Mgr inż. Mariusz Pozoga

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ORCID: 0000-0001-6753-0696
e-mail: mariuszpozoga@gmail.com

Dr hab. Dawid Olewnicki

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ORCID: 0000-0002-3096-3882
e-mail: dawid_olewnicki@sggw.edu.pl

Dr Kinga Cichocka

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ORCID: 0000-0002-6948-8863
e-mail: kc.cichocka@gmail.com

Ocena kondycji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstw produkujących rośliny metodami in vitro

Assessment of the economic and financial condition of companies producing plants using in vitro methods

Streszczenie

Celem pracy była ocena kondycji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstw produkujących rośliny metodami in vitro. Chociaż na świecie produkcja roślin metodami in vitro jest perspektywiczną i obiecującą branżą, to wymaga dużych nakładów finansowych. Jest to produkcja wysoko kapitałochłonna. Polska od lat należy do liczących się producentów roślin produkowanych tymi metodami, jednak z uwagi na rosnące koszty pracy i innych czynników produkcji istotne są badania dotyczące rentowności przedsiębiorstw z omawianej branży i określenia ich szans rozwoju na przyszłość. Przeprowadzona analiza nie wykazała jednoznacznych przesłanek o zagrożeniu działalności dla badanych przedsiębiorstw, ale niezbędna jest obserwacja ich kondycji finansowej w kolejnych okresach.

Słowa kluczowe

in vitro, produkcja, zysk, opłacalność

Abstract

The aim of the study was to assess the economic and financial condition of enterprises producing plants using in vitro methods. Although the production of plants using in vitro methods is a promising and promising industry worldwide, it requires large financial outlays. This is a highly capital-intensive production. Poland has been a major producers of plants using these methods, but due to the rising costs of labor and other production factors, research on the profitability of enterprises in this industry and determining their development opportunities for the future is important. The analysis carried out did not reveal any clear indications of a threat to the activities of the surveyed enterprises, but it is necessary to monitor their financial condition in subsequent periods.

Keywords

in vitro, production, profit, profitability

JEL: G30, M41

Wstęp

Hodowla roślinnych kultur in vitro stanowi fundamentalną dyscyplinę w dziedzinie biotechnologii roślin, przyczyniając się do dogłębnego zrozumienia wzrostu i rozwoju roślin na poziomie komórkowym. Obejmuje ona hodowlę określonych komórek, tkanek lub narządów na skrupulatnie zaprojektowanej, sterylnej pożywce, w dokładnie kontrolowanych warunkach temperatury, światła i wilgotności (Thorpe, 2007). Techniki kultur in vitro pozwalają na uprawę dużej liczby roślin na ograniczonej przestrzeni w środowisku wolnym od mikroorgani-

zmów. Kluczowe zalety kultur tkankowych roślin obejmują szybki wzrost, rozmnażanie oraz zdolność do regeneracji roślin wolnych od chorób.

Rynek roślin produkowanych metodami in vitro opiera się na zaawansowanych technologiach i należy do bardzo perspektywicznych rynków. Jest odpowiedzią na rosnące potrzeby ograniczania zużycia surowców i poprawy efektywności wykorzystania zasobów, gdyż – w porównaniu z konwencjonalną produkcją szkółkarską roślin ozdobnych – produkowane są miliony roślin przy niewielkim zużyciu wody oraz dostępnej powierzchni. Generalnie w wielu rodzajach produkcji in vitro, np. w produkcji mięsa,

wytwarzany jest znacznie mniejszy ślad węglowy niż w standardowej produkcji rolnej (Kumar i in., 2021). Produkcja *in vitro* umożliwia uzyskiwanie w krótkim czasie jednorodnych, dużych partii roślin o bardzo wysokiej jakości handlowej, wolnych od szkodników i patogenów, spełniających międzynarodowe normy fitosanitarne, co w branży handlowej jest wyjątkowo pożądane. Przewiduje się, że w ciągu najbliższych lat rynek ten będzie się rozwijał ze skumulowanym rocznym tempem wzrostu (CAGR) na poziomie 8,6%. Tylko w USA ma wzrosnąć z 167,46 mln dol. w 2022 r. do 277,27 mln dol. w roku 2028, osiągając w latach 2023–2028 roczną skumulowaną stopę wzrostu (CAGR) wynoszącą 8,8%. Natomiast w Europie oczekuje się jej wzrostu z 128,52 mln dol. w roku 2022 do 211,16 mln dol. w roku 2028 przy rocznym skumulowanym tempie wzrostu (CAGR) 8,6% (Precision Reports, 2022). Należy również podkreślić, że według dostępnych raportów Polska od wielu lat zajmuje ważne miejsce wśród europejskich producentów roślin metodami *in vitro*. Pod koniec ubiegłego stulecia nasz kraj zajmował trzecie miejsce w Europie. Jednakże na początku XXI w. nastąpił znaczący spadek tej produkcji w Europie ze względu na przeniesienie laboratoriów do Azji. Do roku 2000 w Europie działało ok. 140 operacyjnych laboratoriów komercyjnych (z ponad 40 laboratoriami w Polsce). W 2013 r. Polska miała ok. 20 aktywnych laboratoriów komercyjnych, rocznie produkujących od 40 do 100 mln roślin, z których większość (80–90%) stanowiły gatunki roślin ozdobnych (Gabryszewska, 2013). W ostatnich latach według szacunków własnych wykonanych na podstawie danych pochodzących z bazy Emerging Markets Information Service (EMIS) oraz Panoramy Firm, największej bazy kontaktowej firm w Polsce, w kraju funkcjonowało 15 laboratoriów komercyjnych, a szacowana produkcja roślin na podstawie wywiadów z największymi producentami z tej branży wynosiła ok. 80 mln roślin.

Chociaż na świecie produkcja roślin metodami *in vitro* jest perspektywiczną i obiecującą branżą, to wymaga dużych nakładów finansowych. Główne koszty inwestycyjne wiążą się z wyposażeniem laboratoriów w środki trwałe, które stanowią ponad 40% kosztów ogólnych, przewyższając łączne koszty amortyzacji budynków i szklarni. Podstawowe wyposażenie znajdujące się w większości laboratoriów kultur tkankowych obejmuje autoklawy, niezbędne do sterylizacji pożywek i naczyń laboratoryjnych, ponadto komory laminarnego przepływu powietrza do zakładania kultur i przenoszenia roślin na kolejne pożywki w środowisku wolnym od zanieczyszczeń mikrobiologicznych, specjalistyczne lampy UV do dezynfekcji pomieszczeń, urządzenia chłodnicze i wiele innych (Bhoite & Palshikar, 2014). Głównym wyzwaniem dla laboratoriów *in vitro* są również wysokie koszty pracy.

W krajach rozwiniętych koszty pracy mogą sięgać 60–80% (Tomar i in., 2007; Chiachung, 2016), podczas gdy w krajach rozwijających się około 40% ogólnych kosztów (Bhoite & Palshikar, 2014). W Polsce koszty pracy w kontekście zmiennych kosztów produkcji wynoszą 48% (Pożoga i in., 2019). Obecna sytuacja związana z rosnącą inflacją i presją na wzrost wynagrodzeń powoduje dalszy wzrost udziału kosztów pracy. Może to prowadzić do zmniejszenia rentowności produkcji. Rosnące koszty energii także wpływają na rentowność, więc w przyszłości przedsiębiorstwa z tej branży będą musiały inwestować w nowe technologie, takie jak bioreaktory i automatyczne transplantery. Należy również podkreślić, że produkcja roślin metodami *in vitro* jest działem specjalnym produkcji rolnej, który obciążony jest relatywnie dużym podatkiem od działów specjalnych, z uwagi na wysokie normy szacunkowe dochodu. Przykładowo w 2023 r. szacunkowa roczna norma dochodu z tej działalności w przeliczeniu na 1 m² półki wynosiła 234,06 zł (Dz.U. 2022, poz. 2478). Reasumując, należy wskazać, że produkcja ta należy do koszt- i kapitałochłonnych rodzajów produkcji. Istotną zatem staje się ocena kondycji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstw produkujących rośliny metodami *in vitro*, która powinna umożliwić odpowiedź na pytanie, czy omawiana branża w ostatnich latach była rentowna i czy możliwy jest ponowny rozwój tego działu produkcji rolnej. Taki jest cel niniejszej publikacji. Ponadto postawiono następującą hipotezę badawczą: okres niepewności rynkowej, który przypadał szczególnie na lata 2020–2021, tj. pandemii COVID-19, wpłynął na pogorszenie większości wskaźników ekonomicznych charakteryzujących badane przedsiębiorstwa.

Metodyka

W celu dokonania analizy ekonomiczno-finansowej wykorzystano sprawozdania finansowe dostępne w systemie EMIS. Do badań wybrano podmioty działające na podstawie kodu PKD 01.30. Z dotyczącego rozmnażania roślin. W sposób celowy wybrano trzy podmioty produkujące rośliny metodami *in vitro*, będące spółkami z ograniczoną odpowiedzialnością, dla których możliwe było zbudowanie czteroletniego szeregu czasowego sprawozdań, tj. z lat 2018–2021. Należy zaznaczyć, że przedział ten uwzględniał funkcjonowanie przedsiębiorstw w okresie pandemii COVID-19, co mogło mieć wpływ na ich wyniki finansowe. Ze względu na konieczność zachowania anonimowości badanych jednostek na potrzeby badań nazwano je spółkami A (z siedzibą w województwie mazowieckim, zatrudniająca 129 osób, z kapitałem podstawowym 8000 zł), B (z siedzibą w województwie małopolskim, zatrudniająca 79 osób, z kapitałem podstawowym 11 000 zł)

i C (z siedzibą w województwie kujawsko-pomorskim, zatrudniająca 19 osób, z kapitałem podstawowym 220 000 zł). Podstawowe dane finansowe wskazują, że spółka A jest spółką z rozwiniętą działalnością sprzedażową (z przewagą aktywów obrotowych) finansującą się zewnętrznie, spółka B jest samofinansującą spółką produkcyjną (z przewagą aktywów trwałych i kapitałów własnych), spółka C zaś jest przedsiębiorstwem produkcyjno-sprzedażowym korzystającym z finansowania zewnętrznego. Suma bilansowa poszczególnych spółek oraz osiągnięte wyniki pozwalają podejrzewać, że spółka C jest przedsiębiorstwem o ugruntowanej pozycji na rynku, na którym działa od lat.

Oceny kondycji ekonomiczno-finansowej trzech spółek dokonano poprzez pionową i poziomą analizę bilansu oraz rachunku zysków i strat, a także szeroką analizę wskaźnikową. Podstawą analizy pionowej (strukturalnej) w przypadku bilansu było ustalenie procentowego udziału poszczególnych jego pozycji w sumie bilansowej po stronie zarówno aktywów (struktura majątku), jak i pasywów (struktura źródeł finansowania), co umożliwiło określenie kondycji jednostek w zakresie sytuacji majątkowo-kapitałowej. Z kolei analiza pozioma pozwoliła ustalić dynamikę zmian wartości poszczególnych pozycji bilansu, a także rachunku zysków i strat. Z uwagi na specyficzny charakter każdej analizowanej pozycji bilansowej, które mogą przyjmować wartości ujemne, w obliczeniach dynamiki zastosowano metodę polegającą na wykazaniu relacji między wartościami w poszczególnych latach a wartością z roku bazowego, zgodnie z poniższym wzorem:

$$\Delta x = \frac{x_m - x_{t_1}}{|x_{t_1}|} \times 100\%,$$

gdzie:

x – wartość analizowanej pozycji bilansowej,
 t_1, t_n – badane okresy.

Za rok bazowy t_1 przyjęto rok 2018. Analiza wstępna poza oceną ekonomiczno-finansową po-

zwoliła mniej lub bardziej dokładnie określić specyfikę działalności badanych spółek, co jest istotne z punktu widzenia celu określonego w pracy. Niestety informacje te nie są dostępne w raportach EMIS, spółki te bowiem nie mają obowiązku publikacji sprawozdania z działalności.

Rozwinięciem analizy wstępnej była analiza wskaźnikowa, która polegała na wyliczeniu szeregu wskaźników oraz ich interpretacji przy zwróceniu szczególnej uwagi na ich zmiany w czasie. W badaniu wykorzystano wskaźniki płynności, rentowności, zadłużenia, a także wybrane wskaźniki ekonomiczne (tabela 2).

Wyniki badań

Analiza struktury bilansu

Spółka A przez cały badany okres wykazywała dominację aktywów obrotowych w strukturze majątku, jednak z tendencją malejącą ich udziału w aktywach ogółem. W 2018 r. aktywa obrotowe stanowiły aż 99,69% aktywów ogółem (tabela 3). Spółka nie wykazywała wówczas rzeczowego majątku trwałego, a po stronie aktywów trwałych odnotowano jedynie rozliczenia międzyokresowe o udziale 0,31% w aktywach ogółem. W kolejnych latach udział aktywów obrotowych się zmniejszał, m.in. ze względu na rosnącą wartość i udział aktywów trwałych. W 2019 r. spółka wykazała w bilansie środki trwałe w budowie, a w kolejnych latach – inne składniki majątku trwałego. W 2021 r. po stronie aktywów trwałych po raz pierwszy wykazano nieruchomości. Biorąc pod uwagę charakter prowadzonej działalności, można się spodziewać, że w poprzednich latach spółka wynajmowała laboratorium wraz ze sprzętem. Na koniec badanego okresu majątek trwały stanowił 31,58%, a majątek obrotowy – 68,42% aktywów. Warto zaznaczyć, że po stronie aktywów obrotowych obserwowany był spadek udziału zapasów względem roku 2018.

Tabela 1. Podstawowe dane finansowe spółek A, B i C w latach 2018–2021 [tys. zł]

Nazwa	Średnia 2018–2021		
	A	B	C
Aktywa trwałe	422	10 367	46 878
Aktywa obrotowe	2 285	4 292	46 376
Kapitały własne	695	10 308	28 077
Zobowiązania ogółem	2 012	4 352	65 178
Przychody ze sprzedaży	7 936	13 608	101 739
Zysk netto	465	1 001	2 801

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych EMIS.

Tabela 2. Wskaźniki i ich wzory wykorzystane w badaniach

Nazwa	Wzór
Rentowność kapitału [%]	$ROE = \frac{\text{zysk netto}}{\text{kapitał własny}} \times 100$
Rentowność aktywów [%]	$ROA = \frac{\text{zysk netto}}{\text{aktywa ogółem}} \times 100$
Rentowność sprzedaży [%]	$ROS = \frac{\text{zysk netto}}{\text{przychody ze sprzedaży}} \times 100$
Wskaźnik bieżącej płynności	$CR = \frac{\text{aktywa obrotowe}}{\text{zobowiązania krótkoterminowe}}$
Wskaźnik wysokiej płynności	$QR = \frac{\text{aktywa obrotowe} - \text{zapasy} - \text{rozliczenia międzyokresowe}}{\text{zobowiązania krótkoterminowe}}$
Wskaźnik zadłużenia ogółem [%]	$\text{Wskaźnik zadłużenia ogółem} = \frac{\text{kapitał obcy}}{\text{aktywa ogółem}}$
Wskaźnik zadłużenia długoterminowego	$\text{Wskaźnik zadłużenia długoterminowego} = \frac{\text{zobowiązania długoterminowe}}{\text{kapitał własny}}$
Wskaźnik pokrycia odsetek	$\text{Wskaźnik pokrycia odsetek} = \frac{\text{zysk brutto} + \text{odsetki}}{\text{odsetki}}$
Wskaźnik struktury kapitału	$\text{Wskaźnik struktury kapitału} = \frac{\text{kapitał własny}}{\text{kapitał obcy}}$
Wskaźnik struktury majątku	$\text{Wskaźnik struktury majątku} = \frac{\text{majątek trwały}}{\text{majątek całkowity}} \times 100$
Syntetyczny wskaźnik sytuacji finansowej	$\text{Syn. wskaźnik sytuacji finansowej} = \frac{\text{wskaźnik struktury kapitału}}{\text{wskaźnik struktury majątku}}$

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Antczak, 2014; Dynus i in., 2002; Gad, 2015; Gołębiowski & Tłaczała, 2005.

Spółka A finansowała się głównie dzięki funduszom zewnętrznym, jednak z rosnącym znaczeniem kapitału własnego. W 2018 r. kapitał własny stanowił 11,48%, a w 2019 r. – jedynie 1,89% pasywów. W tych latach spółka nie wykazała zobowiązań długoterminowych, zatem dominowały zobowiązania krótkoterminowe, w tym pożyczki o terminie spłaty do 12 miesięcy oraz zobowiązania handlowe. W 2020 r. w bilansie wykazano zobowiązanie długoterminowe o udziale 1,83% w pasywach ogółem, którego udział wzrósł w kolejnym roku do 10,32%. Jednocześnie w 2021 r. znacząco zmalał udział zobowiązań krótkoterminowych, zarówno tych względem dostawców, jak i tych względem pożyczkodawców. Udział kapitału własnego wzrósł do 48,37% – to oznacza, że spółka zwiększała poziom samofinansowania, co należy rozpatrywać pozytywnie.

Spółka B przez cały analizowany okres, tj. 2019–2021, prezentowała aktywa trwałe o udziale wyższym niż 64%. Początkowo aktywa trwałe stanowiły 80,21% aktywów ogółem, na co składały się przede wszystkim rzeczowe aktywa trwałe (44,42% aktywów ogółem) oraz wartości niematerialne i prawne (35,46% aktywów ogółem). Jest to zjawie-

ska charakterystyczne dla podmiotów z branży producentów roślin hodowanych metodami in vitro, które do prowadzenia podstawowej działalności potrzebują laboratorium, zaawansowanego technologicznie sprzętu oraz oprogramowania. W kolejnym roku udział aktywów trwałych znacząco zmalał ze względu na zmniejszenie się udziału zarówno rzeczowych aktywów trwałych, jak i wartości niematerialnych oraz prawnych przy jednoczesnym wzroście udziału środków pieniężnych (z 2,15% do 15,97%) po stronie aktywów ogółem. Na koniec badanego okresu aktywa trwałe spółki B stanowiły 68,83% aktywów ogółem, z czego rzeczowe aktywa trwałe stanowiły 47,33% (gdzie dominowały nieruchomości), a wartości niematerialne i prawne – 19,94% (co oznaczało zmniejszenie ich udziału w strukturze względem lat poprzednich). Aktywa obrotowe stanowiły zaś 59,83%, na co głównie składały się należności handlowe (14,54%) oraz gotówka (14,25%). Jednocześnie odnotowano spadek udziału zapasów z 8,11% w 2018 r. do 1,68% w 2021 r., z czego w strukturze rozpoznano jedynie „pozostałe zapasy”.

Spółka B – w przeciwieństwie do spółki A – korzystała z samofinansowania swojej działalności.

Kapitał własny spółki w 2019 r. wyniósł 76,17% i zmniejszył się w kolejnym roku do 70,87%, m.in. ze względu na wzrost udziału pożyczek długoterminowych (z 2,26% do 12,65%). W 2021 r. spółka B w 66,19% finansowała swoją działalność środkami własnymi, a w 33,81% – funduszami zewnętrznymi, z czego 22,19% stanowiły zobowiązania krótkoterminowe, głównie handlowe.

Natomiast spółka C w latach 2018 i 2019 wykazywała przewagę aktywów obrotowych w strukturze majątku, których udział wynosił odpowiednio 59,83% i 67,47%, a wśród nich dominowały należności handlowe (tabela 3). W zakresie aktywów trwałych w tych latach największy udział miały rzeczowe aktywa trwałe z udziałem odpowiednio 39,32% i 31,48%, a wśród nich największe znaczenie miały nieruchomości. W kolejnych latach obserwowany był znaczący wzrost udziału inwestycji długoterminowych, który przełożył się na wzrost udziału aktywów trwałych w strukturze. Jednocześnie obserwowany był sukcesywny spadek udziału nieruchomości oraz pojazdów i urządzeń związanych z ich amortyzacją, a tym samym spadkiem wartości bilansowej. W zakresie aktywów obrotowych w latach 2020 i 2021 odnotowano znaczący wzrost udziału środków pieniężnych (z 1,10% w 2019 r. do 12,90% w 2020 r. i 11,87% w 2021 r.) przy jednoczesnym spadku udziału należności (z 54,05% do odpowiednio 14,12% i 14,75%).

Spółka C w większości finansowała się zewnętrznie. Kapitał własny wahał się od 26,47% w 2019 r. do 33,86% w 2021 r. Po stronie zobowiązań większy udział miały zobowiązania krótkoterminowe, w tym pożyczki oraz zobowiązania handlowe. Spółka przez cały badany okres wykazywała także długoterminowe kredyty i pożyczki, których udział najniższy był w 2019 r. (9,57%), a najwyższy w 2020 r. (22,35%). W 2021 r. obserwowane było zmniejszenie udziału pożyczek, zarówno długo-, jak i krótkoterminowych, względem poprzedniego roku, co wskazuje na ich sukcesywne spłacanie.

Analiza dynamiki bilansu

Analiza bilansu spółki A wykazała wysoką dynamikę głównych pozycji bilansowych. Aktywa ogółem w 2021 r. były prawie 17 razy wyższe niż w 2019 r. (tabela 4). Szczególnie wysoki wzrost dotyczył aktywów trwałych, których wartość na koniec analizowanego okresu była aż 1716 razy wyższa niż w 2018 r. stanowiącym rok bazowy dla tej analizy. Wspomniany wzrost wartości miał wpływ na wzmiankowany wcześniej wzrost udziału tej pozycji bilansowej w strukturze majątku. Wartość aktywów obrotowych na koniec badanego okresu była prawie 12 razy wyższa, przy czym najwyższy wzrost

wartości dotyczył należności handlowych i gotówki (odpowiednio 23,8 i 25,3 razy). Po stronie pasywów największy wzrost wartości dotyczył kapitału własnego, który w 2021 r. był 71,4 razy wyższy niż początkowo, co należy oceniać pozytywnie, ponieważ spółka dążyła do zwiększenia poziomu samofinansowania. Wartość kapitału obcego była 9,9 razy wyższa niż w 2018 r., jednak znacznie niższa niż w 2020 r., kiedy to zobowiązania ogółem były aż 19,5 razy wyższe niż w okresie bazowym, co wynikało z pojawienia się zobowiązania długoterminowego oraz wzrostu wartości pożyczek krótkoterminowych i zobowiązań handlowych. W kolejnych latach wartość tych dwóch ostatnich pozycji znacznie zmalała, co należy ocenić pozytywnie – oznacza to bowiem, że spółka spłaciła znaczną część tych zobowiązań. Tak wysoka dynamika zmian w bilansie wskazuje na intensywny rozwój przedsiębiorstwa oraz jego działalności, szczególnie w okresie pandemii COVID-19.

Dynamika zmian spółek B i C była znacznie niższa. Wartość majątku spółki B w 2020 r. była 1,1 razy wyższa, a w 2021 r. – 1,6 razy wyższa niż w 2019 r. stanowiącym rok bazowy dla tej spółki. W 2020 r. wartość aktywów trwałych była niższa niż w 2019 r. i stanowiła 90,63% wartości początkowej. Zmniejszenie wartości majątku trwałego wynikało z zastosowania odpisów amortyzacyjnych i obniżenia ich wartości bilansowej. Rozpoczęcie budowy środków trwałych i nabycie nowych zwiększyło jednak ich wartość do poziomu 134,72% pomimo obserwowanego stopniowego zmniejszenia wartości niematerialnych i prawnych. Z kolei w zakresie aktywów obrotowych obserwowany był stopniowy wzrost wartości, która na koniec 2021 r. była prawie 2,5 razy wyższa niż w roku bazowym. Największy wzrost dotyczył środków pieniężnych, których wartość była aż 10,4 razy wyższa. Zmniejszeniu natomiast uległa wartość zapasów, które na koniec analizowanego okresu stanowiły zaledwie 32,62% wartości początkowej. Po stronie pasywów obserwowany był wzrost wartości kapitału zarówno własnego, jak i obcego, przy czym większy dotyczył tego drugiego. Kapitał własny w 2021 r. był 1,4 razy większy niż początkowo, a wartość zobowiązań ogółem była 2,2 razy większa. Zobowiązania długoterminowe były ok. czterech razy wyższe niż w 2019 r., a największy procentowy wzrost wartości dotyczył pozycji „pozostałe długoterminowe zobowiązania finansowe”, jednak jej początkowa wartość absolutna była relatywnie niska. Wartość zobowiązań długoterminowych w 2020 r. była niższa niż w 2019 r. i stanowiła 81,11% wartości bazowej. Wzrosła jednak w roku kolejnym, stanowiąc ostatecznie 1,8-krotność wartości bazowej.

