



MEXEO, Kędzierzyn-Koźle, Polska

* e-mail: mexeo@mexeo.pl

NIKODEM SAKSON  <https://orcid.org/0009-0006-2275-012x>

WIESŁAW HRECZUCH*  <https://orcid.org/0000-0002-0435-7686>

Wyzwania branży pieczarkarskiej w Polsce oraz jej rozwój przez badania i innowacje

Challenges of the button mushroom sector in Poland and its development
through research and innovation

Abstrakt. Artykuł przedstawia kompleksową analizę obecnego stanu sektora pieczarkarskiego w Polsce, od lat będącej światowym liderem pod względem eksportu. Autorzy diagnozują główne zagrożenia dla dalszego rozwoju branży, w tym niedobór pracowników, rosnące koszty energii, ograniczoną dostępność torfu, nieuznawanie zużytego podłoża za nawóz oraz niewystarczające wsparcie instytucjonalne. W tekście podkreślono potrzebę konsolidacji środowiska pieczarkarskiego oraz budowy nowoczesnej infrastruktury badawczo-rozwojowej. Zidentyfikowano również szanse dla sektora, w tym możliwość pozyskania środków UE na innowacje oraz powrót do ogólnokrajowych konferencji branżowych. Artykuł ma charakter przeglądowy i strategiczny.

Słowa kluczowe: uprawa pieczarek, torf, podłoże, ziemia okrywowa, ochrona, innowacje

WSTĘP

Historia uprawy pieczarki w Polsce sięga okresu po II wojnie światowej. Zaczęto wówczas wprowadzać technologie holenderskie. Przez ostatnie dekady Polska przekształciła się w światowego lidera eksportu pieczarek. Krajowa produkcja w 2024 r. wyniosła 360 tys. ton, z czego 245 tys. ton (68%) trafiło na eksport [*Polska w czołówce producentów i eksporterów pieczarek w UE 2025*]. Mimo imponującej pozycji rynkowej sektor boryka się z wieloma wyzwaniami, które zagrażają jego przyszłości. Można zaryzykować stwierdzenie, że rozwój technologii uprawy pieczarek w Polsce, realizowany dotychczas głównie poprzez

stopniowe udoskonalenia praktyki produkcyjnej, zatrzymał się na pewnym poziomie. W środowisku branżowym uważa się, że technologia uprawy osiągnęła swoje optimum dzięki wprowadzeniu rozwiązań przyjętych w Holandii, a poważniejsze zmiany są uznawane za ryzykowne lub niepotrzebne [Sakson 2013, Dajewski 2022, Gernon 2024, O'Connor 2024]. Taka postawa wpływa na ograniczenie gotowości producentów do wdrażania innowacyjnych rozwiązań, szczególnie gdy decyzje inwestycyjne oparte są na uznanych, choć coraz częściej przestarzałych, schematach.

Załamaniem się szczytkowy dotychczas system kształcenia branżowego w postaci kursów semestralnych prowadzonych w uczelniach wyższych w Poznaniu, Siedlcach i Skierniewicach, natomiast żadna instytucja w Polsce nie oferuje kształcenia stacjonarnego w zakresie produkcji pieczarki. W jednostkach badawczych nie podejmuje się tematów badań podstawowych, badań przemysłowych i prac rozwojowych warunkujących zrozumienie wymienionych wyżej branżowych problemów strategicznych oraz znalezienie rozwiązań. Jedynym zapleczem doświadczalnym dla badań uprawowych w Polsce obecnie są Instytut Ogrodnictwa (InHort) w Skierniewicach utrzymujący cztery doświadczalne hale uprawowe oraz Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu z jedną niewielką halą uprawową. Badaniami hodowli grzybni zajmuje się Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu. Aktywność wymienionych ośrodków badawczych jest jednak ograniczona. Warto przy tym wskazać wymierną współpracę poznańskiego ośrodka z wytwórnią grzybni Spyra oraz duży projekt badawczy „Innowacyjna, mykoselektywna okrywa oraz podłoże do uprawy pieczarek” (Projekt badawczy nr POIR.01.01.01-00-0829/16-00, w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego) dotyczący kompleksowej technologii ochrony pieczarki w zakresie produkcji podłoża, okrywy i uprawy z udziałem ditlenku chloru jako substancji aktywnej biobójczo, realizowany w latach 2017–2023 przez firmę MEXEO z Kędzierzyna-Koźle we współpracy z InHort w Skierniewicach. Znaczącym osiągnięciem badawczym w Polsce jest także opracowanie, opatentowanie i wdrożenie produkcyjne beztorfowej okrywy humusowej przez wytwórnię Afirma z Wojnowa w Wielkopolsce [zgłoszenie patentowe P.452691] przy współpracy z dr. inż. N. Saksonem oraz dr. inż. P. Frankowskim (Afirma). Badania aplikacyjne kontynuowane są z pozytywnym skutkiem we współpracy z firmą MEXEO z Kędzierzyna-Koźla, Politechniką Opolską oraz pieczarkarnią Grzybek Piotra Pasonia z Opola, a także innymi producentami pieczarek na terenie Polski.

Upowszechnianie wiedzy na temat pieczarkarstwa opiera się obecnie na jednym czasopiśmie branżowym („Biuletyn Producenta Pieczarek”) spoza listy tzw. punktowanych czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz kilku tematycznych stronach internetowych (np. <https://www.p-m-n.pl/>, <https://www.sbg.com.pl>, <https://www.pieczarkamamoc.pl>). Nie ma w Polsce czasopism naukowych poświęconych wyłącznie pieczarkarstwu. Jedyną społeczną organizacją pieczarkarską w Polsce jest Stowarzyszenie Branży Grzybów Uprawnych z siedzibą w Skierniewicach. Specjaliści, technolodzy i doradcy pracujący w branży ograniczają się najczęściej do stosowania wiedzy, którą nabyli bezpośrednio w trakcie praktyki produkcyjnej bez kierunkowego kształcenia systemowego, skoncentrowanej wokół ustalonej historycznej technologii holenderskiej.

W latach 1980–2025 nastąpiły wielkie zmiany strukturalne w polskim pieczarkarstwie, które doprowadziły do zaniku licznych małych rodzinnych firm o powierzchni upraw od kilkuset do kilku tysięcy metrów kwadratowych, na rzecz obiektów produkcyjnych o powierzchni od kilkunastu do kilkudziesięciu lub nawet kilkuset tysięcy metrów kwadratowych. W tym czasie nastąpił także imponujący postęp w organizacji skupu, sprzedaży i eksportu

pieczarek. Polska stała się największym producentem i eksporterem pieczarek w Europie i jednym z największych producentów na świecie [<https://www.farmer.pl/fakty/polska/pie-polska-najwiekszym-w-europie-producentem-pieczarek,92897.html>, Singh i in. 2020, De Cianni i in. 2023]. Jednak brak krajowego rozwoju technologicznego i inercja we wdrażaniu nowych rozwiązań grożą stopniowym pogarszaniem się lub nawet załamaniem opłacalności uprawy, szczególnie wobec zmiennego popytu, wzrastającej konkurencji zagranicznej oraz wyzwań związanych z ochroną środowiska i rygorami przepisów zewnętrznych. Podobne problemy można zaobserwować w innych krajach europejskich, a także na świecie [Stefko i Ciesielska 2014, Zmarlicki i Brzozowski 2018, Okuda 2022, De Cianni i in. 2023, Dey i in. 2024, Goglio i in. 2024, Sangeeta i in. 2024, *What are the main challenges of the cultivated mushroom industry in 2024?*, Dissemond i in. 2025, Leithäuser i in. 2025, Walsh i in. 2025].

Wobec poważnych wyzwań branżowych wskazane zasoby zaplecza i infrastruktury naukowo-badawczej w Polsce oraz ich obecne wykorzystanie są niewystarczające do tworzenia krajowych innowacji i wdrażania niezbędnych technologii w zakresie umożliwiającym utrzymanie pozycji Polski jako lidera pieczarkarstwa europejskiego i światowego. Konieczne jest podejmowanie nowych inicjatyw naukowych oraz rozwojowych. Dalszy rozwój technologii i przekształcanie pieczarkarskich gospodarstw rolnych w przemysłową uprawę pieczarki oraz utrzymanie wiodącej pozycji Polski są możliwe wyłącznie poprzez systemowe badania naukowe, których rezultaty pozwolą na wzrost efektywności uprawy, a także zapewnią rozwiązanie obecnych problemów inżynierskich (konstrukcyjnych) i technologicznych (uprawowych). Pewną możliwość stwarzają fundusze dotacyjne na innowacje międzynarodowe, krajowe i regionalne, dostępne również dla branży pieczarkarskiej np. poprzez program SMART FENG prowadzony przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości (PARP) i Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR), odpowiednio dla przedsiębiorców i konsorcjów. Przedsięwzięcia badawcze i inwestycyjne mogą zostać dofinansowane w 50–80%, o ile ich podstawą będzie opracowanie innowacji – jest to warunek konieczny otrzymania wsparcia ze środków publicznych. Możliwości pozyskiwania projektów badawczych w branży pieczarkarskiej są jednak niewielkie. Próby konsolidacji organizacyjnej tego sektora, w tym utworzenia kluczowego klastra pieczarkarskiego w 2024 r. przez grupę inicjatywną dr. inż. N. Saksona oraz firmę MEXEO, z udziałem Klastra Zielona Chemia (sektorowy kluczowy klastr chemiczny reprezentujący szeroko pojętą branżę chemiczną i biotechnologiczną oraz posiadający statut Krajowego Klastra Kluczowego), się nie powiodły. Podobnie nie udało się zorganizować w Polsce, z udziałem ww. grupy inicjatywnej, IV Międzynarodowej Tematycznej Konferencji Technicznej Branży Grzybów Uprawnych w Siedlcach w 2025 r. z powodu małego zainteresowania środowiska. W 2025 r. w Polsce nie odbyło się żadne wydarzenie branżowe tego rodzaju. Odzwierciedla to aktualny stan krajowej branży pieczarkarskiej. W oczekiwaniu na nowe rozwiązania obserwuje się postępujący upadek wielu zakładów z wieloletnią tradycją [https://www.sadyogrody.pl/warzywa/102/pieczarkarnia_na_skraju_bankructwa_lokalna_firma_apeluje_o_wsparcie,49148.html].

Celem artykułu jest identyfikacja aktualnych i kluczowych problemów rozwojowych branży pieczarkarskiej, a także przedstawienie koncepcji kierunku badań naukowych, które mogą zaowocować opracowaniem innowacji w Polsce w omawianym zakresie.

MATERIAŁ I METODY

W pracy poddano analizie dane branżowych, ekspertyzy, raporty z rynku pieczarek, dokumenty strategiczne i ustawodawcze oraz prasę naukową i branżową. Autorzy korzystali również z własnej wiedzy zdobytej w trakcie wieloletniego zaangażowania w działalność branż, uzupełnionej wynikami wewnętrznych analiz SWOT i konsultacjami z przedstawicielami sektora w codziennej pracy zawodowej oraz w czasie zorganizowanych przez autorów trzech konferencji naukowo-technicznych, w tym dwóch międzynarodowych, w latach 2023/2024.

DYSKUSJA

Historia rozwoju współczesnej technologii uprawy pieczarek i perspektywy rozwoju

Technologia uprawy pieczarki, obecnie powszechnie dominująca praktycznie na całym świecie, powstała w latach 70. XX w. w Holandii. Została ona opracowana na potrzeby małych pieczarkarni działających w systemie satelitarnym. Polegał on na produkcji i dystrybucji okrywy, podłoża, grzybni i pieczarek w układzie niepowiązanych podmiotów zewnętrznych, w tym giełdowego systemu sprzedaży grzybów na rynek świeży i współpracy z przetwórcami, początkowo wykorzystującymi głównie pieczarki niesprzedane na tym rynku. W kolejnych latach nastąpił dynamiczny rozwój technologii uprawy pieczarek zbieranych mechanicznie wyłącznie na potrzeby przetwórstwa. Metoda ta skutkowała dużą ilością uszkodzonych owocników i produktów niskiej jakości nadających się jedynie do przetworzenia [Huang i in. 2021, Dawadi i in. 2022, He i in. 2025].

Holenderski system uprawy został opracowany dzięki bezpośredniemu zaangażowaniu państwa wspieranego przez Unię Europejską. Obejmował on finansowany przez państwo ośrodek badawczy Mushroom Experimental Station w Horst, doradztwo i szkołę [Griensven 1982, Vedder 1983]. Jednocześnie rozwijały się krajowe firmy oferujące maszyny i urządzenia oraz inne elementy konieczne do uprawy pieczarki. Pod koniec lat 90. państwo przestało interweniować w omawiany obszar, co spowodowało, że holenderskie pieczarkarstwo straciło możliwości dalszego rozwoju technologii.

Europejskie, a w szczególności polskie pieczarkarstwo staje obecnie przed pytaniem, jak rozwijać technologię uprawy pieczarki w obliczu postępującej koncentracji oraz spadającej opłacalności produkcji [<https://umdis.org/what-are-the-main-challenges-of-the-cultivated-mushroom-industry-in-2024/>, <https://umdis.org/labour-accounts-for-44-of-the-total-production-cost-of-mushrooms-in-ireland-according-to-teagasc>, *Mushroom cultivation in 2025: situation, challenges and prospects in Italy and Europe* 2025], zmniejszająca się liczba ludzi skłonnych do pracy w tej branży i wyczerpywania się zasobów naturalnych torfu [Noble i in. 2023, Whitehead 2023, Dissemmond i in. 2025, ZHAW 2025], oczekiwań konsumentów pieczarki [*European Mushrooms the hidden gem* 2024], a także uregulowań prawnych Unii Europejskiej oraz poszczególnych krajów ingerujących w proces uprawy [European Commission 2022, Whitehead 2023]. Ważny staje się także zwiększający się udział funduszy kapitałowych w funkcjonowaniu branży. W ocenie sytuacji panuje raczej powszechna zgoda. Większość problemów związanych z technologią uprawy można rozwiązać poprzez badania naukowe, których przykłady podano w dalszej części niniejszej pracy.

Kolejne części artykułu przedstawiają analizę uprawy pieczarki na rynek świeży, głównie ze względu na oczekiwania konsumentów, którzy częściej wybierają pieczarki świeże niż przetworzone, a także z uwagi na perspektywę polskiego pieczarkarstwa, ponieważ, jak już wspomniano, Polska jest największym eksporterem pieczarki na rynek świeży i najbardziej zaawansowanym krajem w przemianach strukturalnych [<https://www.opportimes.com/en/poland-consolidates-its-position-as-the-largest-exporter-of-mushrooms-in-the-world/>].

Kluczowa literatura i transfer współczesnej technologii uprawy pieczarki

W latach 70. i 80. w Holandii prowadzono szereg badań naukowych w zakresie technologii uprawy pieczarek, których rezultaty zostały opisane w fundamentalnym holenderskim opracowaniu pod redakcją dr L.J.L.D van Griensvena [1988], który był wówczas dyrektorem nieistniejącej już Mushroom Experimental Station w Horst i profesorem Uniwersytetu Nijmegen. Istotnym mankamentem omawianej publikacji jest brak opisu produkcji kompostu i podłoża jako kluczowych elementów w łańcuchu dostaw dla cyklu uprawy pieczarki. Książka ta obecnie jest trudno dostępna, a brak tłumaczenia na język polski ogranicza możliwości zapoznania się z wiedzą w niej zawartą przez producentów krajowych. Transfer holenderskiej technologii uprawy pieczarek został opisany w książce *Sygnały pieczarek. Praktyczny przewodnik w uprawie pieczarek* M. den Oudena [2017]. Powinien ją znać każdy producent pieczarek zainteresowany technologią opracowaną w Holandii i obecnie powszechnie stosowaną również w Polsce. Technologia uprawy pieczarki oraz zagadnienia związane z jakością podłoża, ochroną i przetwarzaniem były również szeroko omawiane w publikacjach polskich autorów [Gapiński i Woźniak 1999, Sakson 2004, 2007, 2008, 2009, 2012, 2013, Siwulski i Sobieralski 2004, Siwulski i Sas-Golak 2014, Szudyga 2005].

Główne elementy techniczne i technologiczne uprawy pieczarki

Obecnie globalny transfer technologii uprawy pieczarki odbywa się poprzez firmy zaopatrzenia w trakcie kompleksowych dostaw w realizacji inwestycji budowlanych, wyposażenia hal (półek uprawowych), maszyn (hopperów), platform do zbioru, systemów sterowania mikroklimatem, wentylacji i innych składowych, np. systemowe podlewanie, dostawy i uzdatnianie wody, mycie i dezynfekcja, generowanie i dostawy energii. Tak rozwijało się pieczarkarstwo w Rosji, Chinach i Indiach, a także w wielu mniejszych europejskich, azjatyckich i innych krajach na całym świecie.

Wśród głównych elementów technicznych i technologicznych w zakresie uprawy pieczarek należy wymienić:

Pomieszczenia i wyposażenie

Produkcja pieczarki prowadzona jest standardowo w halach o powierzchni uprawy 200 m², wyposażonych w regały uprawowe na 5 poziomach w dwóch rzędach, klimatyzowane, z systemem sterowania mikroklimatem. Najczęściej wykorzystywane jest podłoże fazy III z dokarmiaczem, głównie białkowym, załadowywane mechanicznie z jednoczesnym nakładaniem okrywy, z wprowadzaniem do niej kakingiem. Podlewanie realizowane jest za pomocą przesuwnej drzewki lub poprzez nawadnianie podpółkowe. Pieczarki na potrzeby rynku świeżego zbierane są ręcznie na przesuwanych platformach [Sakson 2004, 2008, Szudyga 2005, Agro-Projects 2025].

Uprawa

Uprawa prowadzona jest najczęściej w cyklu sześciotygodniowym ze zbiorem trzech rzutów opartym na założeniu zawartym w pozycji den Oudena [2017]. Stosowana powszechnie uprawa pieczarki nie jest jednak efektem wiedzy naukowej. Sztuką była nauka przez obserwację, interpretację i korektę działań dostosowaną do sygnałów. Sygnały można interpretować jako wszystkie informacje, jakie docierają do zmysłów człowieka obserwującego dany moment uprawy. Są one najsłabszym element technologii uprawy, szczególnie jeśli ich interpretacja opiera się głównie na doświadczeniu bez odpowiedniej wiedzy. Uczymy się poprzez błędy, z których wnioski mogą być wykorzystywane w kolejnych uprawach. Sygnały nie pozwalają z reguły na korektę aktualnych skutków nieoczekiwanych odchyleń. Opóźnienia w odbiorze sygnałów wynikają z niedoskonałości ludzkich zmysłów, głównie wzroku. To powód zmienności plonowania i jakości przy tych samych uprawach prowadzonych przez różne osoby, który może być niwelowany przez systemy automatyczne [Kałuski i Pawlak 2018, Kavaliauskas i in. 2022, Chong i in. 2023].

Podłoże

Pieczarkę (*Agaricus bisporus*) uprawia się na specjalnie przygotowanym podłożu kompostowym, które powstaje głównie ze słomy zbóż i obornika kurzego lub końskiego, z dodatkiem gipsu i innych korektorów pH. Proces jego przygotowania przebiega w kilku fazach technologicznych:

- faza I – to fermentacja tlenowa surowców (słoma, obornik, woda) prowadzona w pryzmach lub tunelach. Wysoka temperatura (ok. 70–80°C) i aktywność mikroorganizmów powodują rozkład łatwo dostępnych związków i powstanie wstępnego kompostu;

- faza II – pasteryzacja i dojrzewanie kompostu w zamkniętych bunkrach przy 45–60°C. W tym etapie eliminowane są chorobotwórcze mikroorganizmy, a związki organiczne stabilizują się w formy dostępne dla grzybni;

- faza III – przerost kompostu przez grzybnię pieczarki. W tunelach przerostowych lub bezpośrednio w halach grzybni kolonizuje podłoże, przygotowując je do owocnikowania. Takie podłoże (phase III substrate) trafia do pieczarkarni gotowe do produkcji;

- faza IV – to podłoże w pełni skolonizowane i pokryte warstwą okrywy, często już po rozpoczęciu formowania zawiązków owocników (pinów). Dostarczane jest jako produkt „ready-to-fruit” (phase IV substrate), co pozwala skrócić cykl produkcyjny i ograniczyć ryzyko błędów technologicznych w pieczarkarni.

Najsłabszym elementem holenderskiej technologii uprawy pieczarek jest brak wiedzy o tym, jak kontrolować zmienną jakość kompostu w przerośniętym grzybnią podłożu fazy III z dokarmiaczami. To podstawowa przyczyna dużej zmienności plonowania. Technologia kompostu początkowo opracowana była głównie dla stosowania obornika końskiego w małych pryzmach, z wykorzystaniem kombajnów. Jako dodatek stosowano soję wysokoproteinową (soja HP – high protein), która została poddana obróbce chemicznej z użyciem aldehydu, najczęściej aldehydu glutarowego lub formaldehydu. W kolejnych latach wdrożono produkcję kompostu w masie polegającą na tworzeniu dużych pryzm (mas kompostowych) w bunkrach. W tej zaawansowanej metodzie kompostowania surowce organiczne poddawane są obróbce w specjalnie przystosowanych zamkniętych pomieszczeniach, w których temperatura, wilgotność i dostęp tlenu są kontrolowane, aby przyspieszyć proces kompostowania, przebiegający w dwóch kolejnych etapach nazywanych fazą II i fazą III [CMGA 2005, Sakson 2008, Pudełko 2015, Beyer 2023a, 2024].

W ostatnich latach w europejskim i polskim pieczarkarstwie obserwuje się dalszą intensyfikację technologii produkcji, czego wyrazem jest wdrażanie podłoża fazy IV. Etap ten stanowi rozwinięcie systemu tunelowego fazy III, w którym kompost po zakończonym przerastaniu grzybnią zostaje dodatkowo pokryty warstwą okrywy i inkubowany aż do momentu zainicjowania wiązania owocników (pinheads). Tak przygotowane podłoże — dostarczane najczęściej w formie skrzyń lub tac — umożliwia skrócenie cyklu uprawy w gospodarstwie do ok. czterech tygodni, przy jednoczesnym ograniczeniu ryzyka infekcji i większej standaryzacji plonów.