W spółce C w 2019 r. wartość aktywów ogółem była 1,3 razy wyższa niż w 2018 r., jednak w kolej-

Tabela 3. Struktura bilansu spółek A, B i C w latach 2018–2021 [%]

Nazwa	A				B				C			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
Aktywa ogółem	100,00	100,00	100,00	100,00	.	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Aktywa trwałe	0,31	3,34	8,41	31,58	.	80,21	64,90	68,83	40,17	32,53	63,06	64,23
Rzeczowe aktywa trwałe	0,00	0,00	8,31	31,24	.	44,42	34,82	47,33	39,32	31,48	30,60	29,41
Nieruchomości	0,00	0,00	0,00	22,73	.	14,57	12,53	32,53	26,74	21,56	22,34	22,36
Pojazdy i urządzenia	0,00	0,00	0,51	3,16	.	27,26	20,55	14,48	12,58	9,83	8,16	6,98
Pozostałe składniki majątku	0,00	0,00	7,80	5,35	.	2,59	1,74	0,32	0,00	0,09	0,09	0,07
Środki trwałe w budowie	0,00	3,34	0,10	0,34	.	0,26	0,22	0,98	0,01	0,03	0,08	0,35
Inwestycje długoterminowe	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	0,00	0,00	0,85	0,71	32,30	34,42
Wartości niematerialne i prawne oraz wartość firmy	0,00	0,00	0,00	0,00	.	35,46	29,80	19,94	0,00	0,00	0,00	0,00
Rozliczenia międzyokresowe	0,31	0,00	0,00	0,00	.	0,08	0,06	0,58	0,00	0,32	0,07	0,05
Należności długoterminowe handlowe i pozostałe	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aktywa obrotowe	99,69	96,66	91,59	68,42	.	19,79	35,10	31,17	59,83	67,47	36,94	35,77
Zapasy	64,98	8,41	5,59	18,26	.	8,11	8,17	1,68	8,20	12,24	9,84	9,07
Surowce	0,00	0,00	1,22	2,95	.	0,02	0,02	0,00	6,92	8,78	6,06	5,37
Półprodukty i produkty w toku	64,98	8,41	4,29	15,15	.	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wyroby gotowe	0,00	0,00	0,00	0,00	.	7,66	7,79	1,63	0,00	0,21	0,98	0,59
Pozostałe zapasy	0,00	0,00	0,07	0,17	.	0,31	0,35	0,05	1,28	3,24	2,80	3,11
Należności handlowe i inne	24,56	72,47	27,71	34,45	.	7,72	10,14	14,54	46,02	54,06	14,12	14,75
Zaliczki, rozliczenia międzyokresowe i pozostałe aktywa	0,00	1,58	0,48	0,58	.	1,80	0,83	0,70	0,08	0,08	0,07	0,10
Gotówka i ekwiwalenty	10,14	14,20	57,80	15,14	.	2,15	15,97	14,25	5,53	1,10	12,90	11,87
Pasywa ogółem	100,00	100,00	100,00	100,00	.	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Kapitał własny ogółem	11,48	1,89	17,83	48,37	.	76,17	70,87	66,19	30,18	26,47	30,10	33,86
Kapitał własny spółki dominującej	11,48	1,89	17,83	48,37	.	76,17	70,87	66,19	30,18	26,47	30,10	33,86

Nazwa	A				B				C			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
	Zobowiązania ogółem	88,52	98,11	82,17	51,63	.	23,83	29,13	33,81	69,82	73,53	69,90
Zobowiązania długoterminowe	0,00	0,00	4,68	11,19	.	4,48	15,12	11,62	21,48	15,64	29,68	22,99
Długoterminowe kredyty i pożyczki	0,00	0,00	1,83	10,32	.	2,26	12,65	5,56	13,56	9,57	22,35	13,58
Pozostałe długoterminowe zobowiązania finansowe	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,04	2,47	4,62	1,51	1,13	0,72	0,52
Długoterminowe rozliczenia międzyokresowe	0,00	0,00	0,00	0,00	.	2,18	0,00	0,00	5,99	4,59	6,23	8,35
Rezerwy z tytułu pozostałych zobowiązań i obciążeń	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,00	0,00	1,45	0,00	0,00	0,02	0,15
Pozostałe zobowiązania długoterminowe	0,00	0,00	2,85	0,87	.	0,00	0,00	0,00	0,42	0,35	0,37	0,39
Zobowiązania krótkoterminowe	88,52	98,11	77,49	40,44	.	19,35	14,01	22,19	48,34	57,89	40,22	43,15
Pożyczki krótkoterminowe	43,93	46,74	26,38	2,50	.	4,00	3,33	2,34	16,35	14,35	25,91	22,65
Pozostałe finansowe zobowiązania krótkookresowe	0,00	0,00	0,00	0,00	.	1,65	0,72	1,20	0,64	0,53	4,38	0,53
Zobowiązania handlowe i inne	44,59	51,37	51,11	37,93	.	13,15	9,32	17,85	30,97	42,75	9,34	18,72
Krótkoterminowe rozliczenia międzyokresowe	0,00	0,00	0,00	0,00	.	0,27	0,19	0,39	0,39	0,25	0,59	1,24

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych EMIS.

Tabela 4. Dynamika bilansu spółek A, B i C w latach 2018–2021 [%]

Nazwa	A				B				C			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
Aktywa ogółem		863,49	2 098,00	1 694,93	157,00		112,02	157,00		123,53	121,66	117,88
Aktywa trwałe		9 247,89	56 601,41	171 614,08	134,72		90,63	134,72		100,03	190,96	188,47
Rzeczowe aktywa trwałe		0,00	100,00	303,74	167,30		87,81	167,30		98,90	94,67	88,18
Nieruchomości		0,00	0,00	100,00	350,53		96,30	350,53		99,61	101,64	98,57
Pojazdy i urządzenia		0,00	100,00	505,14	83,38		84,47	83,38		96,48	78,96	65,43
Pozostałe składniki majątku		0,00	100,00	55,42	19,44		75,33	19,44		8 923,08	8 741,35	6 352,88
Środki trwałe w budowie		0,00	100,00	260,00	596,48		98,80	596,48		416,97	1 381,36	5 489,18
Inwestycje długoterminowe		0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00		103,27	4 649,76	4 801,04
Wartości niematerialne i prawne oraz wartość firmy		0,00	0,00	0,00	88,29		94,14	88,29		0,00	0,00	0,00
Rozliczenia międzyokresowe		0,00	0,00	0,00	1 157,65		91,76	1 157,65		100,00	22,37	13,66
Aktywa obrotowe		887,25	1 927,46	1 163,27	247,34		198,75	247,34		139,31	75,13	70,49
Zapasy		111,75	180,57	476,22	32,62		112,89	32,62		184,34	146,08	130,35
Surowce		0,00	100,00	194,42	0,00		137,89	0,00		156,85	106,52	91,57
Półprodukty i produkty w toku		111,75	138,65	395,05	0,00		11,58	0,00		0,00	0,00	0,00
Wyroby gotowe		0,00	0,00	0,00	33,43		113,96	33,43		100,00	455,32	262,64
Pozostałe zapasy		0,00	100,00	180,23	27,38		125,10	27,38		312,38	266,43	286,03
Należności handlowe i inne		2 547,70	2 367,14	2 377,23	295,50		146,99	295,50		145,10	37,33	37,77
Zaliczki, rozliczenia międzyokresowe i pozostałe aktywa		100,00	73,69	71,78	60,79		51,56	60,79		124,51	110,96	137,51
Gotówka i ekwiwalenty		1 209,05	11 954,96	2 529,10	1 039,11		830,85	1 039,11		24,47	283,99	253,04
Pasywa ogółem		863,49	2 098,00	1 694,93	157,00		112,02	157,00		123,53	121,66	117,88
Kapitał własny ogółem		142,16	3 257,42	7 138,98	136,44		104,23	136,44		108,36	121,36	132,28
Kapitał własny spółki dominującej		142,16	3 257,42	7 138,98	136,44		104,23	136,44		108,36	121,36	132,28

Nazwa	A				B				C			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
	rok bazowy = 100%											
Zobowiązania ogółem	957,07	1 947,58	988,65	136,93	222,71	130,09	121,79	111,66				
Zobowiązania długoterminowe	0,00	100,00	193,19	378,06	407,31	89,94	168,10	126,17				
Długoterminowe kredyty i pożyczki	0,00	100,00	456,59	627,41	386,55	87,18	200,51	118,02				
Pozostałe długoterminowe zobowiązania finansowe	0,00	0,00	0,00	6 903,77	18 074,69	92,28	57,78	40,55				
Długoterminowe rozliczenia międzyokresowe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,75	126,48	164,36				
Rezerwy z tytułu pozostałych zobowiązań i obciążeń	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00	917,70				
Pozostałe zobowiązania długoterminowe	0,00	100,00	24,66	0,00	0,00	102,39	105,98	108,46				
Zobowiązania krótkoterminowe	957,07	1 836,63	774,30	81,11	179,98	147,92	101,22	105,21				
Pożyczki krótkoterminowe	918,75	1 259,77	96,56	93,33	92,01	108,47	192,82	163,35				
Pozostałe finansowe zobowiązania krótkookresowe	0,00	0,00	0,00	49,06	114,29	102,99	836,88	98,34				
Zobowiązania handlowe i inne	994,83	2 405,03	1 442,09	79,43	213,18	170,51	36,68	71,25				
Krótkoterminowe rozliczenia międzyokresowe	0,00	0,00	0,00	77,64	224,91	80,71	185,37	378,75				

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych EMIS.

nych latach malała, by w 2021 r. osiągnąć poziom 118% wartości bazowej. Wynikało to głównie ze spadku wartości aktywów obrotowych do 70,49% wartości bazowej. Jednocześnie obserwowano szybszy wzrost wartości aktywów trwałych stanowiących 1,9-krotność wartości z 2018 r. Szczególnie wysoki wzrost wartości dotyczył pozostałych składników majątku trwałego, środków trwałych w budowie oraz inwestycji długoterminowych. Wskazuje to na rozwój działalności spółki, co należy ocenić pozytywnie. W zakresie aktywów obrotowych w 2019 r. zaobserwowano wzrost wartości zapasów do 1,8-krotności, a następnie jej stopniowy spadek do 1,3-krotności wartości początkowej. Jednak największy spadek wartości dotyczył należności handlowych, które na koniec 2021 r. stanowiły zaledwie 37,77% wartości z roku 2018, czego nie zrekompensował wzrost wartości gotówki, a co bezpośrednio przyczyniło się do wspomnianego już spadku wartości aktywów obrotowych. Stanowi to sygnał ostrzegawczy, może bowiem wskazywać na zmniejszenie sprzedaży, co wykazała przedstawiona dalej analiza dynamiki rachunku zysków i strat. Po stronie pasywów obserwowano wzrost wartości zarówno kapitału własnego do 1,3-krotności wartości początkowej, jak i kapitału obcego do 1,1-krotności wartości z 2018 r. Fakt większego procentowego wzrostu wartości kapitału własnego należy ocenić pozytywnie, korzystnie wpływał bowiem na strukturę pasywów.

Analiza dynamiki rachunku zysków i strat

Przeprowadzona analiza raportów z bazy EMIS wykazała, że spółki A i C prezentowały rachunek zysków i strat w wariantcie kalkulacyjnym, spółka B zaś – w wariantcie porównawczym. Warianty te różnią się sposobem prezentowania kosztów. W związku z tym na potrzeby przeprowadzenia analizy porównawczej zdecydowano się na oszacowanie kosztów jako różnicy pomiędzy zyskiem z działalności operacyjnej a przychodami ogółem. To pozwoliło przeprowadzić porównawczą analizę dla wszystkich trzech spółek na głównych liniach rachunku wyników.

We wszystkich spółkach w 2021 r. zaobserwowano wzrost wartości przychodów, z czego największy dotyczył spółki A (51,5-krotność wartości początkowej), a najmniejszy – spółki C (1,2-krotność wartości z 2018 r.). W spółce A, podobnie jak w przypadku przychodów, odnotowano największy procentowy wzrost wartości kosztów wśród badanych przedsiębiorstw, które na koniec analizowanego okresu były 51,2 razy wyższe niż w 2018 r. (tabela 5). Jednak

wzrost ten był niższy niż wspomniany wzrost przychodów, co przełożyło się korzystnie na wzrost zysku z działalności operacyjnej 54,6 razy. To wraz z 4,3-krotnym wzrostem wyniku z działalności finansowej przełożyło się na wzrost zysku. Zysk netto w 2021 r. był 55,9 razy wyższy niż w 2018 r. Warto zaznaczyć, że w 2019 r. spółka odnotowała spadek zysku netto wywołany dużym wzrostem wartości podatku dochodowego. Jednak w kolejnych latach następował sukcesywny wzrost osiąganego wyniku netto.

W spółce B w 2019 r. odnotowano stratę z działalności operacyjnej, a tym samym ujemny wynik netto. W 2020 r. przychody spółki stanowiły 92,18% wartości z 2019 r. Nastąpił także spadek wartości kosztów i był on wyższy niż w przypadku przychodów. Koszty stanowiły bowiem 90,18% wartości początkowej, co pozwoliło spółce odnotować zysk z działalności operacyjnej. W kolejnych latach nastąpił 1,5-krotny wzrost wartości przychodów oraz 1,2-krotny wzrost kosztów. Szybciej rosące przychody pozwoliły spółce osiągnąć wzrost zysku z działalności operacyjnej, co przełożyło się także na wzrost zysku brutto, a tym samym pojawienie się zobowiązania podatkowego. W spółce obserwowany był spadek wartości wyniku z działalności finansowej, która na koniec badanego okresu wynosiła zaledwie 36,10%, co działało się pomimo procentowego wzrostu wartości przychodów finansowych, których wartość absolutna była jednak niższa niż kosztów finansowych związanych z obsługą długu. Ostatecznie spółka odnotowała wzrost zysku netto względem zarówno roku bazowego, jak i roku poprzedniego.

Spółka C odnotowała najniższy procentowy wzrost wartości przychodów (124% wartości początkowej) i wyższy od niego wzrost wartości kosztów (126%), co przełożyło się na spadek wartości zysku operacyjnego do 61% wartości z roku bazowego. Jednocześnie spółka wykazywała malejącą stratę na wyniku z działalności finansowej, by ostatecznie w 2021 r. wykazać zysk na tej pozycji. Te zmiany przełożyły się na wzrost wartości zysku brutto i netto, który w 2021 r. był 1,6 razy wyższy niż w 2018 r., przy czym w 2019 r. na obu tych pozycjach odnotowano spadek, a następnie stopniowy wzrost w latach kolejnych.

Analiza wskaźnikowa

Przeprowadzona analiza wskaźnikowa dotyczyła wybranych i najbardziej popularnych wskaźników finansowych w zakresie m.in. rentowności, płynności i zadłużenia. Uzyskane wyniki wskazują w spółce A korzystny poziom rentowności aktywów ROA oraz rentowności sprzedaży ROS, które poza rokiem 2019 wykazywały optymalny poziom, a w la-

Tabela 5. Dynamika wybranych pozycji rachunku zysków i strat dla spółek A, B i C w latach 2018–2021 [%]

Nazwa	A				B				C			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
Przychody ogółem		3 611,59	4 492,34	5 149,93	.	.	92,18	151,42		114,11	106,99	124,09
Przychody netto ze sprzedaży		3 608,98	3 680,57	4 537,04	.	.	89,39	142,22		113,72	103,13	122,44
Koszty		3 899,34	4 512,22	5 122,29	.	.	90,18	117,70		114,59	106,14	126,28
Zysk z działalności operacyjnej		310,31	4 264,25	5 466,96	.	.	706,45	13 300,58		100,53	131,54	61,01
Wynik z działalności finansowej		100,00	418,93	426,26	.	.	84,39	36,10		122,65	73,80	-237,64
Przychody finansowe		100,00	125,60	115,62	.	.	3,08	2 116,92		123,46	4 457,11	19 301,21
Wydatki finansowe		100,00	66,87	53,42	.	.	83,96	47,18		122,66	169,29	187,99
Zysk brutto		373,62	4 529,66	5 737,02	.	.	76,58	2 678,48		91,88	154,12	177,76
Podatek dochodowy		2 147,50	4 759,38	6 551,25	.	.	0,00	100,00		100,00	587,16	525,87
Zysk netto		60,75	4 489,14	5 593,38	.	.	76,58	1 994,18		89,27	138,79	164,04

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych EMIS.

tach 2020–2021 zaobserwowany został ich wzrost (tabela 6). W 2019 r. znacznemu obniżeniu uległa rentowność kapitału. Wartość tego wskaźnika zmniejszyła się z 69,40% do 29,66%, jednak w następnym roku wzrosła do 95,64%. W ostatnim analizowanym roku jego wartość ponownie spadła do 54,37% co nie jest powodem do niepokoju, należy jednak obserwować jego wartość w kolejnych okresach. Spółka wykazywała też odpowiedni poziom wskaźnika bieżącej płynności, tj. powyżej 1, z wyjątkiem roku 2019, w którym wskaźnik znajdował się nieznacznie poniżej tej wartości. Z kolei wskaźnik płynności wysokiej w latach 2018–2019 wykazywał wartości poniżej optymalnej, jednak zauważalna była tendencja rosnąca, a wskaźnik w latach 2020–2021 osiągnął zalecany poziom powyżej 1. Niepokojące są z kolei wyniki dotyczące wskaźnika zadłużenia ogółem, którego wartość w latach 2018–2020 znajdowała się poniżej wartości optymalnych 57–67%. Korzystne są zaś wartości wskaźnika zadłużenia długoterminowego, które były poniżej wartości optymalnej 1, co wskazuje na niskie ryzyko kredytowe. Potwierdzają to także wartości wskaźnika pokrycia odsetek, które przekraczały wartość 1 i wykazywały tendencję wzrostową. Oznacza to, że spółka nie miała problemów z pokrywaniem kosztów obsługi długu. Uzupełnieniem analizy powyższych wskaźników jest ocena ogólnej sytuacji ekonomicznej na podstawie wskaźników struktury majątku i kapitału oraz syntetycznego wskaźnika ogólnej sytuacji finansowej przedsiębiorstwa. Wskaźniki struktury kapitału wykazywały tendencję wzrostową, co należy oceniać pozytywnie. Podobnie jest w przypadku wskaźnika struktury majątku, którego wzrost oznacza wzrost zdolności produkcyjnych kosztem pogorszenia elastyczności przedsiębiorstwa. Jednak syntetyczny wskaźnik sytuacji finansowej nie wykazywał stałej tendencji. W 2019 r. obniżył się znacząco względem poprzedniego roku, co należy ocenić negatywnie. W kolejnym roku wzrósł, ale do wartości znacznie niższej niż początkowo, a następnie ponownie zmalał, choć w nieznacznym stopniu. Nie pozwala to na jednoznaczny ocenę i wymaga obserwacji w kolejnych okresach.

Spółka B w 2019 r. uzyskiwała wyniki rentowności ROA, ROE i ROS poniżej wartości rekomendowanych, co wynikało z osiągniętej przez przedsiębiorstwo straty na koniec roku bilansowego. W kolejnym roku nastąpił wzrost wskaźników, który następował także w kolejnym roku, na koniec którego spółka wykazywała wysoką rentowność aktywów, kapitału i sprzedaży. Korzystne były wartości wskaźnika bieżącej płynności, które w każdym z badanych okresów znajdowały się powyżej rekomendowanej wartości minimalnej. Jednocześnie jedynie w 2019 r. spółka nie osiągnęła takiej wartości dla wskaźnika płynności wysokiej. Należy to oceniać

pozytywnie, spółka bowiem bez problemu była w stanie regulować swoje zobowiązania. Podobnie było w przypadku zadłużenia ogółem, którego wskaźnik również znajdował się poniżej wartości granicznych, a także w przypadku zadłużenia długoterminowego, który w każdym z analizowanych okresów nie przekraczał rekomendowanej wartości 1. Oznacza to wysokie zdolności kredytowe przedsiębiorstwa. Jednocześnie zarówno w 2019, jak i w 2021 r. spółka nie miała problemów z pokryciem odsetek wypracowanym zyskiem. Zadawalające są wartości wskaźnika struktury kapitału i majątku, jednak tak jak w przypadku spółki A syntetyczny wskaźnik sytuacji finansowej nie wykazywał stałej tendencji spadkowej lub wzrostowej.

Spółka C w całym badanym okresie charakteryzowała się wysokimi wartościami ROA, ROE i ROS, dla których od 2019 r. obserwowany jest wzrost wartości rok do roku. Na przestrzeni badanego okresu pogorszeniu ulegała płynność spółki. Od 2019 r. spółka nie osiągała rekomendowanej wartości 1 dla wskaźnika płynności wysokiej, a od roku 2020 wykazywała wartość wskaźnika bieżącej płynności poniżej 1, co wskazuje na problemy z płynnością. Jest to tym bardziej niepokojące, że na przestrzeni badanego okresu był obserwowany stopniowy spadek obu wskaźników. Nie świadczy to jednak o zagrożeniu dalszej działalności przedsiębiorstwa, ale wymaga obserwacji tych mierników w kolejnych latach. Jednocześnie obserwowany jest zadowolający poziom zadłużenia długoterminowego, dla którego wskaźnik nie przekraczał wartości rekomendowanych. W przypadku zadłużenia ogółem w latach 2018–2020 wartość miernika była powyżej rekomendowanej wartości, a w 2021 r. nieznacznie spadła poniżej granicznej wartości 67%. Spółka nie miała problemów z pokryciem odsetek wypracowanym zyskiem. Niepokojący jest jednak wskaźnik struktury kapitału, który przez cały analizowany okres znajdował się poniżej 1, co wskazuje na niską zdolność kredytową. Pozytywny jest jednak obserwowany od 2019 r. wzrost jego wartości. Podobna tendencja występowała w przypadku wskaźnika struktury majątku, co oznaczało wzrost zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwa. Syntetyczny wskaźnik zmieniał się na przestrzeni badanego okresu, naprzemiennie rosnąc i malejąc, co może świadczyć o niestabilnej sytuacji finansowej przedsiębiorstwa i wymaga obserwacji w kolejnych okresach bilansowych.

Wnioski

Lata 2018–2021 to dla wielu przedsiębiorstw czas funkcjonowania w okresie istotnych zmian ekonomicznych i gospodarczych. Najważniejszym czynni-

Tabela 6. Wybrane wskaźniki finansowe dla spółek A, B i C w latach 2018–2021

Nazwa	A				B				C			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
Rentowność kapitału [%]	69,40	29,66	95,64	54,37	.	-1,68	1,23	24,55	9,37	7,72	10,71	11,61
Rentowność aktywów [%]	7,97	0,56	17,05	26,30	.	-1,28	0,87	16,25	2,83	2,04	3,22	3,93
Rentowność sprzedaży [%]	6,82	0,11	8,31	8,40	.	-1,24	1,06	17,36	2,46	1,93	3,31	3,29
Wskaźnik bieżącej płynności	1,13	0,99	1,18	1,69	.	1,02	2,51	1,41	1,24	1,17	0,92	0,83
Wskaźnik wysokiej płynności	0,39	0,90	1,11	1,24	.	0,60	1,92	1,30	1,07	0,95	0,67	0,62
Wskaźnik zadłużenia ogółem [%]	88,52	98,11	82,17	51,63	.	23,83	29,13	33,81	69,82	73,53	69,90	66,14
Wskaźnik zadłużenia długoterminowego	0,00	0,00	0,26	0,23	.	0,06	0,21	0,18	0,71	0,59	0,99	0,68
Wskaźnik pokrycia odsetek	x	3,17	20,41	32,94	.	3,47	0,30	72,45	2,17	1,48	2,57	4,30
Wskaźnik struktury kapitału	0,13	0,02	0,22	0,94	.	3,20	2,43	1,96	0,43	0,36	0,43	0,51
Wskaźnik struktury majątku	0,00	0,03	0,09	0,46	.	4,05	1,85	2,21	0,67	0,48	1,71	1,80
Syntetyczny wskaźnik sytuacji finansowej	41,46	0,56	2,36	2,03	.	0,79	1,32	0,89	0,64	0,75	0,25	0,29

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych EMIS.

kiem mogącym wpływać na wyniki ekonomiczne przedsiębiorstw była pandemia COVID-19. Jednak na przykładzie badanych firm produkujących rośliny metodami *in vitro* można wskazać, że okres ten nie był niekorzystny dla analizowanych podmiotów, w związku z czym hipotezę o pogorszeniu większości wskaźników ekonomicznych charakteryzujących badane przedsiębiorstwa w okresie niepewności rynkowej, spowodowanej wspomnianą wyżej pandemią, można odrzucić.

Przeprowadzona analiza danych finansowych wykazała, że spółka A charakteryzowała się przewagą aktywów obrotowych, co wskazywało na mocno rozwinięty obszar sprzedaży. Wykazała również największy procentowy wzrost przychodów oraz zysku, a w ostatnim analizowanym roku osiągnęła zadowalające wyniki podstawowych wskaźników finansowych. Jednocześnie dynamika zmian pozycji bilansowych wskazuje na intensywny rozwój przedsiębiorstwa.

Natomiast z analiz wynika, że spółka B była podmiotem produkcyjnym o wysokim udziale aktywów trwałych, a posiadany majątek był w większości finansowany przez kapitał własny. Pomimo rosnących zobowiązań handlowych nie odnotowano zagrożenia dla utraty płynności, co potwierdziły wyniki analizowanych wskaźników. Z racji przewagi kapitałów własnych w strukturze pasywów spółka B charakteryzowała się najniższym ryzykiem kredytowym wśród pozostałych spółek. Podobnie jak spółka A odnotowała wzrost przychodów i zysków,

pomimo poniesionej w 2019 r. straty, a w 2021 r. wykazała korzystne wyniki analizowanych wskaźników finansowych.

Spółka C od 2020 r. wykazywała przewagę aktywów trwałych, co wskazuje również na jej produkcyjny charakter. Podobnie jak pozostałe spółki odnotowała wzrost przychodów i osiąganego zysku. Majątek spółki był finansowany głównie przez kapitał obcy, w tym pożyczki krótko- i długoterminowe, co miało negatywny wpływ na wskaźniki ogólnego zadłużenia. Jednocześnie obserwowany był spadek wartości należności, co przekładało się na pogorszenie płynności spółki, zarówno bieżącej, jak i wysokiej.

Wartości syntetycznego wskaźnika sytuacji ekonomicznej osiąganego przez badane spółki nie pozwalają na jednoznaczne określenie ich kondycji. Wskazują jednak na pewne wahania, co może świadczyć o niestabilności finansowej, której źródłem mogło być nieumiejętne zarządzanie finansami przedsiębiorstwa. Podobna sytuacja może dotyczyć podmiotów dopiero rozpoczynających działalność, o nieugruntowanej pozycji rynkowej. Największe wahania dotyczyły spółki A, co wraz z wykazanim wcześniej intensywnym rozwojem może świadczyć o tym, że spółka od niedawna działa w omawianej branży. Jednocześnie przeprowadzona analiza nie wykazała jednoznacznych przesłanek o zagrożeniu działalności dla któregośkolwiek przedsiębiorstwa, ale niezbędna jest obserwacja ich kondycji finansowej w kolejnych okresach.

Bibliografia/References

- Altkorn, J. (1999). *Strategia marki*. PWE.
- Antczak, J. (2014). Sprawozdawczość finansowa źródłem informacji dla controllingu. *Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula*, 35, 28–44.
- Bhoite, H. A., & Palshikar, G. S. (2014). Plant tissue culture: A review. *World Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2(6), 565–572.
- Chiachung, C. (2016). Cost analysis of plant micropropagation of *Phalaenopsis*. *Plant Cell Tiss Organ Culture*, 126, 167–175. <https://doi.org/10.1007/s11240-016-0987-4>
- Dynus, M., Kołosowska, B., & Prewysz-Kwinto, P. (2002). *Zarządzanie finansami przedsiębiorstw (zbiór zadań)*. TNOiK.
- EMIS. (2024). <https://www.emis.com/php/macro/overview/index> (dostęp: 2.01.2024).
- Gabryszewska, E. (2013). Rozmnażanie *in vitro* roślin ozdobnych. W: J. Rabiza-Świder, & E. Skutnik (red.), *Ogrodnictwo ozdobne sektorem gospodarki narodowej* (41–48). Wydawnictwo SGGW.
- Gad, J. (2015). Analiza i ocena sytuacji finansowej przedsiębiorstwa. W: T. Czapla i in., *Ekonomia, finanse, prawo gospodarcze. Podręcznik dla sędziów i prokuratorów* (69–77). Krajowa Szkoła Sądownictwa i Prokuratury.
- Golebiowski, G., & Tłaczała, A. (2005). *Analiza ekonomiczno-finansowa w ujęciu praktycznym*. Wydawnictwo Difin.
- Kumar, P., Sharma, N., Sharma, S., Mehta, N., Verma, A. K., Chemmalar, S., & Sazili, A. Q. (2021). In-vitro meat: A promising solution for sustainability of meat sector. *Journal of Animal Science and Technology*, 63(4), 693–724. <https://doi.org/10.5187/jast.2021.e85>
- Požoga, M., Olewnicki, D., & Jabłońska, L. (2019). In vitro propagation protocols and variable cost comparison in commercial production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* hybrid as a renewable energy source. *Applied Sciences*, 9(11), 2272. <https://doi.org/10.3390/app9112272>
- Precision Reports. (2022). *Global Plant Tissue Culture Industry Research Report, Growth Trends and Competitive Analysis 2022–2028*. <https://www.precisionreports.co/purchase/21943131> (dostęp: 4.02.2024).
- Rozporządzenie Ministra Finansów z dnia 14 listopada 2022 r. w sprawie norm szacunkowych dochodu z działów specjalnych produkcji rolnej. Dz.U. 2022, poz. 2478.
- Thorpe, T. A. (2007). History of plant tissue culture. *Molecular Biotechnology*, 37, 169–180. <https://doi.org/10.1007/s12033-007-0031-3>
- Tomar, U. K., Negi, U., Sinha, A. K., & Kumar, P. (2007). An overview on economic factors influencing micropropagation. *My Forest*, 43, 523–534.