W Polsce technologia ta jest rozwijana przez wiodące przedsiębiorstwa branży substratowej, m.in. Hajduk, będące jednym z nielicznych producentów kompostu fazy IV w Europie. Praktyczne zastosowanie i parametry produkcyjne tej technologii zostały opisane w *Metodyce ekologicznej uprawy pieczarki* [Szumigaj-Tarnowska 2023], w której porównano długość cyklu faz III i IV. W literaturze branżowej i analizach rozwojowych wskazuje się, że pojawienie się podłoża fazy IV, zawierającego już przerośniętą i częściowo zawiązaną okrywę, stanowi kolejny etap ewolucji technologicznej sektora i może być istotnym kierunkiem modernizacji polskiego oraz europejskiego pieczarkarstwa. Poza ogólnymi opisami nie znaleziono jednak poważnego źródła literaturowego polskiego lub zagranicznego wyczerpująco przedstawiającego proces produkcji i zastosowania podłoża fazy IV. Wydaje się również, że nie znajduje ono dotychczas większego wykorzystania w praktyce. Przyczyną może być uzyskiwany niższy plon niż z uprawy podłoża fazy III. W Polsce dostawy podłoża fazy IV oferuje wytwórnia Hajduk [<https://hajduk.pl/podloze-do-pieczarek/>]. Na własne potrzeby produkuje je wytwórnia Głuchowski.

Grzybnia

Grzybnia pieczarki to produkt biotechnologiczny będący materiałem rozmnożeniowym grzyba pieczarki, przeznaczony do przemysłowej lub amatorskiej uprawy pieczarek. Grzybnia na potrzeby rynku pieczarek świeżych to głównie tzw. hybrydowe rasy pośrednie, czyli odmiany pieczarki powstałe w wyniku skrzyżowania różnych szczepów lub ras rodzicielskich, łączące cechy obu form wyjściowych. Uzyskiwane owocniki charakteryzują się cechami pośrednimi fenotypowo (np. barwą, kształtem, tempem wzrostu) i genetycznie, a także lepsze właściwości produkcyjne i jakościowe.

Na tle opracowanych ras grzybni występują często konflikty pomiędzy ich wytwórcami oraz wzajemne roszczenia o kopiowanie, np. ras pieczarki brązowej. W każdym przypadku jest to jeden z kluczowych elementów technologii uprawy, który współdecyduje o plonowaniu, odporności lub przenoszeniu chorób wpływających na jakość owocników i plonowanie [Humfeld 1948, Beyer 2023b]. Na temat bezpośredniego użytkowego wykorzystania samej grzybni pieczarki powstały odrębne prace [Kim i in. 2011, Rathore i in. 2019, Shin 2025].

Okrywa pieczarki

Okrywa pieczarkowa to warstwa materiału, najczęściej torfowego, którą nakłada się na powierzchnię przerośniętego grzybnią podłoża w uprawie pieczarki. Jej główną rolą jest utrzymanie odpowiedniej wilgotności, zapewnienie wymiany gazowej oraz pobudzenie grzybni do tworzenia owocników. Okrywa ma zwykle grubość 4–5 cm i jest przygotowywana z torfu wysokiego, czasem z dodatkiem torfu niskiego, kredy, piasku lub gliny, w celu uzyskania odpowiedniego pH i struktury.

Do produkcji okrywy wykorzystuje się torf wysoki, a w Polsce głównie torf niski. Torf wysoki to lekki, kwaśny i ubogi w minerały materiał organiczny pochodzący z torfowisk wysokich, stanowiący podstawowy składnik warstwy okrywowej w uprawie pieczarki. Torf niski jest cięższy, bardziej zasobny w składniki mineralne i używany jako dodatek poprawiający strukturę i wilgotność okrywy.

Okrywa nie jest źródłem pożywienia dla grzybów, ale spełnia kilka kluczowych funkcji biologicznych i fizycznych, w tym:

- stymuluje tworzenie owocników (owocowanie) – zmiana warunków między podłożem a okrywą powoduje przejście grzybni z fazy wegetatywnej do generatywnej, czyli tworzenia zawiązków pieczarki;
- reguluje wilgotność i wymianę gazową – zatrzymuje wodę, chroni podłoże przed wysychaniem i umożliwia dostęp tlenu do grzybni;
- stabilizuje warunki mikroklimatyczne;
- utrzymuje równomierną temperaturę i wilgotność w strefie wzrostu;
- ułatwia równomierne wyrastanie owocników – dzięki właściwej strukturze torfu i czesaniu okrywy pieczarki wyrastają równomiernie na całej powierzchni;
- chroni grzybnię przed uszkodzeniem i zanieczyszczeniem – działa jak warstwa ochronna przeciw zbyt silnemu wysychaniu, chroni przed kurzem i zapobiega infekcjom.

W technologii uprawy pieczarki w miejsce czesania okrywy (zabieg polegający na przegrabieniu górnej warstwy okrywy) wprowadzono kaking (równomierne pokrycie podłoża warstwą okrywy z domieszką podłoża przerośniętego grzybnią). Więcej informacji o wytwarzaniu i roli okrywy można znaleźć w publikacjach Diasa i in. [2021] oraz Navarro i in. [2021].

Zbiór owocników

Stosuje się głównie zbiór ręczny pieczarki, a obecnie preferowany jest zbiór selektywny ze zbiorem dwuręcznym, z dedykowanych platform ruchomych. Opracowany w latach 70. zbiór mechaniczny dotyczył wyłącznie pieczarki do przetwórstwa o niższych wymaganiach jakościowych. Obecnie rozwijane technologie robotyzacji zbioru pieczarki na rynek świeży znajdują się w fazie przełomowej, przedwdrożeńowej, bez przekonujących rezultatów. Choć wiele firm deklaruje już przejście do fazy komercjalizacji opracowanych systemów robotyzacji zbioru, to nie widać jeszcze ich szerszego zastosowania. Nie wiadomo, jakie są koszty inwestycyjne i jaka efektywność zbioru. Zagadnienie to posiada strategiczne znaczenie dla rozwoju sektora pieczarkarskiego i będzie szerzej omawiane w dalszej części artykułu.

Ochrona pieczarki

Ochrona przed chorobami i szkodnikami w przeszłości bazowała głównie na dezynfekcji termicznej lub z użyciem formaliny oraz pestycydów. Obecnie w uprawie pieczarki nie powinno się już stosować tych substancji. W praktyce jednak formalina jest dość powszechnie stosowana z uwagi na niski koszt, skuteczność, wieloletnią tradycję i dość niską świadomość o jej kancerogennym i toksycznym oddziaływaniu na otoczenie. Stosowana jest szeroko w wytwórniach okrywy oraz w uprawie pieczarki, do podlewania i dezynfekcji pomieszczeń. Opracowana alternatywna technologia kompleksowej dezynfekcji na bazie ditlenku chloru obejmuje dezynfekcję wody do podlewania oraz dezynfekcję powierzchni pomieszczeń gazowym ditlenkiem chloru. Są to nowatorskie rozwiązania firmy MEXEO z Kędzierzyna-Koźła, które znajdują coraz szersze zastosowanie. Szczegółowe instrukcje,

filmy instruktarzowe i kompleksową informację w tym zakresie można znaleźć w Internecie na stronie inicjatywy Polish Mushroom News [<https://www.p-m-n.pl/technologie>]. Nowym elementem omawianej technologii ochrony pieczarki jest oddziaływanie gazowym ditlenkiem chloru po nałożeniu na półki okrywy z podłożem i zamknięciu bramy hali uprawowej oraz na 4 dni przed szokiem termicznym, wpływając na rozciąganie zawiązków owocników, czyli ograniczanie grupowania się ich w kolonie (tzw. kalafiory) utrudniające zbiór ręczny, a w przyszłości zautomatyzowany. Omawiany aspekt wpływu gazowego ClO_2 na rozciągnięcie zbioru poprzez powierzchniową dezynfekcję okrywy w pierwszej fazie zawiązywania owocników stanowi efekt najnowszych badań W. Hreczucha i znajduje się w fazie potwierdzania w skali produkcyjnej, przed opublikowaniem wyników.

Upowszechnienie stosowania nowej technologii ochrony pieczarki na bazie ditlenku chloru wymaga czasu na oswojenie się użytkowników z nową substancją i urządzeniami aplikacyjnymi. Omawiana technologia ochrony pieczarki jest wynikiem Projektu badawczego zrealizowanego przez firmę innowacyjno-wdrożeniową MEXEO we współpracy z Instytutem Ogrodnictwa w Kędzierzynie-Koźlu w latach 2017–2023 (Projekt badawczy BIO-MEX, nr POIR.01.01.01-00-0829/16-00).

Plony

Postęp technologiczny w pieczarkarstwie pozwolił zwiększyć średnie plony z ok. 26 kg/m^2 uzyskiwanych w pięciu rzutach do $32\text{--}34 \text{ kg/m}^2$ w trzech rzutach [Stefko i Cieślińska 2014, Zmarlicki i Brzozowski 2018, De Cianni 2023, Szumigaj-Tarnowska 2023]. Wynika to ze standaryzacji podłoża, lepszej kontroli mikroklimatu i automatyzacji procesu uprawy. Znaleźć można również doniesienia o rekordowym plonowaniu pieczarek w wysokości $41,6 \text{ kg/m}^2$ [<http://grzyby.grzybnia.pl/component/content/article/7-spis-tresci/3286-rekordowy-plon-416kgm2>].

Kluczowe problemy produkcji podłoża i pieczarki

Stagnacja z tendencją do spadku plonów przy ciągle rosnących kosztach ich uzyskania

Obecna technologia produkcji podłoża w Polsce pozwala na osiąganie średniego plonu na poziomie $32\text{--}34 \text{ kg/m}^2$ w trzech rzutach, z tendencją spadkową w rozrzucie od 28 kg/m^2 do 42 kg/m^2 . Do wzrostu plonowania potrzebne jest opracowanie modelu uprawy pieczarki uwzględniającego elementy składowe technologii uprawy, zależności między nimi i przebieg zmian w czasie plonowania. Podstawą konstrukcji takiego modelu jest następujące stwierdzenie: uprawa pieczarki to kontrolowany proces kompostowania materii organicznej z udziałem samej pieczarki. Proces kompostowania materii organicznej przy stosunku C : N wynoszącym 30 : 1 obejmuje fazę gorącą rozkładu materii przez mikroorganizmy mezo- i termofilne, w tym proces sanityzacji, oraz fazę zimną obejmującą proces humifikacji z udziałem pieczarki.

Pieczarka musi przejść dwie fazy rozwojowe: to jest fazę wegetatywną – kolonizacji kompostu i tworzenia masy grzybni oraz fazę generatywną – wykorzystania masy grzybni do wytworzenia maksymalnej masy zarodników celem dalszego rozmnażania. Obydwa procesy odbywają się w warunkach tlenowych, prowadząc w ostateczności do humifikacji podłoża po uprawie pieczarki. Plon pieczarki zależy od masy grzybni zgromadzonej w substracie/kompoście i stopnia jego wykorzystania w procesie wzrostu owocników. Masa grzybni zbudowanej w kompoście zależy z kolei od dostępu wody i rozpuszczonych w niej form

azotu, mikro- i makroelementów, polisacharydów zawartych w słomie (źródła węgla i glukozy rozkładanej w trakcie zewnętrznego trawienia enzymatycznego przez pieczarkę), a także uwalnianych składników pokarmowych z obumarłej mikroflory po rozpoczęciu kolonizacji kompostu przez grzybnię oraz od przebiegu transferu tych składników do grzybni pieczarki [Griensven 1988]. Transfer i przemiana materii zależą od tzw. aktywności grzybni, warunków panujących po jej wysiewie w kompoście, w tym od temperatury oraz czasu prze-rostu (procesu przemiany i transferu składników) [Sakson 2013]. Masa uzyskiwanych owocników pieczarki zależy więc w dużym stopniu od potencjału/właściwości podłoża, jego kolonizacji i cech okrywy, to jest ilości i masy pojedynczych owocników zbieranych w trakcie owocowania jako efektu sterowania zachowaniem grzybni przez kształtowanie parametrów mikroklimatu w pomieszczeniu uprawowym oraz przebiegu uzupełniania wody w okrywie i podłożu w trakcie całej uprawy.

Jak zwiększyć i ustabilizować plonowanie pieczarki w zmieniających się warunkach pogodowych produkcji i rosnących kosztach uprawy?

Coraz twardsza, trudniejsza do otwarcia i rozwłóknienia słoma zmniejsza dostępność węgla budulcowego oraz wydłużający się okres letnich niesprzyjających warunków klimatycznych zakłócają proces uprawy pieczarki w całorocznym cyklu produkcyjnym. Zakładanym celem technologicznym jest osiągnięcie plonowania pieczarki w trzech rzutach na poziomie 40 kg/m^2 lub odpowiednio od 32 do 34 kg/m^2 w dwóch rzutach. Osiągnięcie wskazanego celu opiera się na następujących założeniach:

- substrat/kompost jest głównym czynnikiem dostępnej rezerwy potrzebnej do plonowania – w tym znaczeniu stabilność i poziom plonowania pieczarki w nowoczesnych systemach uprawowych są ściśle uzależnione od jakości kompostu, którego skład chemiczny, struktura i dojrzałość wyznaczają potencjał plonotwórczy;

- faza mezofilna to kluczowy etap przygotowania kompostu do uprawy pieczarki – faza mezofilna w procesie kompostowania stanowi etap krytyczny dla powstania selektywnego podłoża – to w tym okresie kształtuje się mikrobiologiczna równowaga, ustala stosunek C : N i zachodzi stabilizacja azotu oraz substratów organicznych [Thai i in. 2022].

W celu poprawy efektywności uprawy niezbędne jest podjęcie następujących problemów badawczych:

Problem badawczy nr 1: rozpoznanie, jak przebiega proces mezofilny zapewniający pieczarce maksymalną dostępność węgla i czy/jak można nim sterować tak, aby przebiegał optymalnie, bez utraty koniecznej struktury kompostu, niezależnie od jakości użytej słomy (coraz twardszej, powstającej w warunkach wydłużającego się lata z coraz wyższą temperaturą powietrza i niską temperaturą powietrza zimą).

Faza mezofilna stanowi początkowy etap fazy I kompostowania, przebiegający w zamkniętych bunkrach lub tunelach napowietrzanych w temp. $20\text{--}45^\circ\text{C}$ przez ok. 24–48 h. W tym czasie bakterie mezofilne rozpoczynają rozkład węglowodanów i białek, uwalniając ciepło i przygotowując podłoże do fazy termofilnej. Współcześnie proces ten jest w pełni automatyzowany i kontrolowany komputerowo poprzez pomiar temperatury, tlenu, CO_2 i wilgotności.

Problem badawczy nr 2: czy można standaryzować dostępność węgla i azotu w uprawie pieczarki, modyfikując skład kompostu w momencie wysiewu grzybni poprzez stosowanie dokarmiaczy do kompostu fazy II?

O plonie pieczarki decyduje masa grzybni zawarta w podłożu. Budowanie masy grzybni odbywa się w procesie przemiany i transferu materii w następujących etapach:

– poprzez kolonizację kompostu stanowiącą proces zasiedlania masy organicznej przez mikroorganizmy i substancje, które biorą udział w jej rozkładzie. To kluczowy element skutecznego kompostowania, który wpływa na jakość i tempo produkcji kompostu. Przez właściwą kolonizację w fazie I kompostowania organizmy odpowiedzialne za rozkład materii organicznej pomagają uzyskać produkt stabilny i pełnowartościowy, gotowy do dalszych etapów kompostowania. W badaniach wielośrodkowych wykazano, że rodzaj słomy (pszenna, jęczmienna, ryżowa, kukurydziana) wpływa na produktywność kompostu i plonowanie *Agaricus bisporus* poprzez zmiany w strukturze, porowatości, mikrobiomie i degradacji lignocelulozy – na ogół słoma pszenna wypada najlepiej, zaś jęczmienna, zawierająca tyle samo azotu, częściej wpływa na zmniejszenie plonu. Część mieszanek (np. pszenna + kukurydza) może utrzymać wydajność względem czystej pszennej [Noble i Gaze 1994, Noble i in. 2002, Noble i in. 2009, Randle i Flegg 1985].

– transfer składników odżywczych z kompostu do grzybni piekarki następujący w wyniku procesu II fazy rozkładu słomy i obumarłej masy mikroorganizmów dokonywany poprzez enzymy piekarki. Wykazano, że parametry fazy II (szczególnie temperatura pasteryzacji i stopień kondycjonowania/obniżenia NH_3) istotnie wpływają na tempo i wielkość przyrostu biomasy grzybni w trakcie zaszczepienia substratu: zbyt wysokie reżimy pasteryzacji i pozostałości amoniaku spowalniają wzrost *A. bisporus*, a poprawnie przeprowadzona faza II zwiększa udział frakcji grzybowej i przygotowuje podłoże do efektywnej kolonizacji [Vieira i Pecchia 2018, Carrasco i in. 2020, Thai i in. 2022, Noble i in. 2024].

Wskaźnikiem efektywności dokonanej przemiany nierozpuszczalnych w wodzie składników do przyswajalnych form i ich transferu jest masa grzybni piekarki zbudowana w podłożu fazy III. Długość i zakończenie okresu transferu określa liczba dni od wysiewu grzybni do zakończenia przerostu kompostu przez grzybnie w tunelu przerostowym. Efekt transferu zależy od długości okresu przerostu, cech kompostu, żywotności grzybni, relacji z mikroflorą konkurencyjną i pasożytniczą oraz parametrów – głównie poziomu temperatur w kompoście.

Skuteczność przemiany i transferu składników do biomasy *A. bisporus* najtrafniej odzwierciedla masa grzybni zbudowana w podłożu fazy III, długość i domknięcie tego transferu odpowiada czasowi przerostu w tunelu (zwykle 14–21 dni, często 16–19 dni), a wynik zależy od profilu temperatur (optymalnie ~23–26 °C, powyżej 30°C – niekorzystnie), cech „natury” kompostu, obsady i żywotności szczepionki oraz od mikroflory ukształtowanej po fazie II [Vos i in. 2017, Thai i in. 2022]. Powyższa wiedza o zachodzących przemianach prowadzić będzie do wzrostu możliwości ich kontrolowania na tym etapie i jest kluczowa dla osiągnięcia maksymalnego przyrostu grzybni i wzrostu plonowania.

Problem badawczy nr 3: kiedy kończy się proces transferu składników pokarmowych z kompostu do grzybni piekarki i jak jego długość wpływa na plonowanie?

Długość procesu transferu składników pokarmowych z kompostu do grzybni piekarki może mieć duży wpływ na ostateczny plon. Zbyt krótki lub zbyt długi transfer może prowadzić do niższego plonu oraz gorszej jakości owocników. Optymalny czas transferu, odpowiednia kontrola wilgotności i temperatury oraz składników odżywczych w kompoście są kluczowe do uzyskania wysokiego i zdrowego plonu pieczarek. Odpowiednie badania optymalizacyjne możliwe są tylko w warunkach upraw doświadczalnych w przystosowanych jednostkach badawczych.

Problem badawczy nr 4: jak zawartość azotu i jego przemiany wpływają na wykorzystanie słomy i dostępność polisacharydów w fazie transferu składników pokarmowych z kompostu do grzybni piekarki?

Efektywność wykorzystania substratu przez *A. bisporus* zależy od jakości i stopnia przemiany materii organicznej w procesie kompostowania. Skład i zawartość azotu determinują tempo mineralizacji związków lignocelulozowych oraz dostępność polisacharydów słomy, które stanowią główne źródło węgla dla grzybni. Zbyt wysoka zawartość amoniaku lub niewystarczające kondycjonowanie w fazie II prowadzą do ograniczenia aktywności mikroflory i enzymów, co obniża tempo przerostu i potencjał plonotwórczy kompostu.

Odpowiedni stosunek C : N oraz kontrola przemian azotu (utlenianie NH_3 , synteza aminokwasów) warunkują równoczesne uwalnianie złożonych węglowodanów i ich transfer do grzybni w fazie III. Zrównoważona aktywność biologiczna i właściwa struktura kompostu umożliwiają maksymalną akumulację biomasy grzybni, co w praktyce stanowi wskaźnik skuteczności procesu „transferu składników pokarmowych”.

Odpowiednia kontrola poziomu azotu oraz zapewnienie dostępu do węgla (w formie polisacharydów w słomie) są niezbędne, aby grzybnia pieczarki mogła skutecznie przekształcać materiał organiczny w zdrowe i obfite plony [Griensven 1988, Andrade i in. 2008, Thai i in. 2022, *Optimising nitrogen transformations in mushroom production* 2024]

Problem badawczy nr 5: czy i jak vitalność grzybni i jej wzbudzenie wpływa na okres transferu i zwiększenie konkurencyjności grzybni pieczarki w stosunku do organizmów patogenicznych?

Wzbudzenie grzybni oznacza jej pobudzenie do wytworzenia owocników (grzybów właściwych) po zakończeniu fazy kolonizacji podłoża. Vitalność grzybni pieczarki (mycelial vitality) jest jednym z najważniejszych czynników determinujących skuteczność kolonizacji podłoża i efektywność tzw. transferu składników pokarmowych z kompostu do grzybni. Wysoka aktywność metaboliczna, wyrażona intensywnym wzrostem strzępek i aktywnością enzymów oksydacyjnych (m.in. lakkazy, celulazy), skraca czas przerostu (transferu) i zwiększa selektywność kompostu na korzyść *A. bisporus*.

Z kolei niska vitalność inokulum (spowodowana starzeniem, nieodpowiednim przechowywaniem lub zbyt długim okresem lag phase) prowadzi do spowolnienia kolonizacji, co zwiększa ryzyko rozwoju mikroflory konkurencyjnej, takiej jak *Trichoderma aggressivum* czy *Scopulariopsis fimicola*. Wzbudzenie grzybni poprzez kontrolowane żywienie inokulum (np. aktywacja cieplna, zraszanie wodą lub napowietrzenie w fazie przerostu grzybni) poprawia jej zdolność konkurencyjną i skraca okres potrzebny do całkowitego przerostu kompostu. Właściwa kondycja grzybni, jej aktywacja i zdolność do wzrostu w kompoście są niezbędne, aby grzybnia pieczarki mogła skutecznie kolonizować podłoże, przekształcać materię organiczną w plony oraz bronić się przed patogenami. Wyznaczenie mierzalnych parametrów vitalności grzybni w standaryzowanych warunkach doświadczalnych mogłoby mieć wymierny wpływ na wzrost plonowania.