**Mgr inż. Mariusz Pożoga**

Magister inżynier biotechnologii. Prezes laboratorium kultur tkankowych. Specjalista w mikrorozmnażaniu roślin metodami *in vitro*, usprawnianiu procesów technologicznych oraz wsparciu produkcji szkółkarskiej w zakresie poprawy jakości i wydajności rozmnażania i aklimatyzacji roślin.

Dr Kinga Cichocka

Doktor nauk rolniczych, magister finansów i rachunkowości. Specjalizuje się w analizie sektora kwaciarskiego. Analityk finansowy z kilkuletnim doświadczeniem praktycznym. Jej główne zainteresowania to analiza finansowa przedsiębiorstw i analizy rynkowe.

Dr hab. Dawid Olewnicki

Doktor habilitowany w dyscyplinie naukowej ekonomia i finanse. Kierownik Pracowni Organizacji i Ekonomiki Ogrodnictwa SGGW w Warszawie. Prowadzi zajęcia na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych m.in. z takich przedmiotów, jak: ekonomika i organizacja produkcji ogrodniczej, rynek ogrodniczy, logistyka w ogrodnictwie. Autor i współautor ponad 80 artykułów dotyczących ekonomicznych zagadnień w ogrodnictwie.

Mgr inż. Mariusz Pożoga

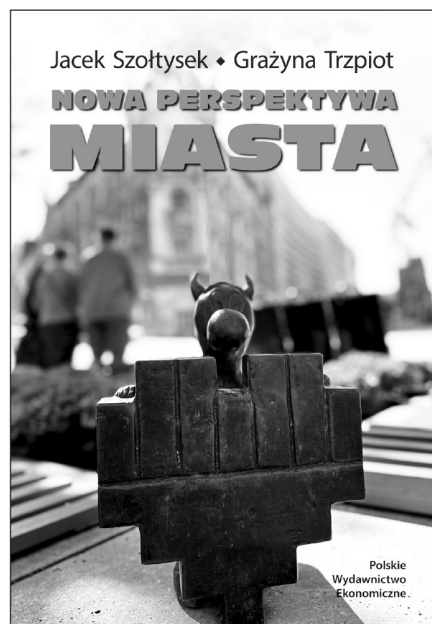
Master of Science in Biotechnology. President of the tissue culture laboratory. Specialist in micropropagation of plants using *in vitro* methods, improvement of technological processes and support of nursery production in terms of improving the quality and efficiency of plant propagation and acclimatization.

Dr Kinga Cichocka

PhD in agricultural sciences, master of finance and accounting, specializing in the analysis of the floral sector. Financial analyst with several years of practical experience. Her main interests are corporate financial analysis and market analysis.

Dr hab. Dawid Olewnicki

Post-doctoral degree in the scientific discipline of economics and finance. Head of the Section of Organization and Economics of Horticulture at the Warsaw University of Life Sciences. He teaches full-time and part-time courses in such subjects as: economics and organization of horticultural production, horticultural market, logistics in horticulture. Author and co-author of more than 80 articles on economic issues in horticulture.

NOWOŚĆ**JACEK SZOŁTYSEK, GRAŻYNA TRZPIOT****NOWA PERSPEKTYWA MIASTA**

Oddajemy w ręce Państwa książkę podejmującą tradycyjną, ale ciągle ostаточно nierozwiązaną tematykę przyszłości miasta.

Niniejsza książka powstała z potrzeby głębszego zrozumienia, jak miasta mogą przekształcać się w odpowiedzi na różne wyzwania, ale także z jakich zasobów korzystają, aby tworzyć bardziej zrównoważone, sprawiedliwe i przyjazne środowiska dla swoich mieszkańców. W ciągu ostatnich kilku dekad widzieliśmy ogromne zmiany w urbanistyce, logistyce miejskiej, gospodarce przestrzennej, ale także w społecznych funkcjach miast, które coraz częściej stają się laboratoriami innowacji – zarówno technologicznych, jak i społecznych.

Nie chcemy jednak proponować jednej, uniwersalnej wizji miasta przyszłości. Naszym celem jest raczej przedstawienie różnych perspektyw i umożliwienie czytelnikowi samodzielnego zbudowania własnego obrazu tego, czym miasto może i powinno być. Mamy nadzieję, że lektura tej książki

zainspiruje do krytycznej refleksji nad otaczającą nas przestrzenią miejską i jej przyszłością.

Dla zobrazowania możliwych sposobów oceny pozycji miasta oraz ewentualnych obszarów poprawy lub zmiany, autorzy posługują się przykładem Katowic – miasta bliskiego im z racji ich pochodzenia i zamieszkania, jak również podziwu dla rozmachu i charakteru zmian, jakim stolica Górnego Śląska podlega w ostatnich dekadach. To obraz przemian, w które na ich początku trudno było uwierzyć, że są możliwe.

Zapraszamy zatem do podróży po mieście – nie tym, które znamy z codziennych ulic, ale po mieście przyszłości, którego kontury dopiero zaczynamy dostrzegać.

Autorzy

Warszawa, 02.06.2025r.

Mgr inż. Mariusz Pożoga
mariuszpozoga@gmail.com

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy **Požoga M.**, Cichocka K., Olewnicki D. 2024. Ocena kondycji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstw produkujących rośliny metodami *in vitro*. Marketing i Rynek, (11), 23–37 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na głównej:

Konceptualizacji,

Opracowaniu metodologii,

Walidacji,

Analizie formalnej,

Przeprowadzeniu badań,

Gromadzeniu danych,

Pisaniu - przygotowanie oryginalnego projektu,

Wizualizacji pisania,

Administrowaniu projektem.

Podpis

Požoga Mariusz

Warszawa, 02.06.2025r.

Dr Kinga Cichocka
kingaczartek@gmail.com

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo**
**Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., **Cichocka K.**, Olewnicki D. 2024. Ocena kondycji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstw produkujących rośliny metodami *in vitro*. Marketing i Rynek, (11), 23–37 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Pomocniczej konceptualizacji,

Pomocniczym przeprowadzeniu badań,

Pomocniczym opracowaniu metodologii.

Podpis



Warszawa, 02.06.2025 r.

Dr hab. Dawid Olewnicki
dawid_olewnicki@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny
Rolnictwo i Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

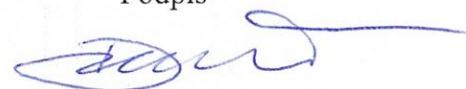
Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., Cichocka K., **Olewnicki D.** 2024. Ocena kondycji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstw produkujących rośliny metodami *in vitro*. Marketing i Rynek, (11), 23–37 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Pomocniczej konceptualizacji,

Pomocniczym przeglądzie i edycji,

Pomocniczym administrowaniu projektem.

Podpis



Article

In Vitro Propagation Protocols and Variable Cost Comparison in Commercial Production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* Hybrid as a Renewable Energy Source

Mariusz Pozoga *, Dawid Olewnicki and Lilianna Jabłońska

Warsaw University of Life Science, faculty of Horticulture, Biotechnology and Landscape Architecture, Section of Horticultural Economics, 02-776 Warsaw, Poland; dawid_olewnicki@sggw.pl (D.O.); lilianna_jablonska@sggw.pl (L.J.)

* Correspondence: mariuszpozoga@gmail.com

Received: 7 March 2019; Accepted: 22 May 2019; Published: 1 June 2019



Abstract: In this elaboration, effective methods of *in vitro* propagation of a *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* hybrid are presented, and the variable costs of commercial production evaluated. Plant regeneration of the *P. tomentosa* × *P. fortunei* hybrid was achieved through organogenesis in nodal explants. Different concentrations of BAP (6-benzylaminopurine), 0.2, 0.5, 1 mg/L, and light conditions were investigated. The best results were obtained using a half-strength MS medium containing 0.5 mg/L BAP. In standard light conditions, 2 shoots were grown with 3.5 culturable nodes on each, and in 70% reduced light, 2 new shoots were grown with 6 culturable nodes on each. Rooting was successfully achieved when using a hormone-free half-strength MS medium containing vitamin, and 2% sucrose with 95% efficiency. Acclimatization and survival were shown to be 90% in regenerated plants. The cost of production of a single plant of *P. tomentosa* × *P. fortunei* hybrid grown in standard light conditions was \$0.084 and \$0.082 when grown in 70% reduced light where only variable costs were considered. Two major factors affecting *P. tomentosa* × *P. fortunei* hybrid micropropagation is labor, materials and chemicals. Focusing on reducing this cost can highly lower plantlet price.

Keywords: *Paulownia*; *in vitro*; micropropagation; production cost; 6-benzylaminopurine

1. Introduction

A new, very perspective plant, *Paulownia* has been introduced into Polish nursery production the last few years. This genus includes nine species and numerous interspecific hybrids. The most common species being: *Paulownia tomentosa*, *P. fortunei*, *P. elongata*, and hybrids *P. tomentosa* × *P. fortunei* and *P. elongata* × *P. fortunei* [1]. *P. tomentosa* is the most temperature tolerant species. *P. fortunei* is known for its straight trunk and narrow crown. *P. elongata* is a fast-growing species with a straight trunk, medium crown and suitable for warm climates. Hybrid *P. tomentosa* × *P. fortunei* combines features of mother plants, and as a result, it is also the perfect plant for plantation in the Polish climate. *Paulownia* plants have many applications. The cortex of *P. tomentosa* is used in Chinese medicine to cure diseases like gonorrhoea, bronchitis, erysipelas, dysentery or acute enteritis [2]. Apart from its ornamental value, it is perfect for biomass production and a top quality wood source. After six years, the plant can even reach a height of 20 m, and can measure 35 cm in diameter. Its wood is light and strong. It dries very quickly and is resistant to deformation. The wood is used for the production of furniture, doors, window frames, toys, composite boards or musical instruments. Important to growers, from an economic point of view, is that *Paulownia* does not need re-planting because it grows from stumps after being harvested, and the process can be repeated several times. These plants were also used for afforestation [3], for the

reclamation of mining sites [4], and are a good zinc accumulator [5]. *Paulownia* can be propagated using traditional methods, from seeds or root cuttings. Seeds germinate slowly and have a slower growth rate in comparison with root cuttings or shoot cuttings derived from *in vitro* cultures [6]. This is, therefore, the main reason for why an efficient method of vegetative propagation is essential. Tissue culture brings many opportunities, from simple propagation from meristem culture, to direct somatic embryogenesis (SE) from internodal and leaf explants used for synthetic seed production [7,8]. There is also a report on indirect SE from callus in *P. tomentosa* [9].

The aim of the study was to investigate effective methods of *in vitro* propagation of the *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* hybrid and to primarily evaluate the variable costs of commercial production. Due to the very small amount of information on the costs of plant production using *in vitro* methods, the research is of an innovative nature.

2. Materials and Methods

2.1. In Vitro Culture Initiation and Stabilization

The explants used for *in vitro* culture initiation were meristems excised from nodal segments and shoot tips of one year old plants that were clones of a *P. tomentosa* × *P. fortunei* hybrid. Three mm explants were washed under running tap water for 15 minutes and then soaked in sterile demineralized water. Explant disinfection was carried out in 10% NaOCl (MAGCHEM, Bełzyce, 24-200, Poland) solution for 10 min and then followed by 3 washes in sterile water (5, 10, 15 min, respectively). Explants were placed in half-strength MS medium with vitamins [10] containing 1mg/L 6-benzylaminopurine (BAP), 2% sucrose, 0.2 mL/L Plant Preservative Mixture (PPM, Plant Cell Technology Inc, Washington, DC 20036, USA) and 7 g/L plant agar according to Venkateswarlu et al. [11]. PPM was used to control the contamination of explants. The pH was adjusted to 5.8 before autoclaving.

2.2. Multiplication Stage

Sterile explants were transferred to a half-strength MS medium that included vitamins with different BAP concentrations: 0.2 mg/L (MS1), 0.5 mg/L (MS2) and 1mg/L (MS3) (Table 1). The sucrose concentration was 2%, agar content 0.7%, and all media were PPM free. Growing conditions were stable with a 12/12 h photoperiod, cool white fluorescent tubes (3100 lm) and a temperature of 23 °C. Four subculture nodes with leaves were used. The subculture time was 4 weeks. Nodal explants cultured on MS2 were also tested in limited light conditions where the light was reduced to 70% in order to examine whether such conditions would be suitable, in order to obtain more culturable nodes.

Table 1. Used for multiplication and rooting of *P. tomentosa* × *P. fortunei* hybrid. Half-strength MS (1/2 MS) supplemented with 2% sucrose, 0.7% agar, and different BAP (6-benzylaminopurine) concentrations, IBA (Indole-3-butyric acid) or hormone free medium.

Medium	Multiplication Stage			Rooting Stage	
	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5
Composition	$\frac{1}{2}$ MS + 0.2 mg/L BAP	$\frac{1}{2}$ MS + 0.5 mg/L BAP	$\frac{1}{2}$ MS + 1 mg/L BAP	$\frac{1}{2}$ MS hormone free	$\frac{1}{2}$ MS + 1 mg/L IBA

Source: Own elaboration.

2.3. Rooting and Acclimatization Stage

For the rooting process, plants with three or more nodes were used. The plants were transferred to a hormone-free half-strength MS medium containing vitamin, 2% sucrose (MS4) and half-strength MS with vitamins, and 2% sucrose with 1 mg/L Indole-3-butyric acid (IBA) (MS5) (Table 1). After 4 weeks, the plants were transferred to sterilized potting soil Hollas (Agaris Poland sp. z o.o., Pasłek, 14-400, Poland), that had been sterilized using steam) with 51-hole multi-pots and placed into a mini

greenhouse. Fluorescent tube lights were used as a light source (photoperiod 12/12, 3100 lm), and a temperature of 23 °C was maintained. The soil was well watered. For hardening up the plants, the top of the mini greenhouse was removed twice every day for 5 min in the first week, twice a day for 15 min in the second week, and then twice a day for 30 min in the third week. For the following two weeks, the plants were grown without the top of the mini greenhouse and then transferred to field conditions.

2.4. Cost Analysis

The commercial plant tissue culture company, 'Plant Research Laboratories' located in KEN 98 Ave, Warsaw, Poland was used for cost analysis data. Three following variable costs were considered: reagents and containers, labor costs, along with electricity consumption, and plant growth in a 'growth room'. Due to variable VAT rates across the world, all prices are net prices. Most of the reagents essential for the preparation of the medium were purchased from Duchefa Biochemie (A. Hofmanweg 71, Haarlem, the Netherlands). The wholesale price of 100l MS medium is \$55.19, 25 kg of plant agar costs \$2116.55, and 25 g of BAP costs \$121.76. As the source of carbon, sugar was used as a cheap replacement for highly purified sucrose. The cost of 1 kg of 'Diamant' (PFEIFER & LANGEN S.A., Poznań, 60-837, Poland) sucrose is \$0.51. Wholesale prices are listed in Table 2. Because of the subtle differences in some cost prices, values are given in a thousandth part and are marked with an asterisk. Fixed costs, including the laboratory building and equipment were ignored in this study because of differences between equipment used in other laboratories and a lack of possibility for comparison.

Table 2. Wholesale prices and costs of reagents used in *P. tomentosa* × *P. fortunei* plants production and reagents necessary for MS2 production.

Ingredients for Medium Preparation	Wholesale Prices of Ingredients (in\$)	Ingredients for 1 L of Medium Preparation	Costs of Ingredients for 1 L of Medium Preparation (in \$)
MS medium Duchefa 100 L	55.19	MS medium Duchefa (0.5 L)	0.27
Sucrose (food sugar) 1 kg (1000 g)	0.51	Sucrose (20 g)	0.01
Agar Ducheffa 25 kg (25,000 g)	2116.55	Agar Ducheffa (7 g)	0.59
BAP Ducheffa 25 g (25,000 mg)	121.76	BAP Ducheffa (0.5 mg)	0.002*
Total cost per 1 liter of MS2 medium			0.88

Source: data from Plant Research Laboratories.

Other costs that needed to be considered in plant production were electricity costs, which were \$0.14 per kilowatt-hour, labor costs (man-hour) which was \$3.18, and a 350 mL container, which cost \$0.07.

To determine how many containers with plants can be produced in one hour, the number of explants cut out during five hours of work by two employees, calculated over four repeating cycles was calculated in order to obtain an average. Power consumption of the laminar flow chamber is 49 W (0.049 kW). The cost of work necessary to produce one container with plants was calculated by dividing a man-hour salary by the number of containers produced within one hour. The cost of electricity consumption, necessary to produce one container with plants, was calculated by multiplying the electricity consumption (of the laminar flow chamber) by the cost of 1 kilowatt-hour, and divided by the mean number of containers produced during one hour. The cost of labor and electricity for the production of a single plant was the cost of production of one container with plants, divided by the number of explants in the container.

The 'growing room' is equipped with racks 5 shelves. The dimensions of a shelf are 140 × 60 cm which gives 0.84 m². Each shelf is illuminated with one 36 W (0.036 kW), cool white fluorescent tube. There can be 55 containers with 10 explants placed on each shelf. The price of growing the plants for 4 weeks was calculated using the formula:

$$PGC = \left(\frac{EC \times PH \times DM}{NC} \times kWh \right) / N \quad (1)$$

where:

- PGC—plant growth cost
- EC—electricity consumption per one shelf
- PH—photoperiod length
- DM—mean number of days in month—30.5
- NC—number of containers on one shelf
- kWh—cost of 1 kWh
- N—number of explants

Each container is filled with 0.083 mL of MS2 medium, 1 L of medium is enough to fill 12 containers. The cost of one container with the medium was calculated by dividing the total cost of 1 L MS2 medium by the number of 12 containers plus the price of a single container.

Other costs, such as time for the preparation of the medium, transporting containers from the laminar chamber room to the growing room or power consumption for autoclaving are specified as economic overheads, and these account for an additional 20% of the total cost of one container with 10 explant production costs. Rooting costs were calculated in the same way as plant multiplication, considering the MS4 medium. Additionally, the final cost was increased by the percentage of unrooted shoots. The cost of acclimatization was not given to us by the Plant Research Laboratories.

The gross margin of variable costs in this research was calculated over the value of production, according to Elum et al. [12]. Gross margin was calculated using the following formula:

$$GM = \frac{(TR - TVC)}{TR} * 100\% \quad (2)$$

where:

- GM—gross margin expressed as a percentage
- TR—total revenue in \$
- TVC—total variable costs in \$

The Gross margin model is a great tool used to investigate the initial assessment of production. As a result, the Plant Research Laboratories suggested that the price of a single plant sold in agar is \$0.4.

3. Results and Discussion

3.1. Micropropagation of *P. tomentosa* × *P. fortunei*

The disinfection method resulted in 80% effectiveness. All of the survived explants responded to a half-strength MS medium with 1 mg/L BAP. Removing PPM during the multiplication stage from the medium did not cause endogenous contamination. For the multiplication stage, the MS2 medium was the most effective. Each node, after 4 weeks of culture, produced two new shoots with 3.5 culturable nodes on each, thus giving seven culturable nodes per explant. According to Venkateswarlu et al. [11], using the same medium, but with a light intensity of 3000 lm after six weeks, six culturable nodes of *P. fortunei* were obtained. The differences could be explained as a result of using a temperature of 28 °C, a 14 h photoperiod for culture incubation, and non-hybrid plant usage. Shoot tips had great elongation ability with poor axillary bud formation. Explants using the MS1 medium showed one or two axillary bud formations, however, shoots were in poor condition and stopped growing. In some cases, roots also occurred. A high concentration of BAP in the MS3 medium resulted in callus growth and callusing of the tissue. Shoots were often vitrified. The effect of different mediums on the explant is summarized in Table 3.

Explants cultured under limited light conditions exhibited great elongation of shoots during the four-week period, and callus proliferation. Each node provided two elongated, yellowish shoots with six culturable nodes so, per explant, there were 12 culturable nodes. Venkateswarlu et al. [11] obtained eight culturable nodes using the same medium in 1200 lm light intensity after six weeks. Four week old callus with regenerating shoots was sub-cultured on MS2 and normal light conditions were used.

After 4 weeks, 34 shoots were regenerated from callus. Plants were healthy and green but most of them had a variable number of leaves (one, two, three or four) in a whorl, instead of two. Because of these frequent variations, it is not recommended that such plants be used for further cultivation. Phenotype variations in plants regenerated from callus are very common and were also observed in potato [13] or *Curcuma aromatica* [14]. Ipekci and Gozukirmizim [8], using direct somatic embryogenesis, obtained 69.8 plants from leaf explants, and 58.5 *P. elongata* plants from internodal explants. Interesting results were obtained by Chunchukov A. and Yancheva S. [15] who investigated different *Paulownia* species and hybrids using MS medium with 0.5 mg/L BAP and 0.01 mg/L indole-3-butyric acid (IBA). The result was a great number of internodes with *P. elongata* obtaining 55.2 internodes, *P. tomentosa* × *P. fortunei* obtained 33.54 internodes, and the complex hybrid, (*P. elongata* × *P. tomentosa*) × *P. elongata* obtained 44.67 internodes. This indicates a high potential for propagation of the *Paulownia* using this method to obtain a great number of nodes.

Table 3. Effects of different medium on *P. tomentosa* × *P. fortunei* regeneration.

Medium	Effect on Explant	Possibility of Further Usage
MS1	1-2 axillary bud formation, slow growth, weak plants	NO
MS2	2 axillary bud formation, good growth	YES
MS3	callus overgrowth what resulted in explants and callusing of the tissue, poor condition of plants	NO

Source: data from Plant Research Laboratories.

Rooting methods turned out to be very effective. The first roots appeared in both media after 2 weeks. MS4 medium induced rooting in 95% of shoots. Roots were long and well branched. It was also very easy to remove agar from the roots (Figure 1A). MS5 medium induced rooting in 100% of shoots. However, roots were thick, short, and tended to break when agar was removed. Because of the problems connected with washing out agar from the roots and the high percentage of damaged roots (data not shown), the MS5 medium was considered unsuitable for commercial use. Despite the lower success rate of rooting in the MS4 medium, this medium was used for rooting and acclimatization due to the ease in handling (Table 4). Plants were very efficiently acclimatized with a 90% success rate. Ventilation of the mini greenhouses was also crucial in the hardening stage because this prevented fungal infections. Abundant watering favored the fast growth of the plants (Figure 1B).

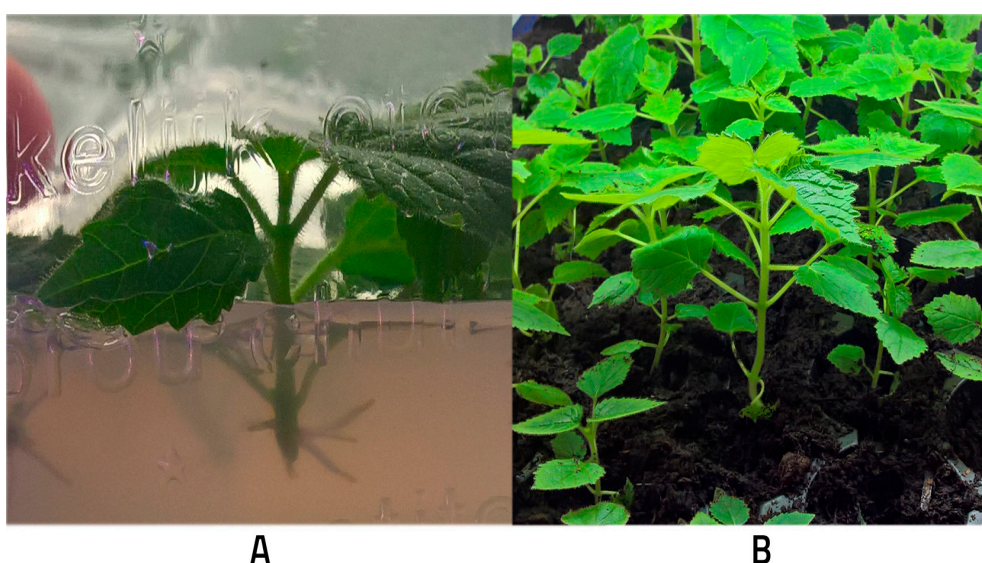


Figure 1. *P. tomentosa* × *P. fortunei* rooting and acclimatization. (A). *P. tomentosa* × *P. fortunei* rooting using MS4 medium after 2 weeks. (B). *P. tomentosa* × *P. fortunei* acclimatized plants after 3 weeks.

Table 4. Effect of different medium on rooting of *P. tomentosa* × *P. fortunei*.

Medium	Effect on Explant	Rooting Percentage	Possibility of Further Usage
1/2MS hormone free (MS4)	rooting after 2 weeks, healthy long, branched roots	95%	YES
1/2MS + 1 mg/L IBA (MS5)	rooting after 2 weeks, short, hard roots. Easy to break when taken out from agar, needs careful treatment	100%	YES

Source: Data from Plant Research Laboratories. Source: Photo from Plant Research Laboratories.

3.2. Costs of *P. tomentosa* × *P. fortunei* In Vitro Production

During one hour of work in the multiplication stage, one person is able to cut out and transplant 159.86 nodal explants, whilst 213.2 shoots are obtained during one hour of cutting out and transplanting shoots for rooting results. This might be attributed to the easiness of planting shoots in agar in comparison to nodal explants. Planting nodal explants is problematic because of the big leaves which raise nodes from the medium, and the need for frequent correction.