Problem badawczy nr 6: czy można na podstawie cech podłoża określić rodzaj i dawkę dokarmiaczy po przeroście a przed nałożeniem na półkę?

Cechy podłoża (w tym zawartość azotu, węgla, pH, wilgotność) mają kluczowe znaczenie przy określaniu rodzaju i dawki dokarmiaczy. Stosowanie dokarmiaczy (supplements) jest jednym z najważniejszych elementów współczesnej technologii uprawy pieczarki, pozwalającym na zwiększenie plonów i stabilizację jakości owocników. Dokarmiacze to dodatki pokarmowe o kontrolowanym uwalnianiu zawierające głównie materiały białkowe (mączka sojowa, gluten kukurydziany, śruty roślin oleistych) lub węglowodanowe (otręby, kukurydza) stosowane w fazie kolonizacji kompostu (spawning) albo podczas nakładania okrywy (casing). Ich funkcją jest dostarczenie grzybni *A. bisporus* dodatkowych źródeł

azotu, aminokwasów i węgla, które stymulują aktywność metaboliczną i przyspieszają przerost substratu.

Badania przeprowadzone w Iranie, UK, Hiszpanii i USA wykazały, że suplementacja do okrywy może być równie skuteczna jak suplementacja w kompoście, a przy tym bezpieczniejsza pod względem mikrobiologicznym, ponieważ zmniejsza ryzyko rozwoju konkurencyjnych bakterii i pleśni. Stosowanie preparatów powlekanych, o opóźnionym uwalnianiu składników odżywczych, pozwala ograniczyć niepożądane „przegrzewanie” kompostu i zachować równowagę mikrobiologiczną [Carroll i in. 1976, Mami i in. 2013, Carrasco i in. 2018].

W badaniach Royse’a i współpracowników (USA) udowodniono, że fragmentacja kompostu i suplementacja w fazie II lub tuż po niej może zwiększać wydajność plonowania nawet o 15–20%, a także poprawiać równomierność owocowania [Royse i in. 2010]. Podobne wyniki uzyskano w doświadczeniach Pardo-Giméneza w Hiszpanii [2015], gdzie suplementacja kompostu przy wsiewaniu grzybni zwiększyła plon i biologiczną efektywność (BE) w porównaniu z grupą kontrolną.

W krajach Beneluksu i Europy Zachodniej (Holandia, Belgia) rozwinięto przemysłową produkcję gotowych mieszanek, takich jak ChampFood, które zawierają zbilansowaną kompozycję białek, węglowodanów i lipidów w formie mikrogranul o kontrolowanym rozkładzie. Stosowane są zarówno w podłożach fazy II, jak i przy przygotowaniu fazy III, co pozwala osiągać większą stabilność plonów w cyklach całorocznych [Royse 2010, Mami i in. 2013, Carrasco i in. 2018].

Dokarmianie po przeroście grzybni, a przed nałożeniem na półkę, ma na celu zapewnienie grzybni właściwych składników odżywczych w odpowiednich ilościach i proporcjach, co poprawia wzrost pieczarki, jej odporność na choroby i jakość plonów.

Problem badawczy nr 7: czy można wpływać na proces rekolonizacji podłoża fazy III i żywienia do zakończenia szoku po nałożeniu podłoża na półkę poprzez stosowanie dokarmiaczy?

Literatura wskazuje, że dokarmianie „na okrywie” (top-dressing) oraz resuplementacja kolonizowanego kompostu mogą wspierać rekolonizację fazy III pod okrywą i żywienie grzybni aż do zakończenia „szoku”, przyspieszając inicjację zawiązków i podnosząc plon, o ile stosuje się powlekane, kontrolowane uwalnianie dodatki białkowo-węglowodanowe w dawkach niepowodujących przegrzewania okrywy i podłoża, co potwierdzono w badaniach w Hiszpanii, Meksyku, USA i Indiach [Royse i in. 2008, Coello-Castillo i in. 2009, Royse 2010, Mami i in. 2013, Carrasco i in. 2018, Shanmugaraj i in. 2024].

Stosowanie dokarmiaczy może mieć znaczący wpływ na proces rekolonizacji podłoża w fazie III i na żywienie grzybni do zakończenia szoku po nałożeniu na półkę. Odpowiednie dobranie rodzajów nawozów i ich dawek, w zależności od kondycji podłoża oraz fazy wzrostu grzybni, pozwala na optymalizację rozwoju pieczarki, przyspieszenie procesu kolonizacji, a także poprawę jakości i ilości plonów. Kluczowe jest jednak, by nawożenie było dopasowane do rzeczywistych potrzeb grzybni i podłoża, by uniknąć ryzyka nadmiernego rozwoju grzybni kosztem owocników lub wywołania infekcji patogenicznych. Wyznaczenie konkretnych zależności może mieć wysoką wartość naukową i komercyjną [Carrasco i in. 2018, Beyer 2024].

Problem badawczy nr 8: czy można skrócić okres pasteryzacji i dojrzewania podłoża w celu wydłużenia okresu przerostu?

Nie zaleca się skracania pasteryzacji ani dojrzewania podłoża fazy II/III w celu wydłużenia przerostu – prawidłowy rozwój mikroflory i detoksykacja są kluczowe dla późniejszego, równomiernego owocnikowania [Thai i in. 2022]. Alternatywą jest modyfikacja profilu temperaturowego fazy II (np. dynamiczne sterowanie T i O₂) [Straatsma i in. 2000].

Z punktu widzenia procesu kompostowania w masie proces pasteryzacji wydaje się więc zbędny. Proces karmelizacji jest jednocześnie procesem sanityzacji. Na nowo należy spojrzeć na proces dojrzewania. Proces narastania mikroorganizmów uczestniczących w żywieniu pieczarki obejmuje proces amonifikacji (uwalnianie azotu) oraz dalszy rozwój i namnażanie tej mikroflory. Jak długo proces dojrzewania powinien być prowadzony i czy wpływa on na rozwłóknienie słomy pozostaje kwestią otwartą. Rozkład peptydów łączących włókna jest kolejną kwestią wymagającą badań i optymalizacji. Szersze informacje można znaleźć w pracach Thai i in. [2022] oraz Royse [2010].

Problem badawczy nr 9: czy istnieje zależność pomiędzy ilością i jakością obumarłej mikroflory a przebiegiem i efektywnością rozkładu enzymatycznego w fazie III kompostowania?

W fazie III kompostowania ilość i jakość obumarłej mikroflory są bezpośrednio powiązane z aktywnością enzymatyczną grzybni pieczarki. Umiarkowany poziom martwej biomasy bakterii i grzybów termofilnych zapewnia właściwy poziom dostępnych składników pokarmowych i stymuluje aktywność oksydoredukcyjną *A. bisporus*, natomiast zbyt wysoka lub zbyt niska ilość tej biomasy zaburza tempo kolonizacji i obniża efektywność plonowania.

Faza III kompostowania to etap, w którym kompost przechodzi od intensywnej aktywności mikroorganizmów do stabilizacji, w której dochodzi do spoczynku mikroflory i do właściwego dojrzewania kompostu. To właśnie w tej fazie, po zakończeniu aktywnego rozkładu materii organicznej przez mikroorganizmy, następuje intensyfikacja procesów enzymatycznych, które mają wpływ na jakość i strukturę kompostu. Zatem, im większa jest ilość i jakość obumarłej mikroflory, tym bardziej efektywny staje się rozpad enzymatyczny w fazie III kompostowania, co przekłada się na lepszą stabilność kompostu, wyższą jakość nawozu, a także na lepsze warunki dla późniejszych faz uprawy pieczarek lub innych roślin. Odpowiednie prace badawcze powinny potwierdzić tę zależność i doprowadzić do właściwej kontroli procesów kompostowania w omawianym zakresie.

Problem badawczy nr 10: jakimi cechami powinno charakteryzować się podłoże fazy III, aby osiągało największą efektywność, stopień wykorzystania, uzysk masy pieczarek z jednostki podłoża?

Podłoże fazy III, które pozwala osiągnąć najwyższą efektywność plonowania *A. bisporus*, powinno charakteryzować się stabilną strukturą fizyczną, równowagą mikrobiologiczną i optymalną aktywnością enzymatyczną. Wysoka jakość kompostu — mierzona równowagą C : N, umiarkowaną zawartością amoniaku, odpowiednią wilgotnością i selektywnym mikrobiomem — warunkuje skuteczny transfer składników pokarmowych i szybki rozwój grzybni. Najbardziej wydajne podłoża fazy III wykazują zwiększoną aktywność oksydorektaz (lakkaz, peroksydaz, celulaz), co wskazuje na dynamiczny rozkład lignocelulozy i lepsze uwalnianie węgla strukturalnego. Równie istotna jest równowaga między żywą a martwą mikroflorą, ponieważ obumarłe mikroorganizmy stanowią wtórne źródło azotu i witamin, które stymulują metabolizm grzybni. Badania metagenomiczne i fizjologiczne wykazują, że największą efektywność (biologiczną wydajność

$\geq 120\%$) uzyskuje się przy podłożach o dobrej porowatości, umiarkowanej gęstości, zawartości suchej masy 30–32%, aktywnym mikrobiomie mezofilnym i ustabilizowanym profilu temperaturowym (ok. 25°C).

Problem badawczy nr 11: jak przebiegają procesy żywienia między rzutami II i III, jaki jest w nich udział piekarki oraz mikroflory obecnej w kompoście, w tym *Bacillus* pozostającymi w komensalizmie z piekarką (czyli w specyficznym typie symbiozy między gatunkami, gdzie jeden z gatunków czerpie z tej zależności wyraźne korzyści, nie szkodząc pozostałym)?

W okresie między II a III rzutem podłoże przechodzi wtórną fazę enzymatycznej regeneracji. Aktywność *A. bisporus* i mikroflory (głównie *Bacillus* spp.) prowadzi do ponownej mineralizacji resztkowej materii organicznej, uwolnienia azotu i węgla oraz stabilizacji mikrosrodowiska, co umożliwia efektywny trzeci rzut. Zachowana równowaga komensalna piekarka–mikroflora stanowi klucz do pełnego wykorzystania potencjału podłoża.

Problem badawczy nr 12: jak można wykorzystać podłoże będące biomasa po zbiorze poza wykorzystywaniem do nawożenia w rolnictwie?

Zużyte podłoże piekarskie (SMS) to pełnowartościowa biomasa o dużym potencjale biotechnologicznym. Poza rolnictwem może być wykorzystywane jako surowiec do produkcji energii, biowęgla, biokompozytów, enzymów, bioremediacji oraz nowych cykli upraw. Włączenie SMS w obieg gospodarki cyrkularnej pozwala nie tylko ograniczyć odpady, ale też zwiększyć efektywność całego sektora grzybiarskiego [Aiduang i in. 2020, Ma i in. 2025, Vieira i in. 2025].

Po zbiorze piekarek podłoże może zostać wykorzystane do produkcji okrywy, co ma na celu dalsze wykorzystanie materii organicznej w kompoście, a także zwiększenie efektywności upraw piekarek. Zagadnienie to warto jest uwagi wobec coraz ważniejszych trendów gospodarki obiegu zamkniętego i zrównoważonego rozwoju w kontekście zarządzania odpadami, surowcami i produkcją oraz zasad strategii zarządzania 6R, które pomagają w maksymalnym wykorzystaniu zasobów naturalnych, zmniejszaniu odpadów oraz promowaniu efektywności środowiskowej.

Pozostałości grzybni w podłożu po piekarkach mogą być cennym źródłem substancji aktywnych, takich jak polipeptydy, enzymy czy witamina D i innych, wykorzystywanych w różnych gałęziach przemysłu. Jest to atrakcyjny przedmiot badań interdyscyplinarnych, zgodnych z nowoczesnymi kierunkami rozwoju produktów pochodzenia naturalnego o wysokiej wartości dodanej, np. w farmacji i przemyśle kosmetycznym.

Zagadnienie to warto jest śledzenia i badań z uwagi na istotne znaczenie, a czasami sprzeczne doniesienia literaturowe w omawianym zakresie [Büchner i in. 2021, Liang i in. 2021].

Problem badawczy nr 13: jakie są realne możliwości zastosowania sztucznej inteligencji do sterowania zachowaniem grzybni i plonowania piekarki?

Zastosowanie sztucznej inteligencji obejmuje: ciągłe monitorowanie w czasie rzeczywistym stanu zachowania grzybni, zawiązków i owocników oraz parametrów mikroklimatu i podłoża; uczenie maszynowe o zależnościach między nimi w danym miejscu i czasie; korzystanie z danych historycznych. Dzięki danym zebranych przez sztuczną inteligencję w przyszłości będzie można prognozować wpływ sterowanych parametrów na zachowania i cechy badanych obiektów – zmiany lub ich brak w zakresie mikroklimatu i podłoża oraz przewidywanie przebiegu plonowania i uzyskiwanych plonów. Dotyczy to oceny jakości i ilości plonowania oraz porównania z oczekiwaniami dotyczącymi wielkości produkcji i zamówień na piekarki. Autonomiczny system AI będzie mógł samodzielnie

decydować o wprowadzanych zmianach mikroklimatu oraz wysyłać komunikaty do otoczenia o stanie sterowanych podmiotów/obiektów (hał uprawowych) oraz o przewidywanych zmianach, głównie dotyczących rozpoczęcia szoku termicznego, jego przebiegu, o potencjalnym wiązaniu oraz wzroście związków i owocników lub o potrzebie ich zebrania z półki. Archiwizacja i analiza efektów podejmowanych działań umożliwi wykorzystanie przez AI wiedzy zbieranej w kolejnych cyklach uprawowych.

Sztuczna inteligencja w pieczarkarstwie jest już technologią wdrażaną, nie eksperymentalną. Największy potencjał leży w predykcyjnym sterowaniu klimatem, wczesnym wykrywaniu stresu grzybni, analizie wzrostu i identyfikowanym wystąpieniu cyfrowych bliźniaków pieczarki. Modele AI umożliwiają automatyczne, dynamiczne reagowanie na mikrozmiiany w kompoście i okrywie, co przekłada się na stabilniejsze plonowanie i większą efektywność substratu. Temat ten podejmują następujące opracowania: Barauskas 2022, Rahman 2022, Perera 2024, Albayrak 2025, Badoni 2025, Jacob 2025.

Czas pokaże, czy projekt autonomicznego sterownika zachowania pieczarki wykorzystujący sztuczną inteligencję, zostanie zrealizowany w całości. Zakładać należy jednak, że prowadzone badania przynosić będą stały postęp w tej dziedzinie.

Oczekiwane innowacje w zakresie podłoża i ich wykorzystanie

W zakresie przygotowania podłoża spodziewane są następujące innowacje:

1. Biokomora z pełną kontrolą przebiegu procesu fazy mezofilnej kompostowania, z wykorzystaniem AI do ustalenia proporcji C : N, zapewniająca maksymalizację przyswajalności przez pieczarki składników pokarmowych zawartych w wykorzystywanych surowcach. Jej koncepcja bazuje na integracji czujników środowiskowych (temperatura, wilgotność, CO₂, NH₃, O₂) z modelami sztucznej inteligencji analizującymi w czasie rzeczywistym przebieg procesu mineralizacji i rozkładu materii organicznej. Systemy oparte na uczeniu maszynowym (AI/ML) mogą dynamicznie optymalizować parametry napowietrzania, nawilżania i ogrzewania, by utrzymać równowagę między rozkładem mikrobiologicznym a stabilizacją składników pokarmowych. Dzięki modelom predykcyjnym opartym na sieciach neuronowych (RNN, CNN) możliwe staje się bieżące dostosowywanie proporcji C : N w kompoście do aktywności mikroorganizmów, co zwiększa przyswajalność węgla i azotu przez grzybnie pieczarki.

Badania nad inteligentnym kompostowaniem wskazują, że AI potrafi przewidywać fazy dojrzewania kompostu, kontrolować emisje gazów i określać poziom dojrzałości materiału organicznego na podstawie danych sensorycznych. Z kolei eksperymenty nad fazą mezofilną w kontrolowanych warunkach potwierdzają, że to właśnie w tym etapie zachodzi najbardziej intensywny rozkład łatwo przyswajalnych związków organicznych oraz stabilizacja mikroflory odpowiedzialnej za selektywność podłoża. Włączenie modeli AI do takich procesów umożliwia automatyczne bilansowanie C : N i zarządzanie aktywnością mikroorganizmów w czasie rzeczywistym, co może znacząco poprawić jakość i powtarzalność podłoża dla *A. bisporus* [Rastogi i in. 2020, Temel i in. 2023, Fouguira i in. 2025].

2. Standaryzacja podłoża fazy II kompensującego braki w prawidłowej relacji różnych składników pokarmowych w kompoście fazy I pozwalająca na maksymalne wykorzystanie polisacharydów zawartych w słomie przez grzybnie pieczarki w oparciu o uzyskane wyniki badań procesu fazy mezofilnej, w warunkach pełnej kontroli przebiegu kompostowania.

3. Nowe metody analiz elementów/składników w standaryzacji podłoża.

4. Sparametryzowany przebieg okresu przerostu kompostu zapewniający maksymalne wykorzystanie przez grzybnię zawartych w nim składników pokarmowych oraz maksymalne ograniczenie rozwoju mikroflory termofilnej po załadunku na półkę w fazie regeneracji grzybni.

5. Nowe dokarmiacze i procedury ich stosowania w podłożu fazy III.

6. Interaktywna baza danych i procedur analiz zawierająca listę parametrów kompostu i podłoża oraz procedur ich badań w trakcie produkcji podłoża i po jej zakończeniu.

W efekcie badań mają nastąpić zmiany w technologii produkcji kompostu zapewniające większy potencjał plonowania oraz zmniejszenie, a w przyszłości wyeliminowanie udziału człowieka w procesie podejmowania decyzji technologicznych.

W literaturze coraz częściej pojawiają się koncepcje, iż technologii kompostowania – także w uprawie pieczarki – zmierza w stronę pełnej automatyzacji decyzji technologicznych, sterowanych algorytmami AI. Celem takiego działania jest rozwój podłoży o coraz wyższym potencjale plonowania, które będą optymalizowane przez systemy samouczące się, bez udziału człowieka w podejmowaniu kluczowych ustawień (np. proporcji C : N, tempa napowietrzania, wilgotności) [Temel i in. 2023]. Przykładowo, systemy Internetu Rzeczy (IoT – Internet of Things), czyli sieci połączonych urządzeń wyposażonych w czujniki, moduły komunikacyjne oraz oprogramowanie umożliwiające zbieranie i przesyłanie danych oraz automatyczne reagowanie na ich podstawie, mogą być integrowane z algorytmami RNN (recurrent neural networks – rekurencyjnymi sieciami neuronowymi). Algorytmy te są przystosowane do przetwarzania danych sekwencyjnych, takich jak sygnały czasowe czy zmieniające się parametry mikroklimatu dzięki mechanizmowi zapamiętywania poprzednich kroków sekwencji. Takie połączenie IoT i RNN jest proponowane do automatycznej optymalizacji procesu kompostowania na etapach mezofilnym i termicznym, ponieważ pozwala przewidywać momenty koniecznych interwencji bez potrzeby ręcznej regulacji [Fouguira i in. 2025]. W kontekście upraw grzybów, autorzy koncepcji „metamorphosis of mushroom production” wskazują, że automatyzacja i AI będą coraz bardziej integrowane, co stopniowo ogranicza rolę człowieka w sterowaniu technologicznym [Badoni i Siddiqui 2025].

Nieefektywne sterowanie „zachowaniem” pieczarki

Obecnie sterowanie „zachowaniem” pieczarki opiera się na decyzjach podejmowanych przez osobę nadzorującą, najczęściej technologa, na podstawie obserwacji bezpośrednich oraz oprogramowania i działania sterownika.

Aktualny model przedstawia się następująco: człowiek przeprowadza obserwację uprawy, sprawdzając, czy wygląd i zachowanie grzybni, zawiązków i owocników odpowiadają przyjętemu standardowi. Podstawowym ograniczeniem są zmysły i kwalifikacje człowieka oraz jego motywacja do podejmowania skutecznych działań kontrolnych „zachowania” pieczarki. Minimalny czas potrzebny człowiekowi do wiarygodnego zaobserwowania zmiany w zachowaniu pieczarki wynosi cztery godziny. Im więcej czasu upłyne, tym różnice mogą być lepiej widoczne i łatwiejsze do oceny, dzięki czemu podejmowane decyzje korygujące będą skuteczniejsze.

Do monitorowanych zmiennych i obszarów decyzyjnych należą:

– analiza i ocena relacji mikroklimatu z zachowaniem pieczarki i jej grzybni, które mają zapewnić oczekiwaną zmianę uprawy do czasu kolejnej kontroli zachowania. Podstawę oceny stanowią doświadczenie i ewentualne zalecenia zewnętrzne, a także wiedza,

predyspozycje oraz motywacja osoby obserwującej. Głównym ograniczeniem są zdolności człowieka do analizy wielu parametrów i zależności między nimi. Możliwości poznawcze człowieka pozwalają na efektywne monitorowanie do ok. 4–6 zmiennych jednocześnie, co stanowi racjonalne uzasadnienie dla wdrażania systemów wspomagania decyzji i automatyzacji w sterowaniu procesami, takimi jak uprawa pieczarki czy kontrola kompostowania, złożonymi z setek zmiennych [Halford i in. 2005, Cowan 2010];

- decyzja o dokonywanych na bieżąco zmianach w ustawieniach sterownika w celu dostosowania parametrów do oczekiwanego stanu i „zachowań” grzybni, związków i owocników, np. w zależności od warunków atmosferycznych na zewnątrz hali uprawowej;

- zmiana (lub brak zmiany) parametrów uprawy w kolejnym cyklu produkcyjnym. Podstawową trudnością jest ograniczenie liczby analizowanych jednocześnie parametrów opisujących sytuację oraz konieczność przewidzenia, jak do czasu kolejnego cyklu „zachowa” się pieczarka i jej grzybnia oraz podłoże po wprowadzeniu lub niewprowadzeniu zmian ustawień sterownika. Ocena osoby prowadzącej sterowanie jest mało precyzyjna, gdyż decyzje o skutkach dokonywanych zmian zapadają w warunkach dużej niepewności i zależą od jej intuicji. Zatem podejmowane decyzje niosą duże prawdopodobieństwo błędu, prowadząc do sytuacji, w której „prawidłowe” parametry mikroklimatu nie zapewnią oczekiwanego „zachowania” grzybni i pieczarki.