The price of the ingredients necessary for the preparation of 1 L of MS2 medium are detailed in Table 2, as well as the total cost of 1L of MS2 medium, which is \$0.88. The cost of 1 L of rooting medium MS4 is \$0.879*. The price of one container with the medium is \$0.14. The cost of labor for producing it is: \$0.2. Growing plants in containers over a period of 4 weeks costs \$0.03 whereas the cost of growing a single plant is \$0.003*. The cost of rooting is \$0.04. The total variable cost of producing a single rooted plant including an economic overhead is \$0.084*, where full light conditions were used and \$0.082*, where reduced light conditions were used. The reduced light condition reduced the seeding cost by 2%. An increase in the number of plants over the following weeks, and the plantlet cost are detailed in Table 5. After 20 weeks of multiplication and rooting 48,020 plants were obtained using full light conditions with a total variable cost of production of \$3173.78. At the same time where 70% reduced light was applied, 414,720 plants were produced with a total variable cost of \$26,067.97 (Table 6).

Table 5. Analysis of costs with the two highest costs, materials, reagents and labor, of *in vitro* production of unrooted *P. tomentosa* × *P. fortunei* hybrid reduced by 10% and 20%.

Costs in \$ of Production of Container with 10 Explants	Full Light Conditions	70% Reduced Light Conditions	Reduced Materials, Reagents and Labor Cost			
			by 10%, Full Light Conditions	by 10%, Reduced Light Conditions by 70%	by 20%, Full Light Conditions	by 20%, Reduced Light Conditions by 70%
Materials and reagents	0.14	0.14	0.13	0.13	0.11	0.11
Labor	0.2	0.2	0.18	0.18	0.16	0.16
Cost of growing	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01
Economic overhead	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
Total cost of container with 10 unrooted plants	0.44	0.42	0.41	0.38	0.36	0.34
Total cost of container with 10 rooted plants	0.84	0.82	0.81	0.78	0.76	0.74

Source: Own elaboration.

Table 6. Number of plants during following weeks and plantlet cost in normal and limited light conditions.

Week	Number of Plants Cultured in Full Light	Number of Containers Cultured in Full Light	Total Cost of Production in Full Light (\$)	Number of Plants Cultured in 70% Reduced Light	Number of Containers Cultured in 70% Reduced Light	Total Cost of Production in 70% Reduced Light (\$)
1	10	1	0.45	10	1	0.42
4	70	7	3.58	120	12	5.45
8	490	49	25.50	1440	144	65.79
12	3430	343	178.93	17,280	1728	789.90
16	24,010	2401	1252.98	207,360	20,736	9479.17
20 Rooting	48,020	4802	3173.78	414,720	41,472	26,067.97

Source: own elaboration.

The production of 10,000 unrooted plants where full light conditions were used requires 16 weeks, while the same number of plants raised in reduced light conditions can be obtained one week earlier at a lower price. Chiachun [16] has calculated the total variable and fixed costs for production of more than 10,000 plantlets of *Phalaenopsis*. According to his calculation, the cost of a plantlet is NT\$9.04, which is equivalent to \$0.29 (exchange rate as of 17 February 2019). Production costs of an acclimatized plant of *Coffea canephora* using somatic embryogenesis is \$0.23 (when 300,000 plantlets are produced). Variable and fixed costs are taken into consideration. The acclimatization of the plantlets is 33% of the total production cost [17].

The highest cost of *in vitro* plant production is the cost of labor. This is 48% of the variable cost of production. Chiachun [16] indicates that labor is more than 60% of the total cost of production of the *Phalaenopsis* plant. The second highest cost in *P. tomentosa* × *P. fortunei* production is the cost of chemicals and containers, this is 33% (Figure 2). To improve the profitability of production, these two costs should be decreased. If these are reduced by 10% then the cost of a single plant will be \$0.081 raised in full light conditions, and \$0.078 growing in reduced light conditions. Reducing this cost by 20% would therefore allow for the production of a single plant to be \$0.076 raised in full light conditions and \$0.074 raised in reduced light conditions. These changes in costs are shown in Table 5.

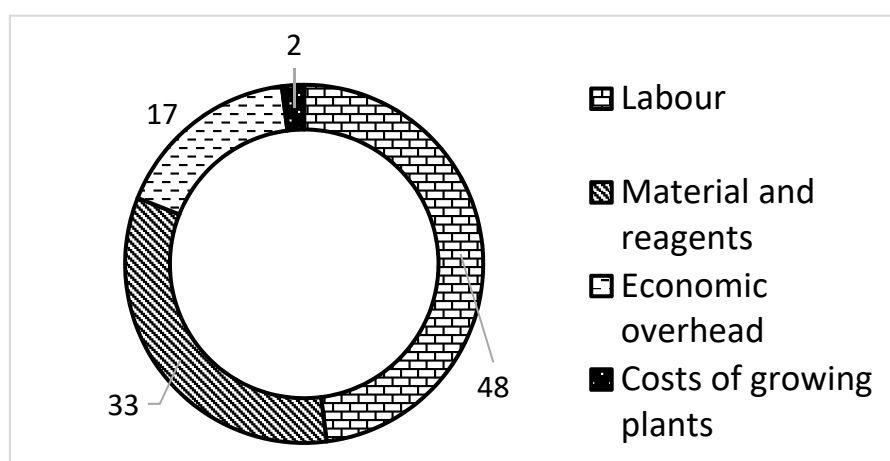


Figure 2. The costs for *P. tomentosa* × *P. fortunei* production in limited light conditions (%).

There can be 550 plants produced on each shelf. One rack results in the production of 2750 plants. Within an area of 1 m², a total of 3273.8 plants can be produced. Multiplying the number of shelves over racks can increase the number of plants per m², however, would require the use of scissor lifts.

The gross margin for *P. tomentosa* × *P. fortunei* hybrid is 79% using full light conditions for plant growth and 80% where reduced light conditions are applied. We can also assume that after including the fixed costs of production for this plant, this production could prove to be very attractive to investors.

4. Conclusions

The *in vitro* propagation method used for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* hybrid is cheap and also a fast solution when rapid propagation is needed. Reducing the light conditions during propagation by 70% is crucial for the elongation of shoots, and also in obtaining a larger amount of culturable nodes for propagation. This method of propagation reduces the cost of a plantlet from \$0.084 to \$0.082, and results in 10,000 plants one month earlier. The largest variable costs of *in vitro* plant production are labor, materials and reagents. These two factors should be taken into consideration in order to increase the profitability of production. The actual cost of growing the plants is thereby marginal.

Author Contributions: Conceptualization, M.P., D.O. and L.J.; methodology, M.P. and D.O.; validation, M.P., D.O. and L.J.; formal analysis, M.P.; investigation, M.P.; resources, Plant Research Laboratories; data curation, M.P.; writing—original draft preparation, M.P.; writing—review and editing, D.O.; visualization, M.P.; supervision, L.J.; project administration, M.P. and D.O.; funding acquisition, Plant Research Laboratories.

Funding: This research was supported, in part, by Plant Research Laboratories, Warsaw, Poland for the micropropagation experiment and sharing the production costs.

Acknowledgments: The authors wish to acknowledge Plant Research Laboratories, Warsaw, Poland for sharing the laboratory and essential data for cost analysis.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Barton, I.; Nicholas, I.; Ecroyd, C. *Paulownia*. *For. Res. Bull.* **2007**, *231*, 5–68.
- Bahri, B. *In vitro* propagation of a forest tree *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud.—A valuable medicinal tree species. *Albanian J. Agric. Sci.* **2013**, *12*, 37–42.
- Zhu, Z.H.; Chao, C.J.; Lu, X.Y.; Xiong, Y.G. *Paulownia in China: Cultivation and Utilization*; Asian Network for Biological Science and International Development Research Centre: Singapore, 1986; pp. 37–46.
- Carpenter, S.B. This “princess” heals disturbed land. *Am. For.* **1997**, *83*, 22–23.
- Azzarello, E.; Pandolfi, C.; Giordano, C.; Rossi, M.; Mugnai, S.; Mancuro, S. Ultramorphological and physiological modifications induced by high zinc levels in *Paulownia tomentosa*. *Environ. Exp. Bot.* **2012**, *81*, 11–17. [[CrossRef](#)]
- Bergmann, B.A.; Moon, H.K. *In vitro* adventitious shoot production in *Paulownia*. *Plant Cell Rep.* **1997**, *16*, 315–319. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Ipekci, Z.; Gozukirmizi, N. Direct somatic embryogenesis and synthetic seed production from *Paulownia elongata*. *Plant Cell Rep.* **2003**, *22*, 16–24. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Ipekci, Z.; Gozukirmizi, N. Indirect somatic embryogenesis and plant regeneration from leaf and internode explants of *Paulownia elongata*. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **2004**, *79*, 341–345. [[CrossRef](#)]
- Radojevic, L. Somatic embryos and plantlets from callus cultures *Paulownia tomentosa* Steud. *Pflanzenphysiologie* **1979**, *91*, 57–62. [[CrossRef](#)]
- Murashige, T.; Skoog, F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bioassays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiol. Plant.* **1962**, *15*, 473–497. [[CrossRef](#)]
- Venkateswarlu, B.; Mukhopadhyay, J.; Sreenivasan, E.; Kumar, M. Micropropagation of *Paulownia fortunei* through *in vitro* axillary shoot proliferation. *Indian J. Exp. Biol.* **2001**, *39*, 594–599. [[PubMed](#)]
- Elum, Z.A.; Etowa, E.B.; Ogonda, A.U. Economics of cucumber production in rivers state, Nigeria. *Agro-Science* **2016**, *15*. [[CrossRef](#)]
- Lindeque, J.M.; van der Meschtz, A.; Slabbert, M.M.; Henn, G. Variation in phenotype and proteins in plants regenerated from cell suspensions of potato cv. BP1. *Euphytica* **1991**, *54*, 41–44. [[CrossRef](#)]
- Mohanty, S.; Panda, M.K.; Subudhi, E.; Nayak, S. Plant regeneration from callus culture of *Curcuma aromatica* and *in vitro* detection of somaclonal variation through cytophotometric analysis. *Biol. Plant.* **2008**, *52*, 783–786. [[CrossRef](#)]
- Chunchukov, A.; Yancheva, S. Micropropagation of *Paulownia* species and hybrids. *Annuaire de l'Université de Sofia “St. Kliment Ohridski” Faculte de Biologie* **2015**, *100*, 223–230.

16. Chiachung, C. Cost analysis of plant micropropagation of Phalaenopsis. *Plant Cell Tiss Organ Cult.* **2016**, *126*, 167–175.
17. Alves dos Santos Mauricio, R.; Augusto de Souza, C.; Felix da Rocha, J.; Ventura de Araujo, L.; Curitiba Espindula, M. Comparison of Economic Efficiency between *in Vitro* and Field Methods for Vegetative Propagation of *CoffeaCanephora*. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* **2015**, *9*, 1–7.



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Warszawa, 02.06.2025r.

Mgr inż. Mariusz Pożoga
mariuszpozoga@gmail.com

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo**
**Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy **Požoga M.**, Olewnicki D., Jabłońska L. 2019. *In vitro* propagation protocols and variable cost comparison in commercial production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* hybrid as a renewable energy source. Applied Sciences, 9(11) mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na głównej:

Konceptualizacji,

Opracowaniu metodologii,

Walidacji,

Analizie formalnej,

Przeprowadzeniu badań,

Gromadzeniu danych,

Pisaniu - przygotowanie oryginalnego projektu,

Wizualizacji pisania,

Administrowaniu projektem.

Podpis

Požoga Mariusz

Warszawa, 02.06.2025r.

Dr hab. Dawid Olewnicki
dawid_olewnicki@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny
Rolnictwo i Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., **Olewnicki D.**, Jabłońska L. 2019. *In vitro* propagation protocols and variable cost comparison in commercial production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* hybrid as a renewable energy source. Applied Sciences, 9(11) mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Pomocniczej konceptualizacji,

Pomocniczym opracowaniu metodologii,

Pomocniczej walidacji,

Pomocniczym przeglądzie i edycji,

Pomocniczym administrowaniu projektem.

Podpis



Warszawa, 23.01.2025r.

Lilianna Jabłońska
e-mail: lilianna51@o2.pl

**Rada Dyscypliny Rolnictwo
i Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

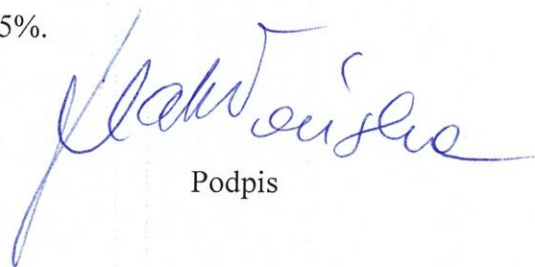
Niniejszym oświadczam, że w pracy: Pożoga Mariusz, Olewnicki Dawid, **Jabłońska Lilianna**, 2019, *In Vitro* Propagation Protocols and Variable Cost Comparison in Commercial Production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* Hybrid as a Renewable Energy Source. L. Appl. Sci. 9(11) mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Pomocniczej konceptualizacji,

Pomocniczej walidacji,

Pomocniczym nadzorze.

Mój łączny udział procentowy w niniejszej pracy wyniósł 5%.



Podpis

THE IMPACT OF THE ORGANIZATION OF THE WORKING DAY ON PRODUCTION EFFICIENCY IN THE LABORATORY OF PLANT TISSUE CULTURES

Mariusz POŻOGA^{1*}, Dawid OLEWNICKI²

¹ Warsaw University of Life Science, Institute of Horticulture Sciences, Section of Horticultural Economics; mariusz_pozoga@sggw.edu.pl, ORCID: 0000-0001-6753-0696

² Warsaw University of Life Science, Institute of Horticulture Sciences, Section of Horticultural Economics; dawid_olewnicki@sggw.edu.pl, ORCID: 0000-0002-3096-3882

* Correspondence author

Purpose: The aim of the study was to rate the employee's productivity on different work day organization and to indicate the most optimal work schedule.

Design/methodology/approach: For the research presented in this paper, strong literature review was done. We showed why human workforce is so important in tissue culture laboratory and why proper work organization is essential for increasing competitiveness of companies. Literature in the field of overtime work and short, elastic hours of work was also presented. Our research design checked effectiveness of work of ten employees of tissue culture laboratory in five different workday schedules. First combination was control and four other investigated influence of six hour work on main task in different arrangements on productivity. Data was statistically analysed with Kruskal-Wallis ANOVA. Productivity Index and Labour Productivity Index were also used for better results processing.

Findings: The highest employees productivity is concentrated in the middle of work day. In conventional eight hour workday, the highest productivity is just after fifteen minute break. Six hour workday has big potential in increasing work, especially when main task is not interrupted by other activities and when work starts at the beginning of workday.

Research limitations/implications: In future, research should be expanded on employees efficiency in work with bioreactor and costs analysis of plant production in such system.

Practical implications: Our results are directed to plant tissue culture companies and others where employees are essential and their work requires concentration during repetitive activities. We suggest solutions increasing work efficiency.

Originality/value: Our work presents hour after hour analysis of work efficiency in different workday organization in plant tissue culture company.

Keywords: day schedule, productivity, work organization, work effectiveness.

Category of the paper: Research paper.

1. Introduction

Employees are essential in many companies and they still cannot be replaced by machines in some professions. Mass production of *in vitro* plants in tissue culture laboratory is such a profession. It requires accuracy, precision and the ability to make the right decision. Tissue culture technology, for plant clonal propagation, was introduced in the mid 1960's (Thorpe, 2007). Although traditional methods have been around in commercial usage for more than 50 years, it has been automated to a small extent and then only in medium preparation and dosage. It is relatively easy because of the extremely developed dosing technology used in other industries. The only challenge is to maintain asepticity and the use of frequently occurring short series of media. Short media series occurs when a laboratory is not specialised in a narrow amount of plant species growing in the same medium. So offering a wide range of species causes difficulties and then an efficient human workforce is very important.

In vitro protocols for plant propagation are presented for many species. These protocols start from simple methods ranging up to advanced bioreactor production, but there is little information about productivity and the cost of plant propagation used within *in vitro* techniques. Taking into consideration the fact that *in vitro* laboratories are currently developing and increasing production, studies on cost calculation and cost reduction proposals should be carried out Souza et al. (2015), Chiachung Chen (2016), Saraswathi et al. (2016), Pożoga et al. (2019), focused on research in this field. The researchers describe variable costs of production or costs of total laboratory investments in certain species production. Still there is a lack of production of plants in bioreactor cost analysis. Very often the workforce is a considerable cost for production companies. Pożoga et al. (2019) indicated that 48% of variable costs of Paulownia tree (*Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* hybrid) *in vitro* production is connected with labour. According to Chiachung Chen (2016) labour is more than 60% of the total cost of production of orchid (*Phalenopsis*) plants. That is why studies on human workforce productivity should be provided. By increasing human productivity companies can achieve better results and decrease production costs. The increase, can be done in many ways. It can be stimulation using music (Lesiuk, 2005; Haake, 2011), light intensity (Karlikova et al., 2016), environmental quality and employee satisfaction (Vischer, 1989; Staw, Barsade, 1993; Garris, Monroe, 2005). Moreover Street et al. (2019) indicates that stress is also a crucial factor of productivity and labour cost reduction. Reducing stress among employees can significantly increase an enterprise's results.

The fast development of technologies, especially connected with communication, has created a '24-hour society' over the recent years. Employees are always ready to pick up the phone or answer an email when they have finished work. People spend evenings trying to achieve goals set by employer's. A sharp line between time of work and a time for relaxation is not so obvious nowadays. Very often people have to work overtime (Golden, 2012).

But how is this continuous readiness to work affect productivity? O'Conner, L.V. (1969) and Haneiko, J.B. and Henry, W.C. (1991) showed that working overtime brings a loss in efficiency. Firms see this issue and try to solve this problem. There are a lot of companies doing private research indicating that working fewer hours increases productivity. This can include working fewer hours in a day or working less hours during the week. Also flexible working hours can increase productivity (Kossek, Van Dyne, 2008; Kossek, Lee, 2008). It is also important to introduce shorter work conditions as stated in Parkinson's Law. It states that 'work expands so as to fill the time available for its completion' (Parkinson, 1955). This means that the closer we are to the deadline the higher productivity becomes. So duties on an eight-hour work day can be done faster. This can be achieved by properly planning work and encouraging employees and for sure this is worth some attention.

This study was conducted among ten employees of Plant Research Laboratories located in Warsaw, Poland. The employees were male and female within the age range of 20-35 and were responsible for different tasks in the laboratory. Research was repeated three times for each combination and each employee. The plant used in the experiment was an ornamental alternanthera plant (*Alternanthera dentata*).

The working day for the people responsible for transplanting of plants starts at 9 am and ends at 5 pm. Employees arrive a few minutes earlier to prepare for work. At 9 am they sit at their workplace, spray it with 70% ethanol solution and transfer 20 containers with a culture medium, 4 containers with mother plants, sterile paper plates, tweezers and scalpels to laminar flow hood. All these objects are prepared by a different person who is responsible for work organization, and not included in the study. There are always 3 pairs of tools. One pair of tweezers and scalpels is used for cutting plants, the second is in a glass bead steriliser and the third in an ethanol solution. Tools for cutting are changed after completion of transplanting of mother plants from one container. Hand used tools are transferred to a glass bead steriliser, hot tools from the steriliser are moved to ethanol and cool tools from ethanol can be used for further work.

Plant cultures are kept in polypropylene 350ml containers. The cutting of plants is done on a sterile paper plate.

The workplace is always organised in an optimal way. Tools, such as tweezers and scalpels, paper plates for cutting, containers with mother plants and containers with the medium are located near to each other and can be easily grabbed with a highly reduced possibility of contamination. All the equipment can be reached with body movement reduced to a minimum (Figure 1A). Chairs for employees are comfortable, do not cause back pain and are in accordance with the principles of health and safety at work. The LED lighting of the workplace used meets requirements. Employees work in gloves.

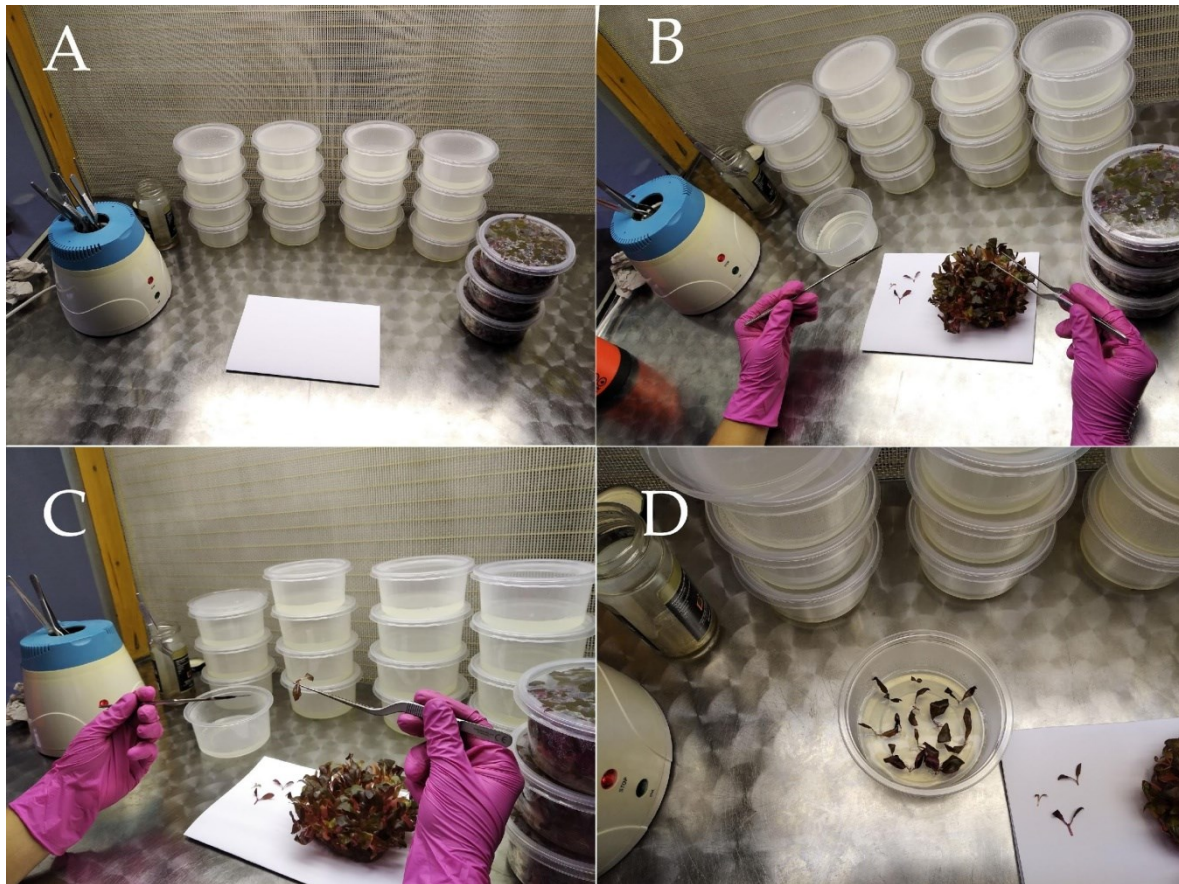


Figure 1. Workplace organization. (A) Location of cups with plants and medium. (B) Cutting off the explants. (C) Selecting explants. (D). Explants placement in medium.

Source: own elaboration.

The duties of employees during the transplanting included: opening a container with mother plants, moving all plants onto a sterile paper plate, cutting an accurate amount of explants (proper fragment of plant for propagation) that can be transplanted without drying too much, opening a container with the medium, transplanting of plants, closing the lid, opening the next one. Repetition of these steps until the total use of all plant material is complete, replacing containers with explants on containers with the medium, removing empty mother plant containers on completion and adding new ones to the laminar flow hood (Figure 1B-1D).

At the end of the day the workplace is cleaned and prepared for work on the next day. Cleaning consists of tweezers and scalpels being removed from the laminar flow hood and placing them on the trolley standing next to the workplace, spraying 70% ethanol solution inside the laminar flow hood and a thorough wiping down. Tweezers and scalpels are replaced with sterile ones the next day, before the start of the working day.

The experiment consisted of examining the work efficiency of five combinations. Firstly – the control combination C1 consisted of an eight-hour work day with plant transplanting, whilst another combination C2-C5 consisted of a six-hour plant transplanting in various systems and two hours of other work activities (Table 1). During these two hours employees were not supposed to transplanting plants. Instead they were doing other necessary activities such as:

preparing medium for the next day, sterilisation, removing contaminated cultures from the growth room and had a 15 minute break.

At the end of each hour the number of plants cut were recorded. The whole 15 minute break took place at the end of the fourth hour of work, 12:45-13:00, within an eight-hour work combination. The break in a six-hour transplanting work combination took place when employees were not working with plant transplanting. During the examination of the six-hour transplanting working day, examination of efficiency consisted of four cases when employees worked: 11 am to 5 pm (C2); 9 am to 11 am and 1 pm to 5 pm (C3); 9 am to 1 pm and 3 pm to 5 pm (C4) and 9 am to 3 am (C5). Table 1 shows the scheme of the work day in different combinations.

Table 1.
Scheme of work day in different combinations

Work hour	Combination C1	Combination C2	Combination C3	Combination C4	Combination C5	
9:00-10:00	plant transplanting with 12:45-1:00 break	other activities and break	plant transplanting	plant transplanting	plant transplanting	
10:00-11:00			other activities and break			
11:00-12:00		plant transplanting	plant transplanting	other activities and break		
12:00-1:00						
1:00-2:00		plant transplanting	plant transplanting	other activities and break	other activities and break	
2:00-3:00						
3:00-4:00				plant transplanting	plant transplanting	other activities and break
4:00-5:00						

Source: own elaboration.

In time series analysis ANOVA Kruskal-Wallis test was used to elaborate data above. P-value is $\alpha = 0,05$.

The following hypothesis were adopted:

H0 – there are no significant statistical differences between the employees work performance in each hour and the way the work is organised.

H1 – at least in one of the organization's of work combination, average hourly work efficiency differs significantly from the others.

Apart from this in time series analysis, taking the number of cut plants obtained in the first hour after starting work as 100%, the changes in dynamics of productivity were calculated. The coefficient of variation, as a quotient of the standard deviation and the arithmetic mean of plants produced within each hour was also calculated and in each combination for three repetition's for ten employees. For determining the number of plants produced in individual hours arithmetic average was used.

The research conducted also allowed for an estimation of Productivity Index PI according to the followed formula:

$$PI = \frac{PRESENT\ PRODUCTIVITY}{BASE\ PRODUCTIVITY}$$

Present productivity is the number of plants that an employee cuts during one hour. The base productivity is the number of plants that each employee should produce in a single hour. $PI > 1.0$ indicates that productivity is better than the base, planned productivity. $PI < 1.0$ indicates that productivity is less than planned. Base productivity was determined on the basis of the average highest number of plants produced within a standard 8-hour workday.

The Labour Productivity Index LPI was also calculated. LPI shows the efficiency of services and goods production. It is a ratio between the production of goods and the total number of work-hours or total employment (Freeman, 2008).

$$LPI = \frac{VOLUME\ MEASURE\ OF\ OUTPUT}{MEASURE\ OF\ INPUT\ USE}$$

The volume measure of output is the amount of goods and services produced by the workforce. The measure of input use reflects the time and effort of the employees. The measure of labour input is made by the total number of hours worked by all employees.

3. Results

The analysis shows that regardless of the combination, including the control combination C1, the highest work efficiency was between the fourth and sixth hour of the working day. In each combination the best efficiency of work was obtained in the middle of the working day (fig. 2, fig. 3). Even in the C3 combination in which work was started after two hours of completing other tasks, in the fifth hour of work the efficiency of transplanting was as much as 30% higher than in the first hour of work. In combination C2 in which work on plant transplanting started from the third hour of the working day, efficiency in the fifth hour was 25% higher compared to the first hour of work. In C4 and C5 combinations in the fourth working hour, work efficiency was 22.9% higher compared to the first hour, then it gradually declined. It is worth noting that even in the case of a two-hour change of tasks and a return to transplanting, labour productivity at the end of the working day is much higher than in the first or second hour. For example, in the C4 combination, in the eighth hour of the working day, the efficiency was 10% higher than in the first hour of the day, and in the case of the C3 combination 15% higher.

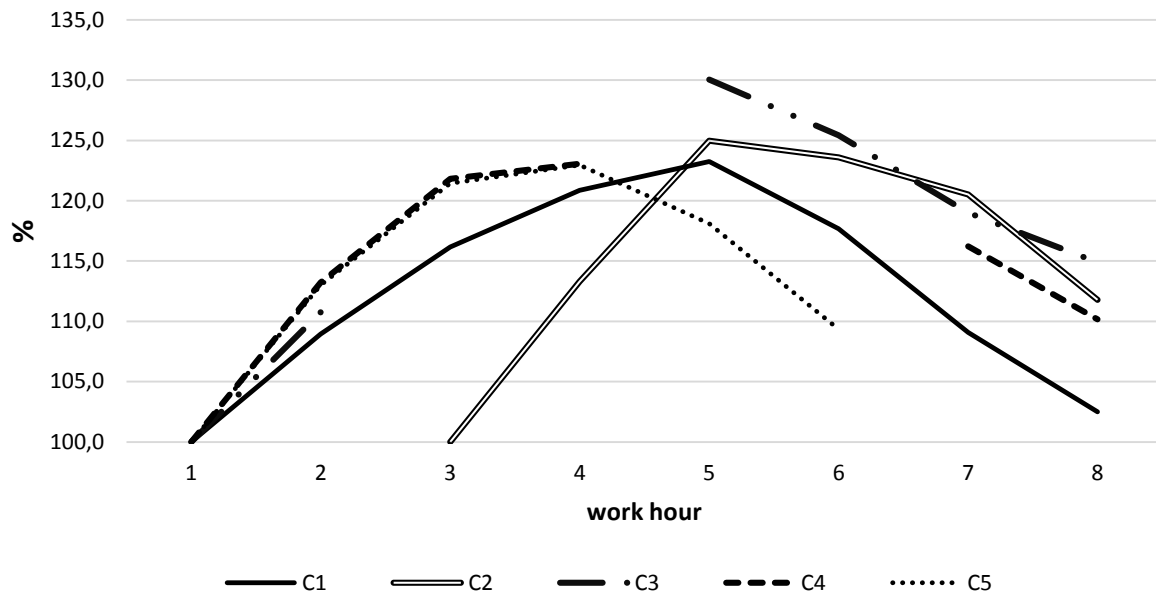


Figure 1. The dynamics of work efficiency during transplanting in five combinations. Work efficiency in the first hour of starting work = 100%.

Source: own elaboration.

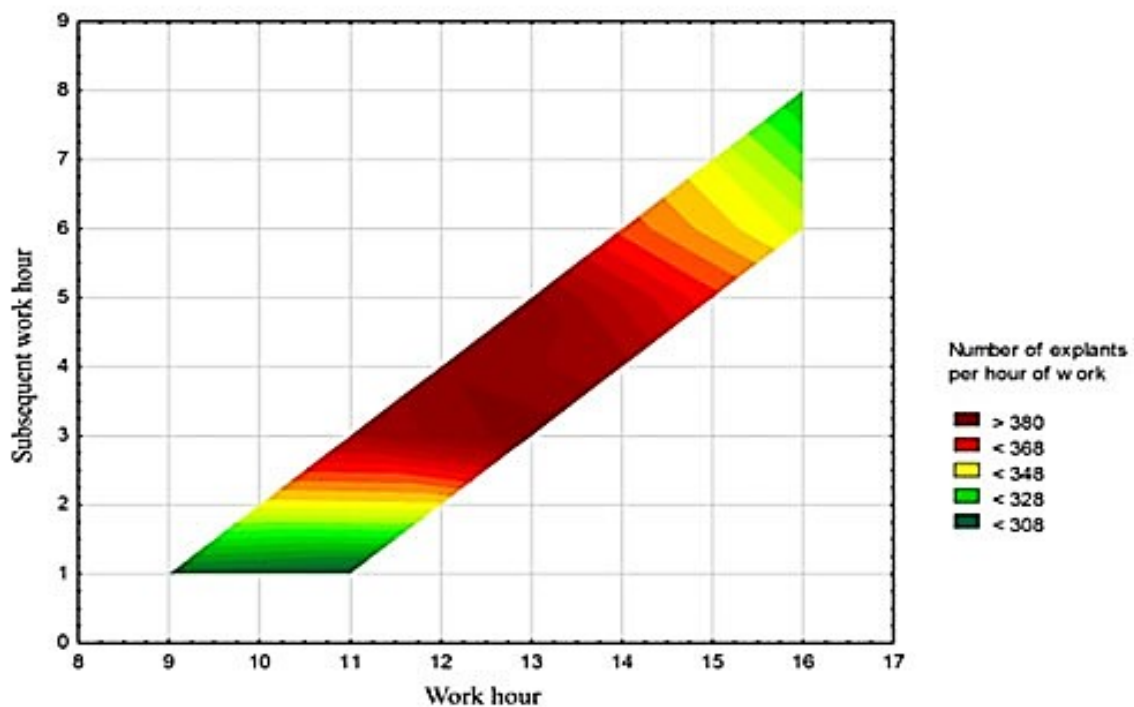


Figure 3. Number of explants per hour of work in subsequent work hour.

Source: own elaboration.

The results presented above were in addition conducted by statistical analysis. The value of all coefficients of variation for the combination C2 to C5 was 58%. The coefficients differed only in decimal values, whilst the coefficient of variation for the combination C1 was 7.1%. The variability for C2 to C5 is higher because work on other duties (other than plant

transplanting) were calculated as '0'. However, regardless of the zeros, the coefficient of variation in all combinations was the same.

The analysis showed that regardless of the organization of work during the day, there are no statistically significant differences in work efficiency. Graphic presentation of the phenomenon described is shown in figure 4. The p-value calculated for individual combinations was 0.9595, whilst the value of statistics $H = 0.3029$. Because p-value was higher than the assumed significance level $\alpha = 0.05$ therefore, the hypothesis 0 (H_0) which stated there are no significant statistical differences between the employees work performance in one hour and the adoption of the way the work is organized.

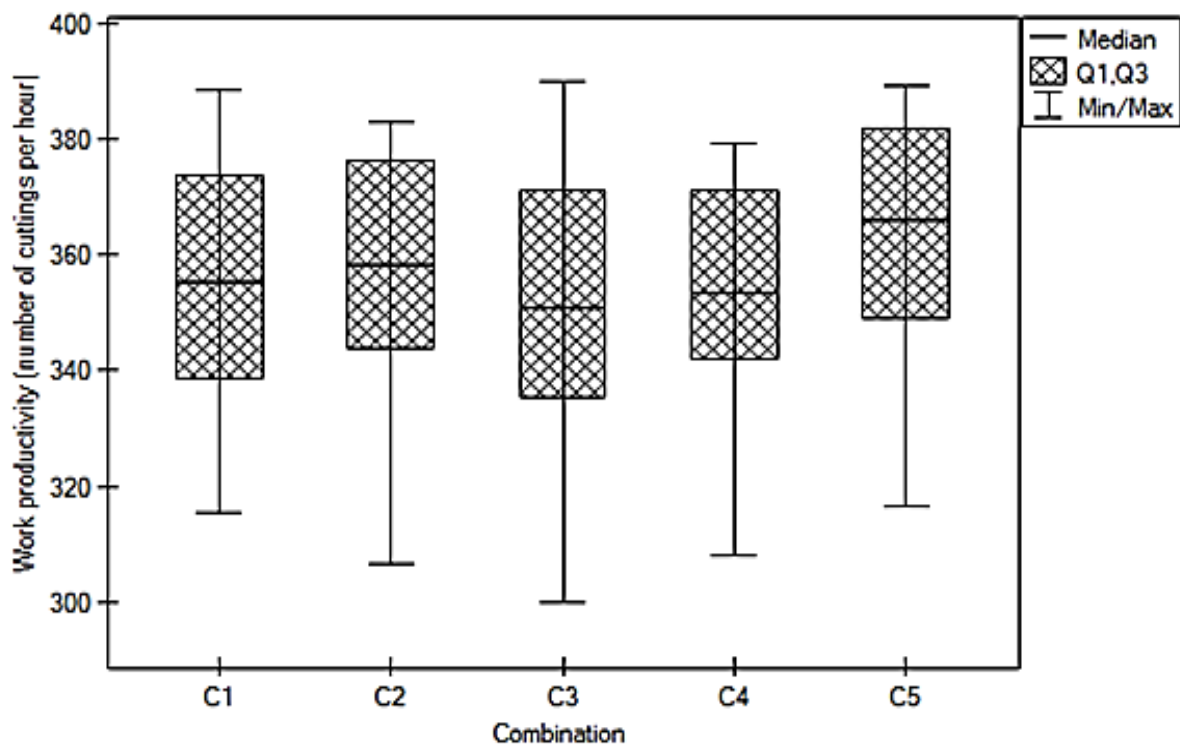


Figure 4. Hourly work efficiency and the work organization during the day based on the Kruskal Wallis ANOVA test*.

Source: own elaboration.

An examination was also conducted into which hour of work employees achieved the highest productivity (highest number of plants) in the control combination C1. Employees gained the highest productivity in the fifth hour, which resulted in 388.67 plants. This result was obtained after just 15 minutes of break from plant transplanting. This number of plants was used as the base productivity for further calculations concerning the Productivity Index. Among all combinations the largest number of plants 389.33 was gained in the fourth hour of work in C5, whilst the worst result, 294.90 plants, was obtained in the first hour in combination C3 (fig. 5).

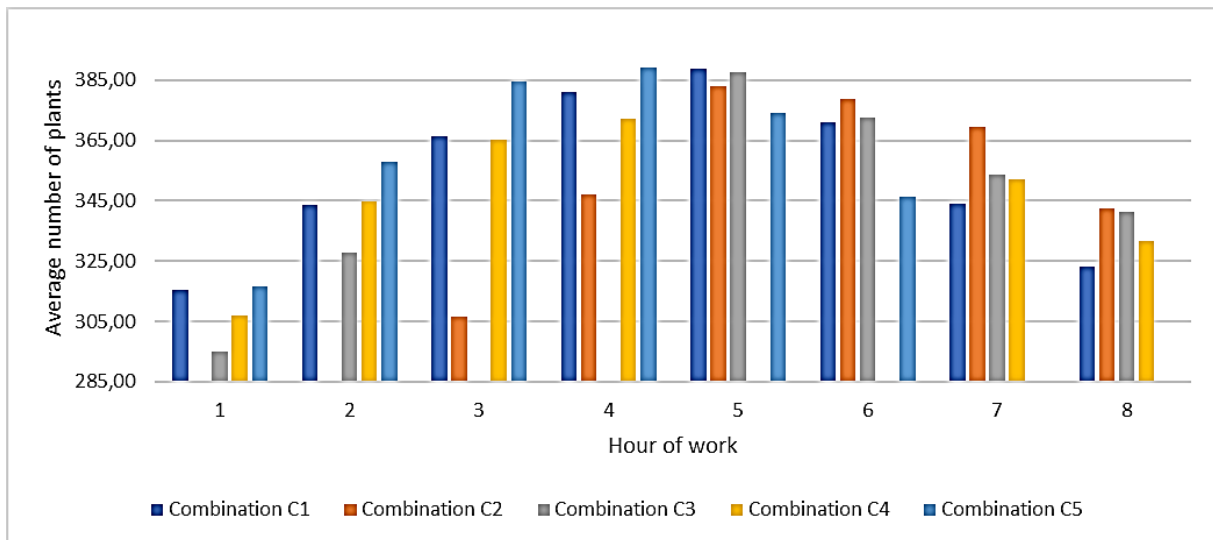


Figure 5. Arithmetic average number of plants produced in individual hours.

Source: own elaboration.

Exploring the Productivity Index the highest result for combination 1, 2 and 3 was in the fifth hour. A slight difference was observed in combination 4 and 5 where the highest PI was in the fourth hour. Whereas the lowest Productivity Index was obtained in the first hour of combination 3 and it was 0.76. In all combinations the Productivity index increased after the first hours to the middle hours of transplanting, after which it began to decrease (fig. 6).

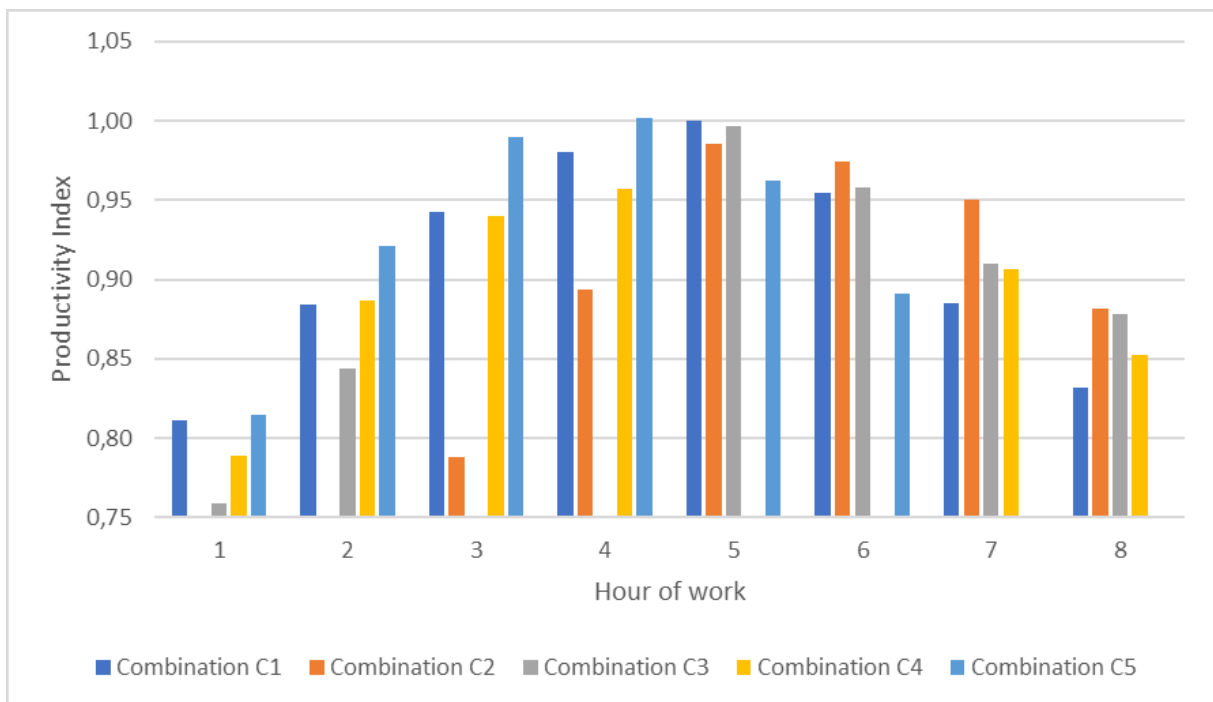


Figure 2. Productivity Index for combination C1-C5.

Source: own elaboration.

The Labour Productivity Index is a great tool used to indicate production efficiency per unit of time. In this study the most effective combination that occurred was C5. Starting the working day with six hours of plant transplanting resulting in LPI 361.44. This means that the average number of plants produced each hour in C5 was 361. The worst LPI was in C4 which was 345.42. A similar result was in combination 3. Disrupting plant transplanting procedures with other activities in combination C3 and C4 during work day leads to a decline in productivity (fig. 7).

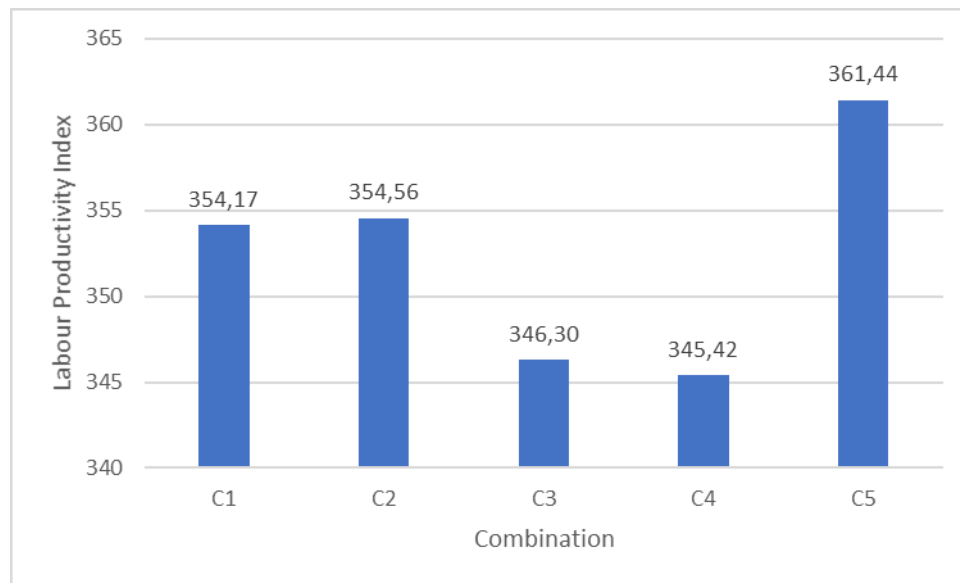


Figure 3. Labour Productivity Index (LPI) referring to five combination in experiment.

Source: own elaboration.

4. Discussion

Nowadays, when competition among companies is big, new innovative solutions are implemented to increase performance and profits. Because robots and computer programs still can not replace many human activities it is important to find solutions enhancing human productivity. In our study the proposal of six-hours work on the main task during an eight-hour workday was proposed. The study showed that LPI was the biggest when employees spent their first six hours of work on the main task and a further two hours were reserved for other duties. It suggests focusing on the main task in shorter, non-disrupted time which brings better effects. There is a trend for shortening the working day in the corporate environment, especially in offices. It is said to have a positive influence on work by reducing work time but there is little scientific research on its effects. Studies available show a reduction of productivity during extended working hours. It is supported by reliable measurements that show working overtime brings lower productivity. Shepard and Clifton (2000) indicated that in 18 manufacturing

industries overtime lowered average productivity. Similar results can be found across a number of industries. On average a 2.4% decrease in productivity was observed when a 10% increase in overtime was introduced. Working too many hours can lead to mental and physical problems, especially cardiovascular, diseases (Bosma et al., 1997; Stansfeld, Candy, 2006; Street, Lacey, 2018). Mental problems may be related to lower productivity. A good mental condition and avoiding stress can be essential for high performance at work. Street and Lacey (2018) showed that employees of a mining company in Queensland experienced stress during work have 19% lower productivity than employees who did not feel stress at work. So working less hours and in a good atmosphere can truly influence good performance in a company. On the contrary Collewet and Sauermann (2017) proved through an experiment on a call centre company that call quality does not decrease with growth of worked hours during the day. What is more it slightly improves.

Research on productivity should also be supported by the assessment of the reduction of labour costs. As mentioned in the literature review, the workforce can even absorb 60% of the total cost of production. There is a possibility of the reduction in this significant cost through proper workday organization and in this paper the proposal of such a solution was proposed. Our study proved that the middle of the working day is the most effective. This is a signal that during this time the most demanding task can be entrusted to the workers. The effect of higher efficiency in the middle of the day can be explained by assuming that just at the beginning of work the employee needs some time to increase their own work efficiency. In the next stage there is maximum efficiency moment. When employees sense the end of the working day efficiency decreases. A similar dependence was described by Bryson and Forth (2007) but over a period of a week. Monday and Friday occurred to be the less effective days of the week. On these days the smallest number of hours during the workday were really spent on work. Whereas on the middle days of the week, performance was the highest. The reasons for such similarities during weekly and daily changes in productivity are probably the same and are caused by free time after work and weekend rest. At the start of work in daily and weekly routines, rested people need time to re-gain the special co-ordination required to perform tasks which are often lost after rest time. Also similarly, faced with the feeling of the weekend approaching people focus more on plans for entertainment rather than on high performance at work.

5. Conclusions

1. The middle of the workday is characterised by the highest efficiency, so at this time of the workday the most demanding tasks should be entrusted. At the beginning and at the end of work, when performance is lower, less demanding tasks can be completed. These can include employees performing various duties, work in tissue culture laboratories should be organised as mentioned above.
2. In an eight hour workday combination the best productivity is gained in the fifth hour just after a fifteen minute break. The lowest productivity is gained when the main task (plant transplanting) is interrupted a by other duties for two hours.
3. The highest productivity is achieved in a combination when the main task was completed for six hours (starting from the first hour) during an eight hour working day.
4. However, it should be emphasized that hypothesis H0 which stated that there are no significant statistical differences between the employees work performance in each hour and the way the work is organized was confirmed.

References

1. Bosma, H., Marmot, M.G., Hemingway, H., Nicholson, A.C., Brunner, E., Stansfeld, S.A. (1997). Low job control and risk of coronary heart disease. *Whitehall II (prospective cohort) study*, 314, pp. 558-565.
2. Bryson, A., Forth, J. (2007). Productivity and days of the week. Discussion Paper. *Royal Society for the encouragement of Arts, Manufactures & Commerce*.
3. Chiachung, C. (2016). Cost analysis of plant micropropagation of Phalaenopsis. *Plant Cell Tiss Organ Cult*, 126, pp. 167-175.
4. Collewet, M., Sauermann, J. (2017). *Working hours and productivity. Discussion paper series*. IZA Institute of Labor Economics.
5. Freeman, R. (2008). Labour productivity indicators. Comparison of two OECD databases productivity differentials and the Balassa-Samuelson effect. *OECD Statistics Directorate Division of Structural Economic Statistics*.
6. Garris, L.B., Monroe, L.K. (2005). The Color Factor. *Journal of Buildings*, 99(10), pp. 72-73.
7. Golden, L. (2012) The Effects of Working Time on Productivity and Firm Performance, Research Synthesis Paper. *Conditions of work and employment series*, 33.
8. Haake, A.B. (2011). Individual music listening in workplace settings: An exploratory survey of offices in the UK. *Musicae Scientiae*, 15(1), pp. 107-129.

9. Haneiko, J.B., Henry, W.C. (1991). Impacts to construction productivity. *Proceedings of the American Power Conference, 53-II*, pp. 897-900.
10. Karlikova, R., Pinosova, M., Hricova, B. (2016). Lighting quality and its effects on productivity and human health. *International journal of interdisciplinarity in theory and practice ITPB, 10*, pp. 8-12.
11. Kossek, E.E., Lee, M.D. (2008). Implementing a Reduced-Workload Arrangement to Retain High Talent: A Case Study. *The Psychologist-Manager Journal, 11, No. 1*, pp. 49-64.
12. Kossek, E.E., Van Dyne, L. (2008). Face time matters: A cross-level model of how work-life flexibility influences work performance of individuals and groups. *Handbook of work-family integration: Research theory and best practices*, pp. 305-330.
13. Lesiuk, T. (2005). The effect of music listening on work performance. *Psychology of Music, 33(2)*, pp. 173-191.
14. O'Conner, L.V. (1969). Overcoming the problems of construction on large central station boilers. *Proceedings of the American Power Conference, 31*.
15. Parkinson, C.N. (1955). Parkinson's Law. *The Economist*.
16. Pożoga, M., Olewnicki, D., Jabłońska, L. (2019). In Vitro Propagation Protocols and Variable Cost Comparison in Commercial Production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* Hybrid as a Renewable Energy Source. *Appl. Sci., 9*, 2272.
17. Saraswathi, M.S., Uma, S., Kannan, G., Selvasumathi, M., Mustaffa, M.M., Backiyarani, S. (2016). Cost-effective tissue culture media for large-scale propagation of three commercial banana (*Musa* spp.) varieties. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 91, 1*, pp. 23-29.
18. Shepard, E., Clifton, T. (2000). Are Longer Hours Reducing Productivity in Manufacturing? *International Journal of Manpower, Vol. 21, No. 7*, pp. 540-553.
19. Souza, C.A., Rocha, J.F., Araújo, L.V., Espindula, C., Rondônia, E. (2015). Comparison of Economic Efficiency between in Vitro and Field Methods for Vegetative Propagation of *Coffea Canephora*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 9(20)*, pp. 1-7.
20. Stansfeld, S., Candy, B. (2006). Psychosocial work environment and mental health—a meta-analytic review. *Scand. J. Work Environ. Health, 32*, pp. 443-462.
21. Staw, B.M., Barsade, S.G. (1993). Affect and managerial performance: A test of the sadder-but-wiser vs. happier-and-smarter hypotheses. *Administrative Science Quarterly, 38*, pp. 304-33.
22. Street, T.D., Lacey, S.J. (2018). Accounting for Employee Health: The Productivity Cost of Leading Health Risks. *Health Promot. J. Aust., 30(2)*, pp. 228-237.
23. Street, T.D., Lacey, S.J., Somoray, K. (2019). Employee Stress, Reduced Productivity, and Interest in a Workplace Health Program: A Case Study from the Australian Mining Industry. *Int. J. Environ. Res. Public Health, 16*, 94.

24. Theorell, T., Hammarström, A., Aronsson, G., Träskman Bendz, L., Grape, T., Hogstedt, C., Marteinsdottir, I., Skoog, I., Hall, C. (2015). A systematic review including meta-analysis of work environment and depressive symptoms. *BMC Public Health*, 15, 738.
25. Thorpe, T.A. (2007). History of plant tissue culture. *Mol. Biotechnol.*, 37, pp. 169-180.
26. Vischer, J.C. (1989). *Environmental quality in office*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Warszawa, 02.06.2025r.

Mgr inż. Mariusz Pożoga
mariuszpozoga@gmail.com

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy **Pożoga M., Olewnicki D. 2023. The impact of the organization of the working day on production efficiency in the laboratory of plant tissue cultures. Scientific Papers of Silesian University of Technology – Organization and Management Series, (170), 1–10** mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na głównej:

Konceptualizacji,

Opracowaniu metodologii,

Walidacji,

Analizie formalnej,

Przeprowadzeniu badań,

Gromadzeniu danych,

Pisaniu - przygotowanie oryginalnego projektu,

Wizualizacji pisania,

Administrowaniu projektem.