O zmianach parametrów mikroklimatu decyduje jego sterownik, którego budowa i oprogramowanie pozwalają tylko na utrzymanie mikroklimatu według zadanych parametrów. Nadzór nad jego funkcjonowaniem i reakcją pieczarki ma prowadzący uprawę człowiek. Tę funkcję w przyszłości ma przejąć autonomiczny sterownik wspierany przez sztuczną inteligencję.

Eliminacja torfu z okrywy

W związku z planowanym zakazem eksploatacji torfu w Niemczech [Hirschler i Osterburg 2025], które są głównym jego dostawcą w Unii Europejskiej, ogrodnictwo oraz pieczarkarstwo mają znaleźć zamienniki surowce do produkcji ziem ogrodniczych, w tym okrywy pieczarek [Gruda i in. 2024]. W wielu krajach, m.in. Wielkiej Brytanii, Niemczech i Polsce, prowadzone są prace nad nowymi recepturami. Afirma z Wojnowa (Wielkopolska) opracowała nową recepturę okrywy określanej jako humusowa [zgłoszenie patentowe P.452691], produkowanej bez udziału torfu. W 2025 r. dostępna jest ona już do nabycia w Polsce. Nieopublikowane jeszcze badania prowadzone przez autorów wykazują, że okrywa humusowa wskazuje pozytywny wpływ na zdrowotność upraw oraz jakość i skład owocników pieczarki. Największym zasobem surowca do produkcji okrywy humusowej może być jednak samo podłoże przetwarzane ponownie wraz z okrywą po uprawie pieczarki.

W omawianym obszarze zidentyfikowano następujące problemy badawcze.

Problem badawczy nr 1: jak nowe okrywy beztorfowe wpływają na przebieg uprawy i uzyskane plony pieczarki?

Międzynarodowa literatura naukowa na temat zamienników okrywy torfowej jest dość bogata, jednak nie są znane autorom doniesienia o komercyjnej ofercie okrywy beztorfowej na rynku producentów pieczarek. Nie ma polskiego piśmiennictwa naukowego o badaniach nad nową okrywą beztorfową, natomiast pojawiła się oferta handlowa okrywy humusowej Afirmy z Wojnowa w województwie Wielkopolskim [zgłoszenie patentowe P.452691]. Wytwórnia Afirma deklaruje walory oferowanej okrywy jako konkurencyjnej

do okrywy tradycyjnej pod względem plonowania i jakości owocników. Do czasu wystąpienia na rynku deficytu torfu lub objawienia się ekologicznych preferencji konsumentów wykreowanie zapotrzebowania na ten produkt wymagać będzie czasu i promocji.

Problem badawczy nr 2: opracowanie innowacyjnej technologii wykorzystania podłoża po uprawie pieczarki do produkcji nowej okrywy.

Innowacje i ich wykorzystanie:

- nowe właściwości okrywy posiadającej większe zasoby składników przydatnych w diecie człowieka,

- technologia produkcji okrywy bez torfu z wykorzystaniem podłoża z okrywą po uprawie do jej odnawialnej produkcji w ciągłym recyklingu.

W Europie prowadzony jest intensywny program badań nad okrywą bez torfu i materiałami alternatywnymi (włókno z kokosa, kora drzewna, włókna drzewne, ścinki z kory, recyklingowane frakcje SMS – spent mushroom substrate), prowadzony m.in. przez Teagasc (Irlandia) oraz zespoły w Hiszpanii i Holandii. Aktualne przeglądy systematyczne podkreślają, że zamienniki torfu mogą ograniczyć negatywny wpływ na środowisko i po odpowiednim kondycjonowaniu i blendowaniu utrzymać parametry jakości handlowej pieczarki (barwa, gładkość kapelusza). Pierwszym produktem sprzedawanym komercyjnie jest miks beztorfowy dla *A. bisporus* o roboczej nazwie „okrywa humusowa”, opatentowany i wytwarzany przez wytwórnię Afirma z Wielkopolski [zgłoszenie patentowe P.452691].

Badania eksperymentalne z Irlandii i Szwajcarii wskazują na potencjał kory (np. ze świerku sitkajskiego *Picea sitchensis*) i innych mieszanek o zredukowanej ilości torfu lub bez niego (peat-reduced/peat-free) jako okrywy, przy zachowaniu struktury, pojemności wodnej i porowatości wymaganych przez pieczarkę [Hirschler i Osterburg 2025, ZHAW 2025]. Z kolei prace hiszpańskie dowodzą możliwości częściowego zastąpienia torfu np. przez korę, włókna drzewne oraz recyklingowaną okrywę, przy czym dawka, obróbka (wypłukiwanie soli, higienizacja) i skład mieszanek są kluczowe dla plonu i jakości [Pardo 2004]. Raport branżowy ISMS potwierdza podjęcie testów europejskich i istniejące wyzwania standaryzacji [Noble i in. 2023]. Analizy LCA (WUR/Europa) opisują, że przejście na materiały beztorfowe może przynieść korzyści środowiskowe, jeśli zapewni się ich stabilną jakość i łańcuch dostaw [Hirschler 2022, Goglio 2025.]. Jednak jak dotąd tylko w Polsce opatentowano, przebadano pod kątem produkcyjnym z pozytywnym skutkiem i udostępniono otwartą rynkowo ofertę beztorfowej okrywy humusowej. Nowa koncepcja wykorzystania do produkcji okrywy beztorfowej zużytego podłoża fazy III, jako materiału recyklingowanego wraz z utylizowaną okrywą, jest godna podjęcia w odrębnym opracowaniu naukowym.

Uprawa bez pestycydów

Czy można uprawiać pieczarkę bez pestycydów w kategorii środków ochrony roślin? Odpowiedź brzmi: tak. Innowacyjna metoda ochrony pieczarki jest oparta na preparatach dezynfekujących na bazie ditlenku chloru w systemie BIOMEX, obejmującym dezynfekcję wody do podlewania oraz technologię dezynfekcji powierzchni i powietrza gazowym ditlenkiem chloru, w tym w obecności materiału biologicznego (okrywy i podłoża), po nałożeniu na półki i zamknięciu bram hali uprawowej oraz przed szokiem termicznym. Ditlenek chloru jest jedyną znaną nietoksyczną substancją biobójczą stosowaną w formie gazu, która po zadziałaniu ulatnia się całkowicie z powierzchni. Rozpuszczalny w wodzie

ClO_2 może być również stosowany w roztworach wodnych, nadal pozostając gazem. Opracowanie, opanowanie i zastosowanie w Polsce oryginalnej technologii dezynfekcji gazowej z wykorzystaniem ditlenku chloru jest nowością w skali światowej. Jest to tańsza, skuteczniejsza, uniwersalna i bardziej ekologiczna alternatywa dla stosowanych dotąd metod dezynfekcji termicznej oraz chemicznej. Jest ona użyteczna w technologii uprawy pieczarek, produkcji podłoża i okrywy (Projekt badawczy BIOMEX, nr POIR.01.01.01-00-0829/16-00, <https://www.p-m-n.pl/technologie>). W ramach projektu badawczego BIOMEX opracowano również szereg innowacyjnych preparatów z udziałem ditlenku chloru w serii AR-MEX i urządzeń aplikacyjnych, w tym generatorów gazowego ClO_2 serii MEX-5, autonomicznej stacji uzdatniania i nadzoru jakości wody technologicznej pod nazwą PLEASE ClO_2 oraz innych opatentowanych metod wytwarzania, w tym bioselektywnej okrywy do uprawy pieczarek [zgłoszenie patentowe P.438706] oraz kalibracji stosowanych metod analitycznych oznaczania ditlenku chloru w fazie gazowej [zgłoszenie patentowe P.450644].

Zidentyfikowane problemy badawcze w omawianym zakresie obejmują:

Problem badawczy nr 1: jak nowe technologie dezynfekcji na bazie ditlenku chloru aplikowane w trakcie uprawy wpływają na proces rozwoju grzybni i owocników pieczarki? Czy można w ten sposób sterować rozciągnięciem zawiązków?

Problem badawczy nr 2: czy preparaty dezynfekcyjne na bazie ditlenku chloru mogą być stosowane skutecznie i bezpiecznie w zapobieganiu i infekcjach wirusowych, np. wobec wirusa X?

Problem badawczy nr 3: jakimi procedurami z wykorzystaniem AI można identyfikować ogniska chorób w początkowej fazie infekcji?

W wyniku przeprowadzonych badań mogą zostać opracowane innowacje, które przyczynią się do stworzenia nowego środowiska uprawy skutecznie hamującego rozwój chorób pieczarki.

Zbiór i brak pracowników do zbioru

Podstawowym problemem jest ciągle konieczność wyeliminowania ręcznego przerzedzania nadmiernej ilości zawiązanych owocników. Wiąże się to z istotnym nakładem pracy, który jest nieadekwatny do ilości pozyskiwanych owocników, a także niezbędną umiejętnością oceny, które owocniki należy usunąć. To kluczowe wyzwanie dla przyszłego zbioru zautomatyzowanego. Wiązanie bez konieczności regulowania ilościowego w pierwszym rzucie jest możliwe. Potwierdza to przykład z uprawy pieczarki np. w pieczarkarni Chełkowski w Grodzisku Wielkopolskim. Wiązanie bez ręcznego przygotowania ma w tym przypadku charakter stały i powtarzalny. Zanim zautomatyzowany zbiór będzie rozwiązaniem powszechnie stosowanym, konieczne jest rozpoznanie możliwości kontrolowania przebiegu wiązania w inny sposób i opracowanie odpowiedniej technologii.

Problemy badawcze i rozwojowe do rozwiązania:

Problem badawczy nr 1: jaka jest zależność zachowania grzybni w fazie rozpoczęcia wiązania oraz wzrostu owocników od parametrów mikroklimatu i aktywności podłoża w warunkach pełnej ich kontroli oraz skanowania ich „zachowania” z wykorzystaniem sztucznej inteligencji (pozwalającej na wiązanie owocników zapewniające możliwość prowadzenia zbioru za pomocą robotów)?

Problem badawczy nr 2: jaki jest przebieg procesów dominacji zawiązków i owocników poszczególnych generacji w warunkach pełnej ich kontroli i skanowania?

Problem badawczy nr 3: skonstruowanie autonomicznej platformy do dwuręcznego zbioru z systemem realizacji zamówień i przewidywanych plonów. Poprawa wydajności i jakości zbioru piekarki poprzez wykorzystanie dostępnego już systemu skanowania półki do zbioru.