Podpis

Mariusz Pożoga

Warszawa, 02.06.2025 r.

Dr hab. Dawid Olewnicki
dawid_olewnicki@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny
Rolnictwo i Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., **Olewnicki D.** 2023. The impact of the organization of the working day on production efficiency in the laboratory of plant tissue cultures. Scientific Papers of Silesian University of Technology – Organization and Management Series, (170), 1–10 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Pomocniczej walidacji,

Pomocniczym przeglądzie i edycji,


Pomocniczym administrowaniu projektem.

Podpis



Article

An Efficient Method of *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’ Plantlets Production Using the Temporary Immersion Bioreactor Systems and Agar Cultures

Mariusz Pożoga¹, Dawid Olewnicki¹, Elżbieta Wójcik-Gront²  and Piotr Latocha^{3,*} 

¹ Section of Horticultural Economics, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences—SGGW, 02-787 Warsaw, Poland

² Department of Biometry, Institute of Agriculture, Warsaw University of Life Sciences—SGGW, 02-787 Warsaw, Poland

³ Department of Environmental Protection and Dendrology, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences—SGGW, 02-787 Warsaw, Poland

* Correspondence: piotr_latocha@sggw.edu.pl

Abstract: The aim of this study is to develop an efficient method for micropropagation of *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’. Agar cultures containing Murashige and Skoog (MS) medium supplemented with 6-benzyl-amino-purine (BAP) in various concentrations (0.5 mg/L to 2 mg/L) and a temporary immersion bioreactor system (TIS) using liquid medium MS with an addition of 1 mg/L BAP were tested. Rooting was performed using 1/2 MS medium supplemented with different auxin combinations (indole-3-butyric acid IBA and α -naphthalene acetic acid NAA) and activated charcoal. The TIS method was found to be the most efficient, producing 36.9 new plants within four weeks. The resulting plantlets were thin and bright green in color, with no signs of hyperhydricity. The most suitable agar medium yielded 19.5 new plants within eight weeks. For rooting, 1/2 MS supplemented with 0.5 mg/L IBA and 0.5 mg/L NAA exhibited an 84% rooting rate, whereas the addition of activated charcoal inhibited rooting.



Citation: Pożoga, M.; Olewnicki, D.; Wójcik-Gront, E.; Latocha, P. An Efficient Method of *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’ Plantlets Production Using the Temporary Immersion Bioreactor Systems and Agar Cultures. *Plants* **2023**, *12*, 1534. <https://doi.org/10.3390/plants12071534>

Academic Editor: Iyyakkannu Sivanesan

Received: 1 February 2023

Revised: 30 March 2023

Accepted: 31 March 2023

Published: 2 April 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: in vitro; multiplication; ornamental plant; TIS; tissue culture

1. Introduction

Pennisetum is the genus within the Poaceae family that consists of over 80 species found across a wide range of climatic regions. The plant is relatively low-maintenance and drought-resistant but sensitive to low temperatures [1]. *Pennisetum* × *advena* ‘Rubrum’, also known as *Pennisetum setaceum* ‘Rubrum’ or purple fountain grass, is a highly desirable plant due to its growing popularity, beautiful appearance, ease of cultivation, and stress resistance [2]. *P.* × *advena* is considered to be a cross between *P. setaceum* from North Africa and *Pennisetum macrostachys* from Malaysia [3,4]. This plant is triploid ($2n = 3x = 27$), rather sterile, and exhibits extremely low seed production, making in vitro techniques essential for large-scale propagation [5,6]. Previous research on *Pennisetum* in vitro propagation has mainly focused on somatic embryogenesis. Maity et al. [7], Lambé et al. [8], and Mythili et al. [9] presented somatic embryogenesis in *P. glaucum*, while Pius et al. [10] and Vasil and Vasil [11] studied somatic embryogenesis in *P. americanum*. Studies on *P.* × *advena* ‘Rubrum’ were mainly associated with obtaining new varieties [2]. Vegetative propagation techniques such as crown division and culm cuttings are alternative methods for propagating *P.* × *advena* ‘Rubrum’ [12,13]. However, these methods are dependent on the growing season, which is disadvantageous. In vitro techniques are more attractive for plant propagation because they are independent of seasonal and weather conditions. Since there is limited literature available on the in vitro propagation of *P.* × *advena* ‘Rubrum’ [14], further research is essential.

Increased competition in the plant market has prompted the exploration of more cost-effective methods of plant production. Bioreactors offer a potential solution. Different types of liquid medium bioreactors have been developed over the years, such as stirred tank bioreactors, cone balloon-type airlift bioreactors, rotating drum bioreactors, nutrient mist bioreactors, radial flow bioreactors, and wave bioreactors. However, the temporary immersion system (TIS), which includes the SETIS and RITA systems [15–17], has been the most widely used. TIS has many advantages, such as reducing the use of agar, which is the most expensive component of tissue culture media [18]. Additionally, liquid cultures provide more uniform culturing conditions by reducing medium exchange without container change or plant passage. Gas exchange, which speeds up growth, is also beneficial [19–21]. Despite these advantages, there are no reports on the micropropagation of the *Pennisetum* genus. There have been some reports on other Poaceae family members, such as *Arundo donax*, in TIS using the RITA system, which yielded 1200 plants in just six months from a single explant, which is about 100 times more than in conventional field propagation [22]. Da Silva et al. [23] conducted extensive research on TIS propagation in sugarcane, energy cane, *Miscanthus* spp., *Miscanthus sinensis*, *Erianthus* spp., *Saccharum spontaneum*, and *Saccharum* spp. × *Sorghum* spp. They reported good proliferation rates in the bioreactor system. TIS has been compared with agar cultures in several experiments, and TIS has been shown to have a significant advantage in proliferation. Alvard et al. [24] found that banana cultures in TIS yielded twice as much as those in agar. Gianguzzi et al. [25] also found that *Capparis spinosa* had a better growth rate, shoot length, and number of new shoots in TIS than in agar cultures. Similarly, Escalona et al. [26] found that *Ananas comosus* and Perez et al. [27] found that *Quercus suber* had a better proliferation rate in TIS than in agar cultures.

Immersion time is a crucial factor that affects the proper TIS operation. Teisson and Alvard [28] conducted research on *Coffea* sp. somatic embryos and used two immersion frequencies. They found that a 15-min immersion every 6 h induced the development and germination of embryos, while a 1-min immersion every 24 h on the same culture medium stopped embryo development. Etienne and Berthouly [19] observed that an increase in the frequency of short immersions (1 min) stimulated somatic embryo formation and improved its quality in *Coffea arabica* TIS. They found that for daily frequencies of 1, 2, and 6 immersions, yields of 480, 2090, and 3100 embryos were obtained, respectively. Research on immersion time and frequency can result in a significant increase in the development of new shoots or somatic embryos. Further research is needed to develop profitable commercial ornamental grass production, given the few reports on TIS propagation in the Poaceae family and the good results obtained in other species.

This study aimed to propose an effective micropropagation method for *P. × advena* ‘Rubrum’ and compare agar-based media with the TIS system to determine the most efficient micropropagation approach.

2. Results

Among the agar media, M2 and M3 showed the best multiplication rate after eight weeks (Table 1, Figure 1B,C). In contrast, M1 and M4 resulted in significantly lower multiplication rates (Table 1, Figure 1A,D). Plants cultured in M1, M2, and M3 were thin and green in appearance (Figure 1F). In contrast, plants grown on M4 were very hard, slightly vitrified, and exhibited basal extension, with leaves showing slight reddening at the tip (Figure 1G). As M2 medium produced the best multiplication results, a concentration of 1 mg/L BAP was used for the TIS experiment. The highest number of 36.2 plants per explant was obtained in the M5 bioreactor, and this method produced significantly different results compared to the other methods. Means, medians, and minimum and maximum values are presented in Table 1. The morphology of the new plants was similar to that of plants cultured in M1–M3. TIS and plant images are presented in Figure 1E and 1H, respectively. Based on the statistical analyses, it can be concluded that the sample distributions did not follow a normal distribution. Therefore, according to Kruskal-Wallis, the media differed

significantly from each other ($p < 0.05$). Multiple comparisons of the samples revealed that the M1 and M4 media were not significantly different, and neither were the M2 and M3 media (Table 1).

Table 1. Statistical description (mean, maximum, minimum, Q1—the first quartile, median, Q3—the third quartile, SD—standard deviation) of several newly emerged plants in used multiplication media.

Medium	Specification						
	Mean	Min.	Max.	Q1	Median	Q3	SD
M1	12.7 ^c	4	22	8	12	17	5.2
M2	19.5 ^b	7	34	13	20	26	7.1
M3	18.2 ^b	5	31	12	19	25	7.3
M4	13.0 ^c	3	24	8	12	18	5.7
M5	36.2 ^a	15	55	31	36	41	7.7

Mean values marked with the different superscript letters differ significantly according to the Kruskal-Wallis post-hoc test: $H(df = 4, n = 1500) = 785.20, p < 0.05$.

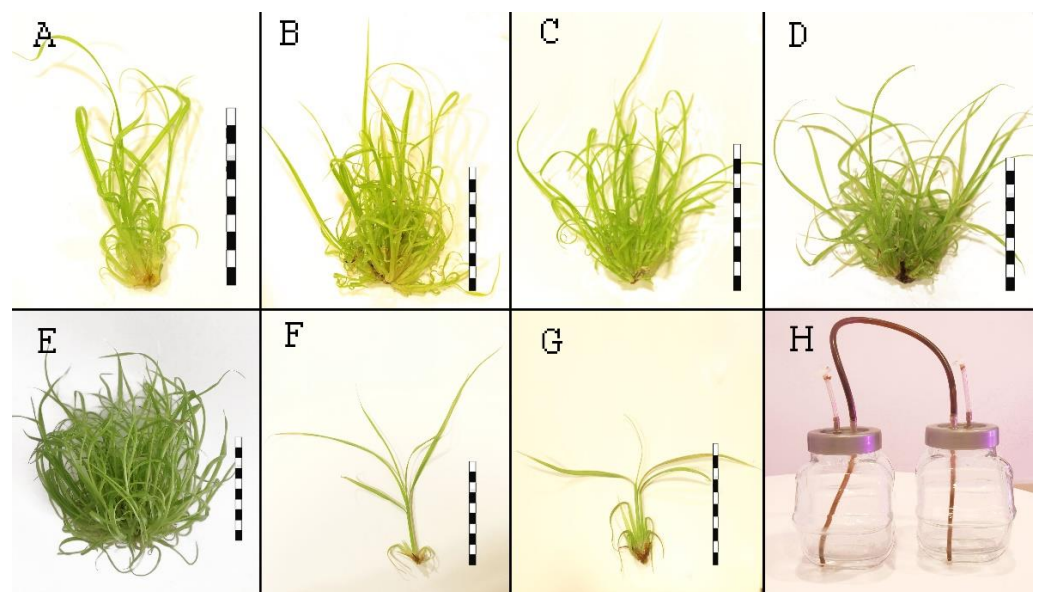


Figure 1. Effect of multiplication media. (A). Plants obtained after 8 weeks on M1. (B). Plants obtained after 8 weeks on M2. (C). Plants obtained after 8 weeks on M3. (D). Plants obtained after 8 weeks on M4. (E). Plants obtained after 4 weeks on M5 medium. (F). Representative single plant from M1, M2, M3, M5. (G). Representative single plant from M4. (H). Temporary immersion bioreactor system. Bars = 5.0 cm.

After three weeks, the rooting rate was determined. Among the tested media, R3 was found to be the most effective, with 84% of plants successfully rooted. The minimum number of rooted plants was five out of ten and the maximum was ten (Table 2). The roots were long, unbranched, and healthy (Figure 2C). Only 36% of the plants were rooted on R2 and just 12% on R1. The minimum number of rooted plants on R2 and R1 was two and zero, while the maximum number of rooted plants was six and three, respectively (Table 2). The roots that developed on R2 were shorter than on R3, and slightly branched (data not shown) (Figure 2B). The plants grown on R1 had very short, unbranched roots (Figure 2A). The media containing activated charcoal (RAC1, RAC2, and RAC3) strongly inhibited rhizogenesis and resulted in the complete absence of roots (data not shown). The rooted plants are shown in Figure 2D. Regarding the rooting results, the sample distributions did

not match the characteristics of a normal distribution, similar to the proliferation results. Thus, according to Kruskal-Wallis, the methods differed significantly from each other ($p < 0.05$). Multiple sample comparisons indicated that all the methods were significantly different (Table 2).

Table 2. Descriptive statistics (percentage, mean, maximum, minimum, –1—the first quartile, median, Q3—the third quartile, SD standard deviation) of the rooted plants in each medium.

Medium	Specification							
	Percentage	Mean	Min.	Max.	Q1	Median	Q3	SD
R1	12	1.2 ^c	0	3	0	1.0	2	0.9
R2	36	3.6 ^b	2	6	3	3.0	5	1.2
R3	84	8.4 ^a	5	10	8	8.5	9	1.2

The mean values marked with different superscript letters differ significantly according to the Kruskal-Wallis post-hoc test: $H(df = 2, n = 90) = 75.22, p < 0.05$.

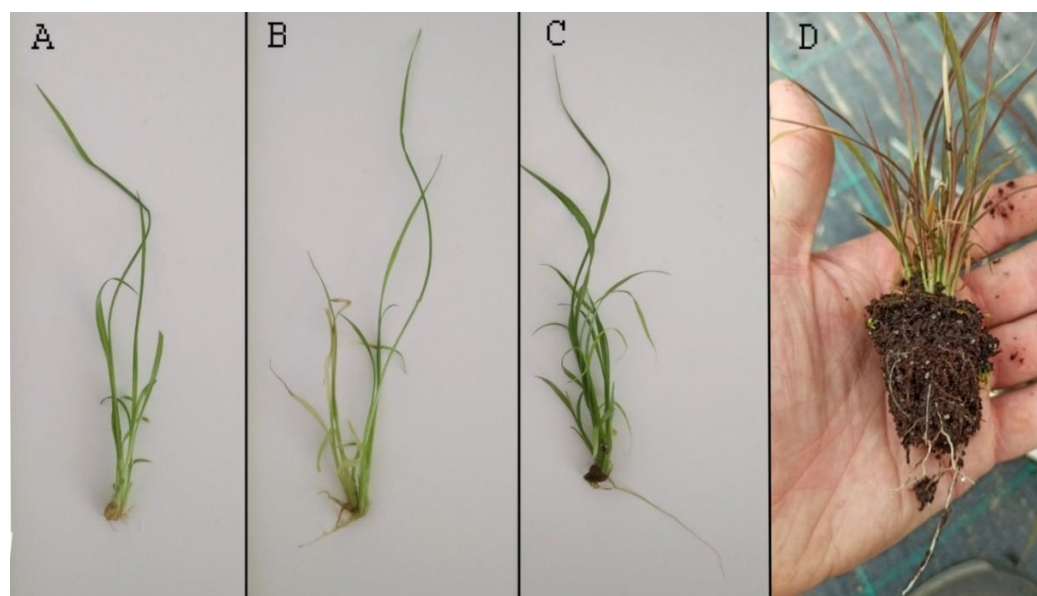


Figure 2. Effect of rooting medium and acclimatization. (A). Roots obtained on R1 after 3 weeks. (B). Roots obtained on R2 after 3 weeks. (C). Roots obtained on R3 after 3 weeks. (D). Acclimatized plant.

In the next stage of the experiment, the rooted plantlets were transferred to multi-pots for acclimatization to greenhouse conditions. All plants successfully survived this stage (100% survival rate) and exhibited rapid growth.

3. Discussion

Efficient propagation methods are essential for ornamental plants with considerable market value, such as *P. × advena* ‘Rubrum’. In our study, the examined media had various effects and showed significant differences. The highest number of new plants was produced in the MS medium containing 1 mg/L BAP when using the common agar culture. Both higher and lower concentrations of BAP were found to inhibit plant propagation, a common observation also reported in other species such as the rose [29] or banana [30]. Wei et al. [14] identified MS with an addition of 1.5 mg/L BAP, 0.1 mg/L NAA, and 0.5 mg/L IBA as the most optimal medium for *P. × advena* ‘Rubrum’ micropropagation with a multiplication coefficient of 6.5 after 30 days. In our experiment on MS medium supplemented with 1.5 mg/L BAP without the addition of auxin, 18.1 new plants were obtained after eight weeks. These results suggest that passage time is also critical in *P. × advena* ‘Rubrum’

micropropagation in addition to medium composition. An elongated passage time on a similar medium ensured approximately a three-times better result. Very high levels of BAP in *Pennisetum* micropropagation can also generate a large number of new plants. MS with 4 mg/L of BAP allowed for the acquisition of 26.6 new shoots of *Pennisetum glaucum* after 30 days [7]. This author also used embryogenic callus regeneration and found that the results were dependent on both the explant type and genotype. The best results of 10.2 plants per callus were achieved after 30 days on MS with an addition of 2 mg/L BAP. Yue et al. [2] proposed a micropropagation method for triploid and hexaploid *P. × advena* using callus induction on MS supplemented with 3 mg/L 2,4-D, 1 mg/L NAA, and 1 mg/L KIN in the dark. The cultures were then transferred to MS medium containing 3 mg/L BAP and 0.5 mg/L NAA for 4–6 weeks for shoot induction before being transferred to $1/2$ MS rooting medium. Other reports of micropropagation protocols for *Pennisetum* species via callus include the popular methods for *P. americanum* [10] and *P. glaucum* [8,9].

The highest rooting percentage of *P. × advena* 'Rubrum', reaching 84%, was observed in $1/2$ MS medium supplemented with 0.5 mg/L IBA and 0.5 mg/L NAA. Wei et al. [14] achieved 100% rooted plants using the same medium, but differences could be due to the use of different genotypes. Activated charcoal is a commonly used substance in plant tissue culture due to its high adsorptive capacity. It is especially effective at adsorbing aromatic unsaturation products compared to olefinic ones. This makes it useful for adsorbing many auxins and cytokinins [31]. Activated charcoal can also accumulate inhibitory substances in the medium and phenolic compounds [32,33]. While many investigators have suggested that activated charcoal improves rooting [34–36], our study found that the addition of activated charcoal to any medium actually inhibited rooting, possibly due to the absorption of auxin by activated charcoal, as suggested by Fridborg and Eriksson [37]. A similar inhibitory effect on rooting was observed by Ben Joura [38] in the Dutch elm hybrid 'Commelin'. Medium supplemented with 5 μ M IBA and 2 g/L activated charcoal resulted in 46% rooting, while medium with the same IBA concentration but no activated charcoal resulted in 96% rooting. Additionally, the number of roots was higher when activated charcoal was absent. Buendía-González et al. [39] also found that the addition of activated charcoal to the induction medium instead of PVP led to a prolonged rooting time in *Prosopis laevigata* shoots, with root formation taking twice as long.

There are currently no reports available on the bioreactor propagation of *Pennisetum*. Temporary Immersion Bioreactors (TIS) appear to be the most promising systems for commercial tissue culture laboratories due to their compact size and ease of use. Moreover, TIS has the advantage of reducing hyperhydricity compared to permanent immersion [40]. In our experiment, we did not observe hyperhydricity and achieved 90% more new plants in TIS than in agar culture, and twice as quickly. Many researchers have also reported better performance of TIS over standard agar-based cultures. Comparing the same agar-based medium with TIS is a common research design to evaluate the efficiency of the two methods [41,42]. Murch et al. [20] demonstrated a five-fold bigger fresh weight per plantlet of *Crescentia cujete* and a two-fold better rooting rate. Businge et al. [43] observed an approximately 100% higher multiplication rate, 60% more fresh weight of *Betula pendula*, a 500% higher multiplication rate, and 1100% more fresh weight of *Eucalyptus* species. Uma et al. [44] found that the multiplication of new banana plant shoots in TIS was 2.7 times higher than in the semisolid culture method. Moreover, Yan et al. [45] and Jiménez et al. [46] observed higher multiplication of plants in TIS prior to agar cultures. It is important to note that TIS is usually used to determine the proper duration of immersion, intervals of immersion, or effects of explant density rather than plant growth regulator concentrations [19]. In our research, we used a 1min immersion time with a 1h interval to achieve short but frequent contact of the explant with the medium. Perez et al. [27] found that immersion for 1 min every 4 h induced 114 cotyledonary embryos in *Quercus suber*, which was significantly more than the 48 embryos obtained with immersion for 1 min every 6 h and the 14 embryos obtained with immersion for 1 min every 12 h. Similarly, Villegas-Sanchez et al. [47] demonstrated that more frequent immersion of *Rosmarinus*

officinalis explants leads to excellent results. Immersion for 1 min every 12 h resulted in 170 new shoots, while immersion for 1 min every 24 h produced only three new shoots. Using immersion for 5 min every 12 h, 22 new shoots were obtained, and immersion for 5 min every 24 h resulted in only five new shoots. Based on this information, short but frequent immersion can yield good proliferation results.

The temporary immersion bioreactor method shows much higher efficiency than the agar cultures. Further investigation and method improvements should be developed.

4. Materials and Methods

4.1. Micropropagation Experiment Design

The *P. × advena* ‘Rubrum’ plant used in the experiment was acquired from a local nursery. The explant for culture initiation was a 1 cm intercalary meristem excised from mother plants. The explants were surface sterilized with 15% commercial bleach solution (4.28% sodium hypochlorite) for 15 min. Subsequently, they were rinsed with sterile distilled water three times, each for 5 min, 10 min, and 15 min. The culture initiation medium used was Murashige and Skoog MS [48] with vitamins, including 2 mg/L glycine, 100 mg/L *myo*-inositol, 0.5 mg/L nicotinic acid, 0.5 mg/L pyridoxine, and 0.1 mg/L thiamine, and supplemented with 1 mg/L 6-benzyl-amino-purine (BAP). Different BAP concentrations in MS medium with vitamins were tested to identify the most efficient medium for multiplication, as shown in Table 3. The media used for rooting are also listed in Table 3. In addition to the bioreactor combination M5, every medium was supplemented with 2% sucrose and 7 g/L plant agar. The pH was adjusted to 5.8 before autoclaving.

Table 3. Media used in the agar and temporary immersion bioreactor experiments.

Medium	BAP mg/L	Agar	IBA mg/L	NAA mg/L	AC mg/L
M1	0.5	+	-	-	-
M2	1	+	-	-	-
M3	1.5	+	-	-	-
M4	2	+	-	-	-
M5	1	-	-	-	-
R1	-	+	-	-	-
RAC1	-	+	-	-	2
R2	-	+	0.5	-	-
RAC2	-	+	0.5	-	2
R3	-	+	0.5	0.5	-
RAC3	-	+	0.5	0.5	2

The photoperiod consisted of 12 h of daylight and 12 h of darkness, with cool-white fluorescent tubes (3100 Lm) providing the light source at a constant temperature of 23 °C. The subculture duration was eight weeks for agar cultures and four weeks for TIS. Agar cultures were conducted in 350 mL plastic containers with ten explants each. The TIS bioreactor consists of two 1.8 L jars, with 400 mL of medium in the first jar and ten explants placed in the second jar. The immersion frequency was set to 1 min per hour. Observations were made after eight weeks for agar cultures, four weeks for TIS multiplication, and three weeks for rooting. The experiment was repeated three times, with ten containers containing ten explants each used for each treatment. The plants were acclimatized to greenhouse conditions in May, with humidity maintained at 80–90% for the first week and then gradually reduced by 10–15% per week. Shading was provided for the first three weeks.

4.2. Statistical Analysis

The statistical analysis of the experiment results was performed using STATISTICA version 13.0 software (TIBCO Software Inc. (2017), <http://statistica.io>. (Version 2017 installed on the disk), CA, Palo Alto, USA [49]). To determine whether or not the sample distribution followed a normal distribution, the Kolmogorov-Smirnov test was used. Since the data did not follow a normal distribution, the Kruskal-Wallis non-parametric ANOVA test was employed to evaluate the differences between the tested media. The Kruskal-Wallis test is a non-parametric statistical test used when data do not meet the assumptions of normality or equal variances required by the ANOVA. The test statistic is based on the differences between the mean ranks of the groups [50]. Dunn's post-hoc test was used to determine which groups were significantly different from each other [51]. The level of statistical significance was set at $p < 0.05$ for all calculations.

5. Conclusions

In the micropropagation of *P. × advena* 'Rubrum', using a temporary immersion system with the addition of MS medium supplemented with 1 mg/L BAP resulted in 90% more new plants compared to agar cultures and in two times shorter time with no signs of hyperhydricity. This BAP concentration was chosen because it showed the highest multiplication rate in the agar medium. The TIS method produced statistically different results than the other methods. Rooting was achieved on 1/2 MS supplemented with 0.5 mg/L IBA and 0.5 mg/L NAA. The addition of activated charcoal inhibited rooting.

Author Contributions: Conceptualization, M.P.; methodology, M.P.; writing, M.P.; writing—initial draft preparation, M.P.; review and editing, M.P., D.O., P.L. and E.W.-G.; writing—original draft preparation, validation, formal analysis, investigation, and visualization, M.P.; data curation, M.P. and E.W.-G.; supervision and project administration, D.O. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: All data is contained in the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

- Contreras, R.N.; Owen, J.; Hanna, W.W.; Schwartz, B. Evaluation of seven complex *Pennisetum* hybrids for container and landscape performance in the Pacific Northwestern United States. *HortTechnology* **2013**, *23*, 525–528. [[CrossRef](#)]
- Yue, Y.; Fan, X.; Hu, Y.; Han, C.; Li, H.; Teng, W.; Zhang, H.; Teng, K.; Wen, H.; Yang, X.; et al. In vitro induction and characterization of hexaploid *Pennisetum × advena*, an ornamental grass. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **2020**, *142*, 221–228. [[CrossRef](#)]
- Wipf, J.K.; Veldkamp, J.F. *Pennisetum advena* sp. nov. (Poaceae: Paniceae): A common ornamental grass throughout the southern United States. *SIDA* **1999**, *18*, 1031–1036.
- Padhye, S.R.; Cregg, B.M.; Cameron, A.C. Chilling sensitivity of stored purple fountain grass propagules. *Postharvest Biol. Technol.* **2008**, *49*, 235–240. [[CrossRef](#)]
- Simpson, C.E.; Bashaw, E.C. Cytology and reproductive characteristics in *Pennisetum setaceum*. *Am. J. Bot.* **1969**, *56*, 31–36. [[CrossRef](#)]
- Zhang, Y.; Yuan, X.H.; Teng, W.J.; Chen, C.; Liu, H.; Wu, J.Y. Karyotype diversity analysis and nuclear genome size estimation for *Pennisetum* Rich. (Poaceae) ornamental grasses reveal genetic relationship and chromosomal evolution. *Sci. Hortic.* **2015**, *193*, 22–31. [[CrossRef](#)]
- Maity, P.J.; Yadav, C.; Anjaiah, V.; Bhat, V. In vitro plant regeneration through somatic embryogenesis and direct shoot organogenesis in *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. *In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant* **2009**, *45*, 145–154.
- Lambé, P.; Mutambel, H.S.; Deltour, R. Somatic embryogenesis in pearl millet (*Pennisetum glaucum*): Strategies to reduce genotype limitation and to maintain long-term totipotency. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1998**, *55*, 23–29. [[CrossRef](#)]
- Mythili, P.; Satyavathi, V.; Pavankumar, G. Genetic analysis of short term callus culture and morphogenesis in pearl millet, *Pennisetum glaucum*. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1997**, *50*, 171–178. [[CrossRef](#)]
- Pius, J.; George, L.; Eapen, S. Enhanced plant regeneration in pearl millet (*Pennisetum americanum*) by ethylene inhibitors and cefotaxime. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1993**, *32*, 91–96.

11. Vasil, V.; Vasil, I.K. Somatic embryogenesis and plant regeneration from suspension cultures of pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Ann. Bot.* **1981**, *47*, 669–678. [[CrossRef](#)]
12. Owenn, G.; Lopez, R.G. Rooting of Single-node *Pennisetum setaceum* ‘Rubrum’ Culm Cuttings is Influenced by Photosynthetic Daily Light Integral, Medium Temperature, and Hormone Application. In Proceedings of the ASHS 2015 Annual Conference, New Orleans, LA, USA, 4–7 August 2015.
13. Owenn, G.; Lopez, R.G. Propagation Daily Light Integral and Root-Zone Temperature Influence Rooting of Single-internode *Pennisetum × advena* Culm Cuttings. *Am. Soc. Hortic. Sci.* **2018**, *53*, 176–182. [[CrossRef](#)]
14. Wei, J.J.; Li, L.F.; Yu, X.B. Tissue culture and rapid propagation of *Pennisetum setaceum* ‘Rubrum’. *Plant Physiol. J.* **2015**, *51*, 207–211.
15. Takayama, S.; Akita, M. The types of bioreactors used for shoots and embryos. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1994**, *39*, 147–156. [[CrossRef](#)]
16. Steingroewer, J.; Bley, T.; Georgiev, V.; Ivanov, I.; Lenk, F.; Marchev, A.; Pavlov, A. Bioprocessing of differentiated plant in vitro systems. *Eng. Life Sci.* **2013**, *13*, 26–38. [[CrossRef](#)]
17. Werner, S.; Maschke, R.; Eibl, D.; Eibl, R. *Bioreactor Technology for Sustainable Production of Plant Cell-Derived Products*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017.
18. Pożoga, M.; Olewnicki, D.; Jabłońska, L. In Vitro Propagation Protocols and Variable Cost Comparison in Commercial Production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* Hybrid as a Renewable Energy Source. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 2272. [[CrossRef](#)]
19. Etienne, H.; Berthouly, M. Temporary immersion systems in plant micropropagation. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **2002**, *69*, 215–231. [[CrossRef](#)]
20. Murch, S.; Liu, C.; Romero, R.; Saxena, P. In vitro Culture and Temporary Immersion Bioreactor Production of *Crescentia cujete*. *Plant Cell Tissues Organ Cult.* **2004**, *73*, 63–68. [[CrossRef](#)]
21. Albarra, J.; Bertrand, B.; Lartaud, M.; Etienne, H. Cycle characteristics in a temporary immersion bioreactor affect regeneration, morphology, water and mineral status of coffee (*Coffea arabica*) somatic embryos. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **2005**, *81*, 27–36. [[CrossRef](#)]
22. Cavallaro, V.; Patanè, C.; Cosentino, S.L.; Silvestro, I.D.; Copani, V. Optimizing in vitro large scale production of giant reed (*Arundo donax* L.) by liquid medium culture. *Biomass Bioenergy* **2014**, *69*, 21–27. [[CrossRef](#)]
23. da Silva, J.A.; Solis-Gracia, N.; Jifon, J. Use of bioreactors for large-scale multiplication of sugarcane (*Saccharum* spp.), energy cane (*Saccharum* spp.), and related species. *In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant* **2020**, *56*, 366–376. [[CrossRef](#)]
24. Alvard, D.; Cote, F.; Teisson, C. Comparison of methods of liquid medium culture for banana micropropagation: Effects of temporary immersion of explants. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1993**, *32*, 55–60. [[CrossRef](#)]
25. Gianguzzi, V.; Inglese, P.; Barone, E.; Sottile, F. In vitro regeneration of *Capparis spinosa* L. by using a temporary immersion system. *Plants* **2019**, *8*, 177. [[CrossRef](#)]
26. Escalona, M.; Lorenzo, J.C.; Gonzales, B.; Daquinta, M.; Gonzalez, J.L.; Desjardins, Y.; Borroto, C.G. Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr) micropropagation in temporary immersion systems. *Plant Cell Rep.* **1999**, *18*, 743–748. [[CrossRef](#)]
27. Perez, M.; Bueno, M.A.; Escalona, M.; Toorop, P.; Rodríguez, R.; Cañal, M.J. Temporary immersion systems (RITA[®]) for the improvement of cork oak somatic embryogenic culture proliferation and somatic embryo production. *Trees-Struct. Funct.* **2013**, *27*, 1277–1284. [[CrossRef](#)]
28. Teisson, C.; Alvard, D.; Lartaud, M.; Etienne, H.; Berthouly, M.; Escalona, M.; Lorenzo, J.C. Temporary immersion for plant tissue culture. In *Plant Biotechnology and In Vitro Biology in the 21st Century, Proceedings of the IXth International Congress of the International Association of Plant Tissue Culture and Biotechnology, Jerusalem, Israel, 14–19 June 1998*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1999; pp. 629–632.
29. Hameed, N.; Shabbir, A.; Ali, A.; Bajwa, R. In vitro micropropagation of disease free rose (*Rosa indica* L.). *Mycopath* **2008**, *4*, 35–38.
30. Pereira, G.; Santaella, M.; Alves, L.; Silva, E.; Flenga, A.; Santos, D. Concentrations of 6-Benzylaminopurine (BAP) in micropropagation of banana ‘Farta Velhaco’ (AAB). *Comun. Sci.* **2018**, *9*, 58–63. [[CrossRef](#)]
31. Yam, T.Y.; Ernst, R.; Arditti, J.; Nair, H.; Weatherhead, M.A. Charcoal in orchid seed germination and tissue culture media: A review. *Lindleyana* **1990**, *5*, 256–265.
32. Weatherhead, M.A.; Burdon, J.; Henshaw, G.G. Some effects of activated charcoal as an additive to plant tissue culture media. *Zeitsch. Pflanzenphysiol.* **1978**, *89*, 141–147. [[CrossRef](#)]
33. Liu, M.S.C. Plant regeneration in cell suspension culture of sugarcane as affected by activated charcoal, medium composition and tissue culture. *Taiwan Sugar* **1993**, 18–25.
34. Dumas, E.; Monteuiis, O. In vitro rooting of micropropagated shoots from juvenile and mature *Pinus pinaster* explants: Influence of activated charcoal. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1995**, *40*, 231–235. [[CrossRef](#)]
35. Sanchez, M.C.; San-Jose, M.C.; Ballester, A.; Vieitez, A.M. Requirements for in vitro rooting of *Quercus robur* and *Q. rubra* shoots derived from mature trees. *Tree Physiol.* **1996**, *16*, 673–680. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Oakes, A.D.; Desmarais, T.; Powell, W.A.; Maynard, C.A. Improving Rooting and Shoot Tip Survival of Micropropagated Transgenic American Chestnut Shoots. *HortScience* **2016**, *51*, 171–176. [[CrossRef](#)]
37. Fridborg, G.; Eriksson, T. Effects of activated charcoal on growth and morphogenesis in cell cultures. *Physiol. Plant.* **1975**, *34*, 306–308. [[CrossRef](#)]
38. Ben Jouira, H.; Hassairi, A.; Bigot, C.; Dorion, N. Adventitious shoot production from strips of stem in the Dutch elm hybrid ‘Commelin’: Plantlet regeneration and neomycin sensitivity. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1998**, *53*, 153–160. [[CrossRef](#)]

39. Buendía-González, L.; Orozco-Villafuerte, J.; Cruz-Sosa, F.; Chavez, V.M.; Vernon-Carter, E.J. Clonal propagation of mesquite tree (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd. M.C. Johnston). I. Via cotyledonary nodes. *In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant* **2007**, *43*, 260–266.
40. Afreen, F. Temporary immersion bioreactor. Engineering consideration and applications in plant micropropagation. In *Plant Tissue Culture Engineering*; Gupta, S.D., Ibaraki, Y., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2006; pp. 187–201.
41. Monja-Mio, K.; Olvera-Casanova, D.; Herrera-Alamillo, M.A.; Sánchez-Teyer, F.L.; Rober, M.L. Comparison of conventional and temporary immersion systems on micropropagation (multiplication phase) of *Agave angustifolia* Haw. ‘Bacanora’. *Biotech* **2021**, *11*, 77. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Hwang, H.; Kwon, S.; Murthy, H.; Yun, H.; Pyo, S.; Park, S. Temporary Immersion Bioreactor System as an Efficient Method for Mass Production of In Vitro Plants in Horticulture and Medicinal Plants. *Agronomy* **2022**, *12*, 346. [[CrossRef](#)]
43. Businge, E.; Trifonova, A.; Schneider, C.; Rödel, P.; Egertsdotter, U. Evaluation of a New Temporary Immersion Bioreactor System for Micropropagation of Cultivars of Eucalyptus, Birch and Fir. *Forests* **2017**, *8*, 196. [[CrossRef](#)]
44. Uma, S.; Karthic, R.; Kalpana, S. A novel temporary immersion bioreactor system for large scale multiplication of banana (Rasthali AAB—Silk). *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 20371. [[CrossRef](#)]
45. Yan, H.; Liang, C.; Li, Y. Improved growth and quality of *Siraitia grosvenorii* plantlets using a temporary immersion system. *Plant Cell Tissues Organ Cult.* **2010**, *103*, 131–135. [[CrossRef](#)]
46. Jiménez, E.; Pérez, N.; Feria, M.; Barbón, R.; Capote, A.; Chávez, M.; Quiala, E.; Pérez, J.C. Improved production of potato microtubers using a temporary immersion system. *Plant Cell Tissues Organ Cult.* **1999**, *59*, 19–23. [[CrossRef](#)]
47. Villegas-Sánchez, E.; Macías-Alonso, A.; Osegueda-Robles, S.; Herrera-Isidró, L.; Nunez-Paleniús, H.; Gonzalez-Marrero, J. In Vitro Culture of *Rosmarinus officinalis* L. in a Temporary Immersion System: Influence of Two Phytohormones on Plant Growth and Carnosol Production. *Pharmaceuticals* **2021**, *14*, 747. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
48. Murashige, T.; Skoog, F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bioassays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiol. Plant.* **1962**, *15*, 473–497. [[CrossRef](#)]
49. *Statistica*, version 13 ed; Data Analysis Software System; TIBCO Software Inc.: Palo Alto, CA, USA, 2017; Available online: <http://Statistica.io> (accessed on 2 November 2022).
50. Gibbons, J.D.; Chakraborti, S. *Nonparametric Statistical Inference*, 5th ed.; Chapman and Hall/CRC: New York, NY, USA, 2011.
51. Dunn, O.J. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics* **1964**, *6*, 241–252. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Warszawa, 02.06.2025r.

mgr inż. Mariusz Pożoga
mariuszpozoga@gmail.com

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy **Pożoga M.**, Olewnicki D., Wójcik-Gront E., Latocha P. 2024. An efficient method of *Pennisetum × advena* 'Rubrum' plantlets production using the temporary immersion bioreactor systems and agar cultures. *Plants*, 12(1534), 1–15 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Konceptualizacji,

Opracowaniu metodologii,

Pisaniu - przygotowanie wstępnego projektu, przegląd i edycja,

Pisaniu - przygotowanie oryginalnego projektu,

Walidacji,

Analizie formalnej,

Badaniach i wizualizacji,

Gromadzeniu danych,

Administrowaniu projektem.

Podpis

Pożoga Mariusz

Warszawa, 02.06.2025r.

Dr hab. Dawid Olewnicki
dawid_olewnicki@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny
Rolnictwo i Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., **Olewnicki D.**, Wójcik-Gront E., Latocha, P. 2023. An efficient method of *Pennisetum × advena* 'Rubrum' plantlets production using the temporary immersion bioreactor systems and agar cultures. *Plants*, 12(1534), 1–15 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Przełądzie i edycji,

Nadzorze i administracją projektem.

Podpis



Warszawa, 02.06.2025r.

Dr hab. Elżbieta Wójcik-Gront, prof. SGGW
elzbieta_wojcik_gront@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**


Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., Olewnicki D., **Wójcik-Gront E.**, Latocha, P. 2023. An efficient method of *Pennisetum × advena* 'Rubrum' plantlets production using the temporary immersion bioreactor systems and agar cultures. Plants, 12(1534), 1–15 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Przeglądzie i edycji artykułu,

Gromadzeniu danych.

Podpis



Warszawa, 02.06.2025r.

Prof. dr hab. inż. Piotr Latocha
piotr_latocha@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., Olewnicki D., Wójcik-Gront E., **Latocha, P.** 2023. An efficient method of *Pennisetum × advena* 'Rubrum' plantlets production using the temporary immersion bioreactor systems and agar cultures. *Plants*, 12(1534), 1–15 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Pisaniu - przygotowanie wstępnego projektu, przegląd i edycja,

Podpis

KIEROWNIK KATEDRY
/ Prof. dr hab. Piotr Latocha /

Article

A Temporary Immersion System as a Tool for Lowering Planting Material Production Costs Using the Example of *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’

Mariusz Pożoga¹, Dawid Olewnicki¹ and Piotr Latocha^{2,*} 

¹ Section of Horticultural Economics, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences—SGGW, Nowoursynowska 159, 02-776 Warsaw, Poland; mariuszpozoga@gmail.com (M.P.); dawid_olewnicki@sggw.edu.pl (D.O.)

² Department of Environmental Protection and Dendrology, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences—SGGW, Nowoursynowska 159, 02-776 Warsaw, Poland

* Correspondence: piotr_latocha@sggw.edu.pl

Abstract: The aim of the study was to compare the variable costs of planting material production using the example of vitro cultures of *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’. In the study, temporary immersion system (TIS)- and agar-based methods were used in innovative workday organisation. The workday structure involved a six-hour passaging period followed by a two-hour break for medium preparation, autoclaving, and maintenance tasks. The TIS was found to be more cost-effective than the agar cultures, with lower labour costs and comparable growing expenses. The most expensive element of agar production was labour which was 43% of the costs. The second biggest cost was materials and reagents which represented 25%. In a TIS, production materials and reagents are the most expensive part of production (44%), while labour represents 24% of costs. A TIS offers a much faster multiplication of plants than agar cultures. Plants obtained in the multiplication phase are two times cheaper using a TIS. Rooting accounted for a significant portion of production costs in both methods. Overall, the TIS demonstrated superior efficiency and cost-effectiveness compared to agar cultures in producing *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ plants.



Citation: Pożoga, M.; Olewnicki, D.; Latocha, P. A Temporary Immersion System as a Tool for Lowering Planting Material Production Costs Using the Example of *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’. *Agriculture* **2024**, *14*, 1177. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071177>

Academic Editor: Shanker Lal Kothari

Received: 13 June 2024

Revised: 15 July 2024

Accepted: 16 July 2024

Published: 18 July 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: temporary immersion system; bioreactor; production cost

1. Introduction

Modern agriculture requires a sustainable approach with a primary focus on reducing resource consumption and adopting modern methods of producing high-quality planting material that is disease free, pest resistant, and uniform in size. This facilitates effective control over plant growth and yield. Emerging solutions in the form of tissue culture techniques are increasingly addressing these challenges. Furthermore, in vitro production may address the declining agricultural labour resources, as noted by Girdziute et al. and Poosappan et al. [1,2]. Micropropagation is a technique used to propagate and cultivate plants under sterile and controlled conditions. It involves the aseptic culture of plant cells, tissues, or organs in an artificial nutrient medium, allowing for the regeneration of whole plants. This technique has various applications in plant science, agriculture, biotechnology, and especially horticulture. At the same time, the number of commercial laboratories involved in the production of horticultural plants is growing [3]. Reducing production costs in plant tissue culture laboratories is crucial for ensuring economic viability, expanding market reach, fostering competitiveness, and advancing research and development in the field of plant biotechnology. It aligns with the broader goals of making plant tissue culturing more accessible, affordable, and impactful on a global scale. This can be achieved by using plastic bags for growing instead of glass vessels, substituting agar with gellan gum, replacing laboratory-grade sucrose with food sugar, using photoautotrophic systems

and effective protocols, implementing proper workday organisation, or implementing a temporary immersion system (TIS) [3–6].

A TIS consists of two autoclavable vessels connected to each other and to the air pump with tubing. One vessel is for the medium and the second contains explants. Using air pressure, the medium from one vessel is transferred to the second vessel via the tubing and immerses the explants for a set amount of time. Then, the medium is transferred back to the first vessel by air pressure or by gravity, depending on the system used [4]. TISs can be adapted for various plant species and types of tissues. They are used in research laboratories for studying plant physiology, as well as in commercial settings for the large-scale propagation of plants [7–9]. One of the most commonly produced plants by tissue culture in agriculture for which TIS methods have been developed is the potato [10,11], as well as pineapple [12–14] and banana plants [13–17]. The use of a TIS in plant tissue culturing is a technique that involves the cyclic immersion of plant explants or tissues in a liquid nutrient medium using specialised bioreactors or culture vessels [18]. This cyclic immersion promotes efficient nutrient uptake by the plant tissues. During immersion, the explants absorb essential nutrients from the liquid medium, and during exposure, they exchange gases. The controlled immersion and drainage cycles contribute to the uniform growth and development of plant tissues [19,20]. This helps reduce variability in cultures and ensures consistent results which are much better than agar-based cultures. There are many reports of an increased number of leaves and roots and increased shoot lengths in comparison to plants from agar cultures [21]. Many temporary immersion systems are designed for automation, allowing for precise control of the immersion and exposure cycles. This automation reduces the need for manual intervention and ensures reproducibility in the tissue culture process [22].

The advantages of temporary immersion systems include increased efficiency, reduced labour requirements, and improved growth rates compared to traditional agar-based tissue culture methods. TISs enable better control over nutrient utilisation and resource consumption. This optimisation can result in a reduced wastage of media, nutrients, and other resources, leading to cost savings [23].

These systems are especially advantageous for the large-scale propagation of plants in a controlled and sterile environment [16,23–25]. Automated systems can handle a larger number of cultures simultaneously, increasing the overall throughput of the tissue culture process. This is particularly valuable for high-throughput applications, such as the large-scale propagation of plants for commercial purposes. A TIS enables the expansion of operations while maintaining the quality of the produced plants [26–28]. Automation can be integrated with other technologies such as robotics, sensors, and imaging systems to further enhance the efficiency and capabilities of plant tissue culture processes.

TISs offer flexibility in production scheduling, allowing for better alignment with market demands. This flexibility can prevent overproduction and unnecessary costs associated with maintaining excess inventory. TISs are designed to maximise space utilisation, allowing for more efficient use of the available laboratory or production space. This can be particularly advantageous in settings where space is a limiting factor.

It is important to note that while a TIS can contribute to cost savings, the initial investment in acquiring and setting up these systems should be considered. The magnitude of savings will depend on factors like the size of the operation, the frequency of production cycles, and the degree of automation implemented. In many cases, the long-term benefits of improved efficiency, consistent production, and reduced labour costs can outweigh the initial investment, making a TIS a cost-effective solution for plant tissue culture.

While TISs offer numerous advantages, it is crucial to consider the specific requirements of the plant species and the objectives of the tissue culture project. TISs are not universally suitable for all plant types. Factors like cost, complexity, and scale should be considered when choosing the most appropriate tissue culture method. By optimising resource use and minimising waste, TIS contributes to more environmentally sustainable plant tissue culture practices. This is particularly relevant in large-scale production settings.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Model

This study compared explants excised from in vitro cultures of *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ as a continuation of previous research on agar-based and TIS cultures from the most efficient workday organisation proposed by Pożoga and Olewnicki (2023) [6]. This workday organisation started with six-hour passaging and was followed by a two hour on break, preparing medium for the next day, autoclaving, and removing contaminated cultures from the growth room. Passage consisted of transferring all plants from the container or TIS on a paper plate, cutting off leaves approximately 1.50–2.00 cm above the clump base, dividing plants into single explants, and transferring them to a new container or TIS. Rooting clumps were divided into single plants and placed in an agar medium. At the end of each work hour, the person not involved in passaging collected several containers and TISs with transferred plants. The experiment was repeated three times. Each time there were ten containers or TISs with ten explants. Plants obtained from agar cultures and TISs were comparable in size and quality after acclimatisation. Data including the number of plants in clumps obtained from agar cultures and TIS (19.5 and 36.2, respectively) and rooting percentage (84%) were acquired from our previous study [5].

2.2. Culture Conditions

The culture medium used was Murashige and Skoog [29] (MS) medium with added vitamins: 2 mg /L Glycine, 100 mg/L *Myo*-inositol, 0.5 mg/L Pyridoxine, 0.5 mg/L Nicotinic acid, and 0.1 mg/L Thiamine, supplemented with 1 mg/L 6-benzyl amino purine (BAP), 2% sucrose, and 7 g/L plant agar, except for the TIS. The rooting medium for plants from both agar culture and TIS was MS medium with vitamins, supplemented with 0.5 mg/L indole-3-butyric acid (IBA), 0.5 mg/L naphthalene acetic acid (NAA), 2% sucrose, and 7 g/L plant agar. The photoperiod was set to 12 h of daylight followed by 12 h of darkness, with lighting provided by cool-white fluorescent tubes (3100 lm). The temperature was maintained at a constant 23 °C both day and night. The subculture period was eight weeks for agar cultures and four weeks for TIS. Agar cultures were carried out in 350 mL single-use plastic containers, each containing ten explants. The TIS, which was reusable, consisted of two 1.8 L jars. (Figure 1). The immersion frequency was 1 min/1 h. Rooting took 3 weeks.

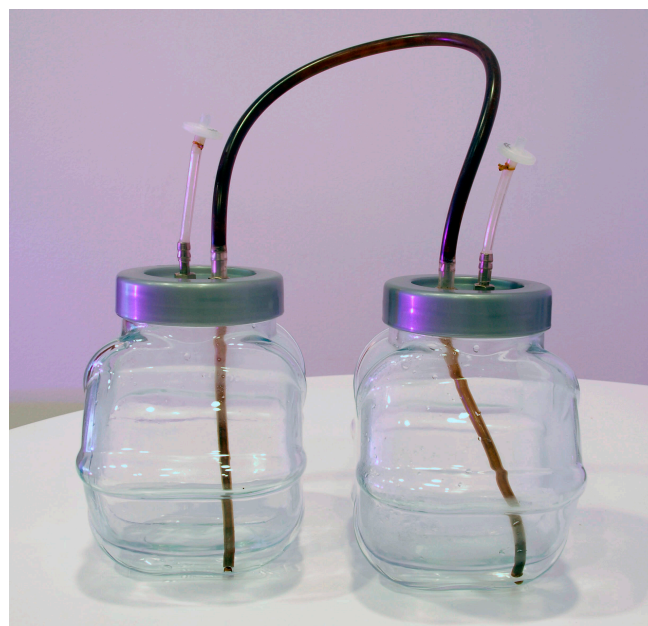


Figure 1. TIS used in the experiment consisted of two 1.8 L jars connected with tubing.

2.3. Variable Costs Comparison

Variable costs, such as reagents and containers, labour costs, electricity consumption, and plant growth in a ‘growth room’ were considered. All prices are presented as net prices. Most of the essential reagents were purchased from Duchefa Biochemie (BH Haarlem, The Netherlands). Wholesale prices for 100 L of MS medium are USD 55.60 per 100 L, plant agar costs USD 2132.04 per 25 kg, and BAP costs USD 122.67. As a source of carbon, sugar was used as a cheaper alternative to highly purified sucrose, with the cost of 1 kg of ‘Diamant’ sucrose being USD 1.23. Wholesale prices are listed in Table 1. When costs were low, the prices were presented in thousandths and marked with an asterisk (*). Fixed costs, including the laboratory building and equipment, were not considered in this study due to differences between laboratory equipment and the lack of comparability. The 350 mL containers used in the experiment cost USD 0.08. TIS costs USD 4.44. It was assumed that a single TIS would be used 60 times until tubing and sealing should be replaced. So, for further calculations TIS price was divided by several uses which gave USD 0.07 plus 20% overhead for autoclaving, connecting and washing. The total cost of TIS was USD 0.09.

Table 1. Wholesale prices and costs of reagents used in research.

Ingredients for Medium Preparation	Wholesale Prices of Ingredients (in USD)	Ingredients for 1 L of Medium Preparation	Costs of Ingredients for 1 L of Medium Preparation (in USD)
MS medium Duchefa 100 L	55.60	MS medium Duchefa (1 L)	0.56
Sucrose (food sugar) 1 kg (1000 g)	1.23	Sucrose (20 g)	0.02
Agar Ducheffa 25 kg (25,000 g)	2132.04	agar Ducheffa (7 g)	0.60
BAP Ducheffa 25 g (25,000 mg)	122.67	BAP Ducheffa (1 mg)	0.005 *
IBA Ducheffa 25 g (25,000 mg)	75.64	IBA Ducheffa (0.5 mg)	0.002 *
NAA Ducheffa 100 g (100,000 mg)	27.75	NAA Ducheffa (0.5 mg)	0.001 *
Total cost per 1 litre of agar-based multiplication medium			1.19
Total cost per 1 litre of TIS medium			0.59
Total cost per 1 litre of rooting medium			1.18

*—Prices were exceptionally presented in the thousandth part when costs were low.

Each 350 mL container was filled with 0.083 L of medium, meaning 1 L of medium is enough to fill 12 containers. The TIS was filled with 400 mL of medium, so 1 L of medium was sufficient for 2.5 TIS. The cost of one container with medium was calculated by dividing the total cost of 1 L of medium by the number of containers/TIS it could fill, and then adding the price of a single container/TIS.

The labour cost per man-hour was USD 5.43. The power consumption of the laminar flow chamber was 49 W (0.049 kW), and the electricity cost was USD 0.26 per kilowatt hour. To calculate the cost of labour required to produce one container with plants, we divided the man-hour salary by the number of containers produced within one hour. The cost of electricity consumption necessary to produce one container with plants was calculated by multiplying the electricity consumption (of the laminar flow chamber) by the cost of 1 kilowatt hour and then dividing by the average number of containers or TIS produced during one hour.

The total cost of labour and electricity for the production of a single plant is the cost of producing one container with plants, divided by the number of explants in the container. The “growing room” was equipped with racks containing 5 shelves. Each shelf measured 140 × 60 cm, providing an area of 0.84 m². Each shelf was illuminated by one 36 W (0.036 kW) cool-white fluorescent tube. Each shelf can accommodate either 55 containers of 350 mL each, with 10 explants per container, or 30 TIS bioreactor units with plants and

an additional 30 TIS bioreactor units underneath. The cost of growing plants in agar and rooting was calculated using the formula proposed by Pożoga et al. (2019) [30]:

$$PGC = \left(\frac{EC * PH * xW}{NC} * kWh \right) / N$$

where:

- PGC*—plant growth cost;
- EC*—hourly electricity consumption per one shelf;
- PH*—photoperiod length;
- xW*—number of weeks, where *W* is 7 days;
- NC*—number of containers on one shelf;
- kWh*—cost of 1 kWh;
- N*—number of explants.

The air pump for TIS support had a capacity of 22 W (0.022 kW). The air pump for TIS worked for 2 min to set pressure on each jar. During the day it worked for 96 min.

$$PGC = \left(\frac{(EC * PH * xW) + (AP * AW * xW)}{NTIS} * kWh \right) / N$$

where:

- PGC*—plant growth cost;
- EC*—hourly electricity consumption per one shelf;
- PH*—photoperiod length;
- xW*—number of weeks, where *W* is 7 days;
- AP*—air pump consumption;
- AW*—air pump working time during one day;
- NTIS*—number of TIS on one shelf;
- kWh*—cost of 1 kWh;
- N*—number of explants.

Other costs, such as preparation time for the medium, transportation of containers from the laminar chamber room to the growing room, and power consumption for autoclaving, air conditioning, water distillation, and pH meter usage, were considered as economic overheads. These overheads added 20% to the total cost of producing one container with ten explants. Rooting costs were similarly calculated. Additionally, the final cost was adjusted to account for the percentage of unrooted shoots.

The gross margin of variable costs in this research was calculated based on the value of production, following the method described by Elum et al. (2016) [31]. The gross margin was calculated using the following formula:

$$GM = (TR - TVC) / TR * 100\%$$

where:

- GM*—gross margin expressed as a percentage;
- TR*—total revenue in USD;
- TVC*—total variable costs in USD.

The Gross Margin model is an excellent tool for conducting the initial assessment of production. According to market research, the price of a single plant sold in agar is USD 0.32.

3. Results

The average number of containers of plants obtained from the agar cultures each day was 107.6 and 17.6 per hour. The TIS proved to be the most productive method. In the TIS, the average daily number of containers of plants obtained was 191.1 and 31.5 per hour, while the average number of containers of plants obtained daily from the agar rooting was 138.8 and 22.8 per hour. The average number of containers/TIS obtained at specific

hours is presented in Table 2. In each system, the fourth hour was the most efficient for passaging. The efficiency of fourth hour of the workday with agar cultures was 44.4% higher than the first hour of work. For the TIS and agar rooting system, it was 35.0% and 39.2% more, respectively.

Table 2. Average number of containers/TIS with 10 plants inside produced at specific hour [\pm SD].

Work Hour	Agar Cultures	TIS	Agar Rooting
1	14.4 \pm 0.7	27.1 \pm 2.1	18.9 \pm 0.8
2	15.9 \pm 1.5	28.8 \pm 2.7	20.4 \pm 1.4
3	17.1 \pm 1.0	30.1 \pm 2.2	22.0 \pm 1.4
4	20.8 \pm 0.7	36.6 \pm 1.8	26.3 \pm 1.1
5	19.3 \pm 1.4	34.2 \pm 1.0	25.5 \pm 1.1
6	18.1 \pm 1.0	32.3 \pm 2.2	23.7 \pm 1.5

The share of individual costs of *Pennisetum* \times *advena* 'Rubrum' showed differences between the agar cultures and TIS. The agar cultures had the highest labour cost, which constituted USD 0.309. The TIS had a much lower labour cost of USD 0.172. The highest cost in this type of production is the cost of materials and reagents, which amounted to USD 0.326 per unit. The cost of growing in both cases was similar, at USD 0.114 and USD 0.113 for the agar cultures and TIS, respectively. The total cost of single-plant production in an agar culture was USD 0.004. The TIS offered production at half the cost, at USD 0.002. Rooting is an expensive part of this production because the cost of rooting a single plant is USD 0.055. Taking the rooting percentage into account, the total cost of rooting one plant from the agar cultures and TIS is USD 0.068 and USD 0.067, respectively (Table 3).

Table 3. Costs of *Pennisetum* \times *advena* 'Rubrum' production using agar cultures and TIS [in USD].

Tissue Culture Type	Materials and Reagents	Labour	Cost of Growing	Economic Overhead	The Total Cost of a Single Container with 10 Explants	The Total Cost of a Single Plant
Agar cultures	0.179	0.309	0.114	0.120	0.723	0.004
TIS	0.326	0.172	0.113	0.122	0.734	0.002
Agar rooting	0.178	0.238	0.043	0.092	0.551	0.055
Single-rooted agar plant						0.068
Single rooted TIS plant						0.067

Taking into account the cost structure of using agar cultures, the largest share is labour costs (43%). Next, with a large share constituting 25% of all costs, are the costs of materials and reagents. However, growth costs and other overhead costs account for 16% each (Figure 2A).

In TIS production, materials and reagents are the most expensive part of production (44%). Next, with a large share constituting 24% of all costs, is labour. The costs of growth costs and economic overhead account for 15% and 17%, respectively (Figure 2B).

The TIS has an extremely fast production process compared to agar cultures. In the fourth month of production using the TIS, 474,379 plants were obtained, while using agar cultures, only 195 could be produced starting from 10 plants (Table 4).

Table 4. Number of *Pennisetum* \times *advena* 'Rubrum' plants obtained in the following months of production.

Specification	Months				
	1	2	3	4	5
Number of plants in agar cultures	10	10	195	195	3802
Number of plants in TIS	10	362	13,104	474,379	17,172,530

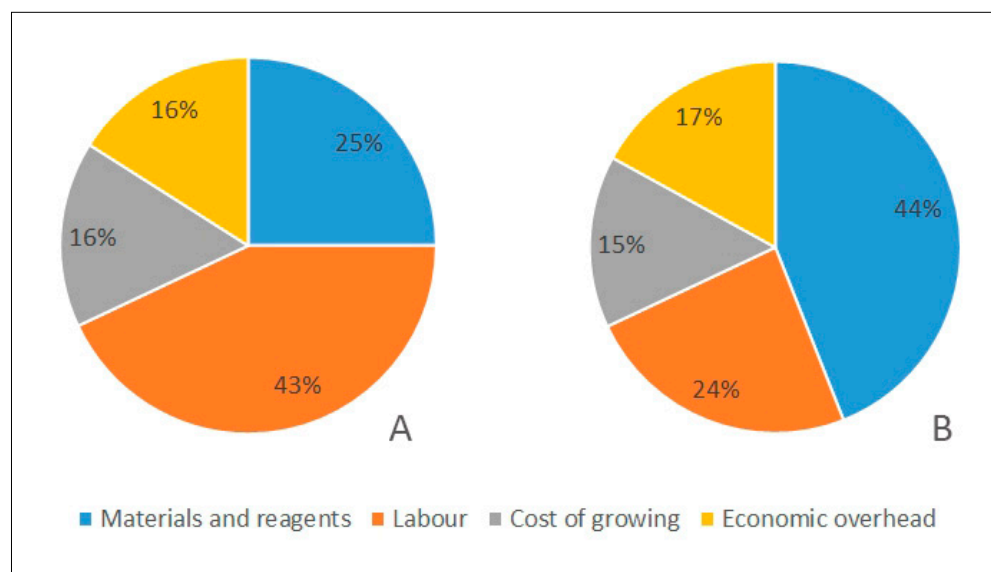


Figure 2. Share of costs of *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ production using TIS (A) versus agar cultures (B).

The gross margin of *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ plants obtained from agar cultures or a TIS is 79%. A high gross margin indicates a good profitability of producing this plant. Assuming fixed production costs are included, it can be inferred that his production could be very appealing to investors.

4. Discussion

The use of bioreactors presents significant opportunities. Various types of liquid medium bioreactors have been developed, such as stirred-tank bioreactors, cone balloon-type airlift bioreactors, rotating-drum bioreactors, nutrient mist bioreactors, radial flow bioreactors, and wave bioreactors. Among these, the temporary immersion system (TIS), which includes the SETIS and RITA systems, has emerged as the most widely adopted choice [32–34]. TIS plant production can address growing labour costs and lack of employees. It offers much faster and cheaper plant multiplication with comparable or even better quality than agar cultures [35,36]. Gas exchange is a merit of this system, as it stimulates growth and makes the plants easier to acclimate. Some systems lead to total gas exchange by forced ventilation, while others use indirect ventilation by moving the liquid medium during the immersion process [37,38].

According to Mirzabe et al. (2022) [18] and Pożoga and Olewnicki (2023) [6], plant tissue culture production has some limitations due to human workforce costs. In developed countries, labour can reach 60–80% of costs [39], while in developing ones, it can reach about 40% [40]. This study shows that the use of a TIS efficiently reduces this cost. We proved that the use of a TIS can reduce the share of labour in the variable costs of producing *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ from 43% to 23%. This is especially important in the post-COVID-19 pandemic era when increasing inflation has led to higher salary expenditures in many countries. Additionally, proper workday organisation plays an important role in work efficiency. Transplanting should not take more than 4–6 h, as 8 h of transplanting results in lower worker effectiveness [4,6].

The multiplication of *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ in a TIS is two times cheaper than in agar cultures. In a TIS, two times more plants can be obtained than in agar cultures. Additionally, the production time is much shorter. After four months of production using agar cultures, only 195 plants can be produced starting from 10. In contrast, using a TIS for the same period can yield 474,379 plants, which is a spectacular result. Similar results have been achieved by other researchers. Harris and Mason (1983) [41] achieved seven times more plants of *Vitis vinifera* in a TIS compared to agar cultures. Tiesserat and Vandercook

(1985) [42] obtained four times more plants of *Potinera* using a TIS. These results suggest even greater opportunities to reduce production costs than those shown in our study. Reduced costs translate into improved financial results for companies. Consequently, companies can invest increased income in expanding their enterprises or enhance their competitiveness by lowering the price of their plants.

The rooting phase has proven to be a particularly expensive part of production for *Pennisetum × advena* 'Rubrum'. Rooting costs USD 0.055, whereas multiplication costs USD 0.004 in agar culture and USD 0.002 in a TIS. The rooting phase should be a focus for improvement, especially in TISs, which offer greater potential for cost reduction. Spinoso-Castillo et al. (2024) [43] successfully rooted sugarcane in a TIS. Lopez et al. (2018) [44] achieved in vitro regeneration from leaf explants, shoot multiplication, and rooting of *Thapsia garganica*. Another strategy could involve rooting during the acclimatisation phase. The absence of roots during transplantation to soil provides a significant advantage due to ease of planting. Erst et al. (2019) [45] compared in vitro rooting and acclimatisation with the ex agar rooting and acclimatisation of *Rhododendron ledebourii* and *Vaccinium uliginosum* demonstrating successful results with ex agar rooting and acclimatisation showing similar or only slightly worse effects. Successful ex agar rooting and acclimatisation were also presented by Wojtania et al. (2020) [46] for blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* var. *kamtschatica*). Piao et al. (2003) [10] and Septi et al. (2021) [11] have shown that a TIS is also a valuable option for potato microtuber production. This technique not only induces a higher number of tubers per plant compared to a solid medium but also increases tuber size and weight. This opens new opportunities for commercial potato seed laboratories, as these tubers can be stored and directly transplanted without an acclimatisation step.

5. Conclusions

The temporary immersion system (TIS) offers a significantly faster plant throughput, averaging 191.1 containers of plants per day and 31.5 containers per hour, compared to agar cultures which handle 107.6 containers per day and 17.6 containers per hour.

A TIS is also more cost-effective, providing seedlings that are 50% cheaper with production costs at USD 0.002 per plant, whereas agar cultures cost USD 0.004 per plant. Rooting is the most expensive phase of plant production. Agar cultures have the highest labour costs, accounting for 43% of the variable production costs. In contrast, a TIS has lower labour costs, constituting only 24% of the variable costs, with the highest expense being materials and reagents, which make up 44% of the total cost.

The gross margin for *Pennisetum × advena* 'Rubrum' plants produced via either agar cultures or TIS is 79%, indicating a strong profitability.

Author Contributions: Conceptualization, M.P. and D.O.; methodology, M.P. and D.O.; validation, M.P., D.O. and P.L.; formal analysis, M.P.; investigation, M.P.; resources, Plant Research Laboratories; data curation, M.P.; writing—original draft preparation, M.P.; writing—review and editing, M.P. and P.L.; visualisation, M.P.; supervision, D.O. and P.L.; project administration, M.P. and D.O. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The research was supported by Warsaw University of Life Science.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Girdziute, L.; Besuspariene, E.; Nausediene, A.; Novikova, A.; Leppala, J.; Jakob, M. Youth's (Un)willingness to work in agriculture sector. *Front. Public Health* **2022**, *10*, 937657. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Poosappan, S.; Palanisamy, V.; Marimuthu, M.; Madheswaran, D. A study on farmers agricultural labour management problems during pre-pandemic time. In *AIP Conference Proceedings, Proceedings of the 24TH Topical Conference on Radio-Frequency Power in Plasmas, Annapolis, MD, USA, 26–28 September 2023*; American Institute of Physics: College Park, MD, USA, 2023.
3. Kulus, D. Selected aspects of ornamental plants micropropagation in Poland and worldwide. *Nauk. Przzyr.* **2015**, *4*, 10–25.

4. Ahloowalia, B.S.; Savangikar, V.A. Low cost energy and labour. In International Atomic Energy Agency, Low-cost options for tissue culture technology in developing countries. In Proceedings of the Technical Meeting Organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Vienna, Austria, 3–7 June 2002; pp. 41–46.
5. Pożoga, M.; Olewnicki, D.; Wójcik-Gront, E.; Latocha, P. An Efficient Method of *Pennisetum × advena* ‘Rubrum’ Plantlets Production Using the Temporary Immersion Bioreactor Systems and Agar Cultures. *Plants* **2023**, *12*, 1534. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Pożoga, M.; Olewnicki, D. *The Impact of the Organization of the Working Day on Production Efficiency in the Laboratory of Plant Tissue Cultures*; Scientific Papers of Silesian University of Technology—Organization and Management Series; Silesian University of Technology Publishing House: Warsaw, Poland, 2023; p. 170.
7. Martre, P.; Lacan, D.; Just, D.; Teisson, C. Physiological effects of temporary immersion on *Hevea brasiliensis* callus. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **2001**, *67*, 25–35. [[CrossRef](#)]
8. García-Ramírez, Y.; Barrera, G.P.; Freire-Seijo, M.; Barbón, R.; Concepción-Hernández, M.; Mendoza-Rodríguez, M.F.; Torres-García, S. Effect of sucrose on physiological and biochemical changes of proliferated shoots of *Bambusa vulgaris* Schrad. Ex Wendl in temporary immersion. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **2019**, *137*, 239–247. [[CrossRef](#)]
9. Costa, B.N.S.; Neto, A.R.; Chagas, P.C.; Chagas, E.A.; Pasqual, M.; Vendrame, W.A. Silicon in the Anatomy and Physiology of Banana Plant Leaves Under Temporary Immersion Bioreactors. *Agric. Environ. Sci.* **2021**, *7*, 10. [[CrossRef](#)]
10. Piao, X.; Chakrabarty, D.; Hahn, E.; Peak, K. A simple method for mass production of potato microtubes using a bioreactor system. *Curr. Sci.* **2003**, *84*, 1129–1132.
11. Septi, A.; Luthfi, A.M.S.; Irda, S. Microtubers production by using Temporary Immersion System (TIS) bioreactor to potato varieties. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Proceedings of the 2nd Biennial Conference of Tropical Biodiversity, Makassar, Indonesia, 4–5 August 2021*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; Volume 886, p. 886.
12. Escalona, M.; Lorenzo, F.J.; González, B.; Daquinta, M.; Gonzalez, O.J.; Desjardins, Y.; Borroto, C. Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr) micropropagation in temporary immersion systems. *Plant Cell Rep.* **1999**, *18*, 743–748. [[CrossRef](#)]
13. Scherer, R.F.; Garcia, A.C.; de Freitas Fraga, H.P.; Dal Vesco, L.L.; Steinmacher, D.A.; Guerra, M.P. Nodule cluster cultures and temporary immersion bioreactors as a high performance micropropagation strategy in pineapple (*Ananas comosus* var. *comosus*). *Sci. Hortic.* **2013**, *151*, 38–45. [[CrossRef](#)]
14. Lawan, A.; Usman, I.S.; Nasir, A.U.; Abdulmalik, M. Micropropagation of pineapple (*Ananas comosus* L. var. *Smooth cayenne*) in temporary immersion bioreactor system (TIPS). *Bayero J. Pure Appl. Sci.* **2021**, *12*, 207–209.
15. Abdulmalik, M.; Usman, I.S.; Nasir, A.U.; Lawan, A. Micropropagation of banana (*Musa* spp.) using temporary immersion bioreactor system. *Bayero J. Pure Appl. Sci.* **2021**, *12*, 197–200. [[CrossRef](#)]
16. Uma, S.; Raju, K.; Kalpana, S.; Suthanthiram, B.; Saraswathi, M. A novel temporary immersion bioreactor system for large scale multiplication of banana (Rasthali AAB—Silk). *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 20371. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Uma, S.; Karthic, R.; Kalpana, S.; Backiyarani, S. Evaluation of temporary immersion bioreactors for in vitro micropropagation of banana (*Musa* spp.) and genetic fidelity assessment using flow cytometry and simple-sequence repeat markers. *S. Afr. J. Bot.* **2023**, *157*, 553–565. [[CrossRef](#)]
18. Mirzabe, A.H.; Hajiahmad, A.; Fadavi, A.; Rafiee, S. Temporary immersion systems (TISs): A comprehensive review. *J. Biotechnol.* **2022**, *357*, 56–83. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Schumann, A.; Berkov, S.; Claus, D.; Gerth, A.; Bastida, J.; Codina, C. Production of galanthamine by *Leucojum aestivum* shoots grown in different bioreactor systems. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **2012**, *167*, 1907–1920. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
20. Zhang, B.S.; Pan, X.; Jin, L.; Xu, D.; Zhang, B.; Duns, G.J.; Shi, J.; Chen, J. Optimization of nutritional conditions using a temporary immersion bioreactor system for the growth of *Bletilla striata* pseudobulbs and accumulation of polysaccharides. *Sci. Hortic.* **2018**, *240*, 155–161. [[CrossRef](#)]
21. Hwang, H.D.; Kwon, S.H.; Murthy, H.N.; Yun, S.W.; Pyo, S.S.; Park, S.Y. Temporary Immersion Bioreactor System as an Efficient Method for Mass Production of In Vitro Plants in Horticulture and Medicinal Plants. *Agronomy* **2022**, *12*, 346. [[CrossRef](#)]
22. Lyam, P.T.; Musa, M.L.; Jamaledine, Z.O.; Okere, U.A.; Odofoin, W.T. The potential of temporary immersion bioreactors (TISs) in meeting crop production demand in Nigeria. *J. Biol. Life Sci.* **2012**, *3*, 66–86. [[CrossRef](#)]
23. Georgiev, V.; Schumann, A.; Pavlov, A.; Bley, T. Temporary immersion systems in plant biotechnology. *Eng. Life Sci.* **2014**, *14*, 607–621. [[CrossRef](#)]
24. Regueira, M.; Rial, E.; Blanco, B.; Bogo, B.; Aldrey, A.; Correa, B. Micropropagation of axillary shoots of *Salix viminalis* using a temporary immersion system. *Trees Struct. Funct.* **2018**, *32*, 61–71. [[CrossRef](#)]
25. Gianguzzi, V.; Sottile, F. Temporary Immersion System as an Innovative Approach for In Vitro Propagation of *Sorbus domestica* L. *Horticulturae* **2024**, *10*, 164. [[CrossRef](#)]
26. Mamun, N.H.; Egertsdotter, U.; Aidun, C.K. Bioreactor technology for clonal propagation of plants and metabolite production. *Front. Biol.* **2015**, *10*, 177–193. [[CrossRef](#)]
27. Businge, E.; Trifonova, A.; Schneider, C.; Rödel, P.; Egertsdotter, U. Evaluation of a New Temporary Immersion Bioreactor System for Micropropagation of Cultivars of Eucalyptus, Birch and Fir. *Forests* **2017**, *8*, 196. [[CrossRef](#)]
28. Bello-Bello, J.J.; Schettino-Salomón, S.; Ortega-Espinoza, J.; Spinoso-Castillo, J.L. A temporary immersion system for mass micropropagation of pitahaya (*Hylocereus undatus*). *3 Biotech* **2021**, *11*, 437. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
29. Murashige, T.; Skoog, F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bioassays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiol. Plant.* **1962**, *15*, 473–497. [[CrossRef](#)]

30. Pożoga, M.; Olewnicki, D.; Jabłońska, L. In Vitro Propagation Protocols and Variable Cost Comparison in Commercial Production for *Paulownia tomentosa* × *Paulownia fortunei* Hybrid as a Renewable Energy Source. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 2272. [[CrossRef](#)]
31. Elum, Z.A.; Etowa, E.B.; Ogonda, A.U. Economics of cucumber production in rivers state, Nigeria. *Agro-Sci.* **2016**, *15*, 48. [[CrossRef](#)]
32. Takayama, S.; Akita, M. The types of bioreactors used for shoots and embryos. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1994**, *39*, 147–156. [[CrossRef](#)]
33. Steingroewer, J.; Bley, T.; Georgiev, V.; Ivanov, I.; Lenk, F.; Marchev, A.; Pavlov, A. Bioprocessing of differentiated plant in vitro systems. *Eng. Life Sci.* **2013**, *13*, 26–38. [[CrossRef](#)]
34. Werner, S.; Maschke, R.; Eibl, D.; Eibl, R. Bioreactor Technology for Sustainable Production of Plant Cell-Derived Products. In *Bioprocessing of Plant In Vitro Systems*; Reference Series in Phytochemistry; Pavlov, A., Bley, T., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2017; pp. 413–432.
35. Escalona, M.; Samson, G.; Borroto, C.; Desjardins, Y. Physiology of Effects of Temporary Immersion Bioreactors on Micropropagated Pineapple Plantlets. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant* **2003**, *39*, 651–656. [[CrossRef](#)]
36. De Carlo, A.; Tarraf, W.; Lambardi, M.; Benelli, C. Temporary Immersion System for Production of Biomass and Bioactive Compounds from Medicinal Plants. *Agronomy* **2021**, *11*, 2414. [[CrossRef](#)]
37. Etienne, H.; Berthouly, M. Temporary immersion systems in plant micropropagation. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **2002**, *69*, 215–231. [[CrossRef](#)]
38. Murch, S.; Liu, C.; Romero, R.; Saxena, P. In vitro Culture and Temporary Immersion Bioreactor Production of *Crescentia cujete*. *Plant Cell Tissues Organ Cult.* **2004**, *73*, 63–68. [[CrossRef](#)]
39. Tomar, U.K.; Negi, U.; Sinha, A.K.; Kumar, P. An overview of the economic factors influencing micropropagation. *My For.* **2007**, *43*, 523–534.
40. Bhoite, H.A.; Palshikar, G.S. Plant tissue culture: A review. *World J. Pharm. Sci.* **2014**, *2*, 565–572.
41. Harris, R.E.; Mason, E.B. Two machines for in vitro propagation of plants in liquid media. *Can. J. Plant Sci.* **1983**, *63*, 311–316. [[CrossRef](#)]
42. Tisserat, B.; Vandercook, C.E. Development of an automated plant culture system. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **1985**, *5*, 107–117. [[CrossRef](#)]
43. Spinoso-Castillo, J.L.; Serrano-Fuentes, M.K.; Sorcia-Morales, M.; Bello-Bello, J.J. Temporary Immersion Bioreactors for Sugarcane Multiplication and Rooting. In *Micropropagation Methods in Temporary Immersion Systems*; Methods in Molecular Biology; Ramírez-Mosqueda, M.A., Cruz-Cruz, C.A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2024; Volume 2759, pp. 53–61.
44. López, C.Q.; Corral, P.; Lorrain-Lorrette, B. Use of a temporary immersion bioreactor system for the sustainable production of thapsigargin in shoot cultures of *Thapsia garganica*. *Plant Methods* **2018**, *14*, 79. [[CrossRef](#)]
45. Erst, G.; Karakulov, A. Rooting and acclimatization of in vitro propagated microshoots of the Ericaceae. *J. Appl. Hortic.* **2019**, *20*, 176–180. [[CrossRef](#)]
46. Wojtania, A.; Markiewicz, M.; Góraj-Koniarska, J. Ex vitro rooting, acclimatization and genetic stability of *Lonicera caerulea* var. *kantschatica*. *J. Hortic. Res.* **2020**, *28*, 61–70. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Warszawa, 02.06.2025r.

mgr inż. Mariusz Pożoga
mariuszpozoga@gmail.com

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy **Pożoga M.**, Olewnicki D., Latocha P. 2024. A temporary immersion system as a tool for lowering planting material production costs using the example of *Pennisetum × advena* 'Rubrum'. Agriculture, 14(1177), 1–14 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Konceptualizacji,

Opracowaniu metodologii,

Walidacji,

Nadzorze i administracją projektem,

Analizie formalnej

Przeprowadzeniu badań,

Gromadzeniu danych,

Pisaniu — przygotowanie oryginalnego projektu, przegląd i edycja,

Wizualizacji,

Administrowaniu projektem.

Podpis

Pożoga Mariusz

Warszawa, 02.06.2025r.

Dr hab. Dawid Olewnicki
dawid_olewnicki@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny
Rolnictwo i Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., **Olewnicki D.**, Latocha P. 2024. A temporary immersion system as a tool for lowering planting material production costs using the example of *Pennisetum × advena* 'Rubrum'. Agriculture, 14(1177), 1–14 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Konceptualizacji,

Opracowaniu metodologii,

Walidacji,

Nadzorze i administracją projektem.

Podpis



Warszawa, 02.06.2025r.

Prof. dr hab. inż. Piotr Latocha
piotr_latocha@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Rolnictwo i
Ogrodnictwo
Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Pożoga M., Olewnicki D., **Latocha P.** 2024. A temporary immersion system as a tool for lowering planting material production costs using the example of *Pennisetum × advena* 'Rubrum'. Agriculture, 14(1177), 1–14 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na:

Walidacji,

Pisaniu - przegląd i edycja,

Nadzorowi nad projektem.

Podpis

KIEROWNIK KATEDRY
/ Prof. dr hab. Piotr Latocha /