W literaturze poświęconej technologii automatyzacji zbioru piekarek pojawiają się liczne doniesienia o systemach wykorzystujących wizję komputerową i skanowanie półki w celu identyfikacji grzybów wymagających zbioru, oszacowania ich dojrzałości oraz wspomagania decyzji zbiorczych. Takie systemy mogą pomóc zoptymalizować moment zrywania, ograniczyć uszkodzenia kapeluszy i poprawić wydajność operacyjną. Przykładowo Mavridis i współpracownicy [2023] zaproponowali układ robotyczny z systemem skanowania wizualnego półki (actuated scanning vision system) z użyciem kamery RGB-D i algorytmu YOLOv5 do detekcji i klasyfikacji wielkości grzybów w realnym środowisku uprawowym. Dutt i Choi [2024] opisują system wizyjny do detekcji i oceny dojrzałości piekarek (na półce) przy użyciu obrazów głębi i modeli (SVM/YOLOv8), osiągając wysoką skuteczność klasyfikacji dojrzałych grzybów ($\approx 95\%$). W artykule przeglądowym Koirala i in. [2024] omawiają stan technologii robotycznego zbioru piekarek, w tym komponenty wizji i mechanizmy manipulacyjne, jako kluczowe elementy przyszłych systemów skanujących półki do zbioru. Takie rozwiązania – technicznie już częściowo dostępne – dają szansę na poprawę efektywności zbioru bez zwiększania nakładów pracy ręcznej, dzięki automatycznemu wspomaganiu decyzji zbiorczych na podstawie analizy obrazu i pozycji grzybów.

Problem badawczy nr 4: ocena przydatności oferowanych na rynku robotów do zbioru i wybór ich typu do polskich warunków uprawy.

W wyniku prowadzonych badań może zostać wprowadzony zbiór hybrydowy, a także planowanie zbiorów i asortymentu zbieranych owocników potrzebnych do realizacji zamówień, a finalnie zbiór przeprowadzany przez roboty.

WNIOSKI

W dłuższej perspektywie należy wskazać, jak rozwijać uprawę wobec oczekiwań związanych z ideą rolnictwa zrównoważonego, z minimalizacją zużycia wody i śladu węglowego. Odrębnym zagadnieniem jest pytanie o sensowność rozwoju alternatywnych technologii pozyskiwania z piekarki składników pokarmowych i leczniczych. Jest to kwestia rentowności. Przykładem może być np. naświetlanie piekarki światłem UV-B jako skuteczny sposób istotnego zwiększenia zawartości witaminy D₂. Dalsze prace koncentrują się na standaryzacji procesu (dawka promieniowania UV i czas naświetlania, pozycjonowanie), trwałości D₂ po obróbce i przechowywaniu, kontroli izomerów (D₄) oraz integracji systemów in-line w przemyśle zgodnie z wymaganiami EFSA dla „nowej żywności” (novel food) [Kristensen i in. 2012, Cardwell i in. 2018, Sommer i in. 2024].

Interesujące są również badania nad produkcją i bezpośrednim wykorzystaniem samej grzybni piekarki np. jako źródła materiału opakowaniowego. Przeglądy materiałoznawcze potwierdzają, że materiały kompozytowe na bazie grzybni (mycelium-based composites, MBC) – w tym grzybni *A. bisporus* – mogą dać formowane, lekkie i biodegradowalne elementy opakowań przy niższym śladzie środowiskowym [Pérez-Bassart i in. 2023, Wattanavichian i in. 2025]. Badania nad grzybnią *A. bisporus* obejmują również jej wykorzystanie

bezpośrednio do produkcji żywności funkcjonalnej/ alternatywnego białka (uprawa zanużeniowa, wysoka zawartość białka/ polisacharydów) [Maseko i in. 2025, Kim i in. 2011].

Polska od lat pozostaje światowym liderem w eksporcie pieczarki. Jednak sektor ten staje obecnie przed poważnymi wyzwaniami technologicznymi, środowiskowymi i organizacyjnymi. Artykuł przedstawia przegląd głównych problemów ograniczających dalszy rozwój branży, w tym stagnację technologiczną, brak kadr, rosnące koszty energii, wycofywanie torfu oraz niedostateczne wsparcie instytucjonalne. Autorzy identyfikują kluczowe kierunki badań i innowacji, takie jak: optymalizacja procesów kompostowania, wykorzystanie sztucznej inteligencji do sterowania uprawą, rozwój podłoży zamiennych dla torfu, automatyzacja zbiorów oraz produkcja bez użycia pestycydów. Artykuł wskazuje także na potrzebę konsolidacji środowiska pieczarkarskiego oraz budowy nowoczesnej infrastruktury badawczo-rozwojowej, stanowiącej warunek utrzymania konkurencyjności polskiego pieczarkarstwa w skali globalnej.

PIŚMIENNICTWO

- Agro-Projects, 2025. Nowoczesne pieczarkarnie od A do Z. https://www.agro-projects.eu/oferta/przemysl-grzybowy/pieczarkarnia-od-a-do-z/?utm_source=chatgpt.com [dostęp: 23.11.2025].
- Aiduang W., Jatuwong K., Kiatsirirot T. i in., 2020. Spent mushroom substrate-derived biochar and its applications in modern agricultural systems: an extensive overview. *J. Environ. Manag.* 270, 110785. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110785>
- Albayrak U., Golcuk A., Aktas S., Coruh U., Tasdemir S., Baykan O. K., Classification and analysis of *Agaricus bisporus* diseases with pre-trained deep learning models 2025. *Agronomy* 15(1), 226. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010226>
- Andrade M.C.N., Zied D.C., Almeida Minhoni M.T. i in., 2008. Yield of four *Agaricus bisporus* strains in three compost formulations and chemical composition analyses of the mushrooms. *Braz. J. Microbiol.* 39(3), 593–598. <https://doi.org/10.1590/S1517-838220080003000034>
- Badoni P., Siddiqui S.A., 2025. Metamorphosis of mushroom production from tradition to automation. *Discov. Appl. Sci.* 7, 974. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07517-w>
- Barauskas R., Kriščiūnas A., Čalnerytė D., Pilipavičius P., Fyleris T., Daniulaitis V., Mikalauskis R., 2022. Approach of AI-based automatic climate control in white button mushroom growing hall. *Agriculture* 12(11), 1921. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111921>
- Beyer D.M., 2023a. Growing mushrooms – microbial activity in substrate, <https://extension.psu.edu/growing-mushrooms-microbial-activity-in-substrate/> [dostęp: 23.11.2025].
- Beyer D.M., 2023b. Seeding substrate and management of growing *Agaricus bisporus*, <https://extension.psu.edu/seeding-substrate-and-management-of-growing-agaricus-bisporus> [dostęp: 23.11.2025].
- Beyer D.M., 2024. Basic procedures for agaricus mushroom growing, <https://extension.psu.edu/basic-procedures-for-agaricus-mushroom-growing> [dostęp: 23.11.2025].
- Büchner R., Vörös M., Allaga H. i in., 2021. Selection and characterization of a *Bacillus* strain for potential application in industrial production of white button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Agronomy* 12(2), 467. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020467>
- Cardwell G., Bornman J.F., James A.P. i in., 2018. A review of mushrooms as a potential source of dietary vitamin D. *Nutrients* 10(10), 1498. <https://doi.org/10.3390/nu10101498>.

- Carrasco J., García-Delgado C., Lavega R. i in., 2020. Holistic assessment of the microbiome dynamics in the substrates used for commercial champignon (*Agaricus bisporus*) cultivation. *Microb. Biotechnol.* 13, 1225–1239. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13639>
- Carrasco J., Zied D.C., Pardo J.E. i in., 2018. Supplementation in mushroom crops and its impact on yield and quality. *AMB Expr* 8, 146. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0678-0>
- Carroll, A.D., Schisler L.C. Jr, 1976. Delayed release nutrients for mushroom culture. Pat. US3942969A, <https://patents.google.com/patent/US3942969A/en> [dostęp: 23.11.2025].
- Chong J.L., Chew K.W., Peter A.P. i in., 2023. Internet of things (IoT)-based environmental monitoring and control system for home-based mushroom cultivation. *Biosensors* 13, 98. <https://doi.org/10.3390/bios13010098>
- CMGA, 2005. Best environmental management practices for mushroom growers in Canada. https://www.canadianmushroom.com/uploads/userfiles/files/Best_Practices_Guide.pdf [dostęp: 23.11.2025].
- Coello-Castillo M.M., Sánchez J.E., Royse D.J., 2009. Production of *Agaricus bisporus* on substrates pre-colonized by *Scytalidium thermophilum* and supplemented at casing with protein-rich supplements. *Biores. Techn.* 100(19), 4488–4492. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.061>
- Cowan N., 2010. The magical mystery four: how is working memory capacity limited, and why?. *Curr. Directions Psychol. Sci.* 19(1), 51–57. <https://doi.org/10.1177/0963721409359277>
- Dajewski D., 2022. Why is mushroom growing in the US and Europe different?. *New Food Magazine*, 20 maja 2022. <https://www.newfoodmagazine.com/article/165063/why-is-mushroom-growing-in-the-us-and-europe-different/> [dostęp: 23.11.2025].
- Dawadi E., Magar P.B., Bhandari S. i in., 2022. Nutritional and post-harvest quality preservation of mushrooms: A review. *Heliyon* 8(12), e12093. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12093>
- De Cianni R., Varese G. C., Mancuso T., 2023. A further step toward sustainable development: the case of the edible mushroom supply chain. *Foods* 12(18), 3433. <https://doi.org/10.3390/foods12183433>
- Dey B., Ador M.A.H., Haque M.M.U. i in., 2024. Strategic insights for sustainable growth of mushroom farming industry in Bangladesh. A comprehensive evaluation using SWOT-AHP and TOPSIS frameworks. *Heliyon* 10(17), e36956. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36956>
- Dias E.S., Zied D.C., Pardo-Gimenez A., 2021. Revisiting the casing layer. Casing materials and management in *Agaricus* mushroom cultivation. *Ciênc. Agrotec.* 45, e0001R21. <https://doi.org/10.1590/1413-70542021450001r21>
- Dissemond M.H., Franken ChE., Sari M., 2025. *Agaricus bisporus* grown on sustainable peat casing alternatives. *Foods* 14(19), 3348. <https://doi.org/10.3390/foods14193348>
- Dutt N., Choi D., 2024. A computer vision system for mushroom detection and maturity estimation using depth images. In: 2024 ASABE Annual International Meeting, 2400774. <https://doi.org/10.13031/aim.202400774>
- European Commission, 2022. Green deal: pioneering proposals to restore Europe's nature by 2050. https://ec.europa.eu/newsroom/europe_direct/items/751582/ [dostęp: 23.11.2025]
- European Mushrooms the hidden gem, 2024. <https://mushroombusiness.com/news/the-hidden-gem-on-track/#:~:text=In%202023%2C%20the%20GEPC%20%28European%20Association%20of%20Mushrooms,Germany%2C%20Hungary%2C%20Ireland%2C%20Italy%2C%20The%20Netherlands%2C%20Poland%2C%20Spain> [dostęp: 23.11.2025].
- Fouguira S., Ammar E., Haji M.E. i in., 2025. Internet of things and predictive artificial intelligence for smartcomposting process in the context of circular economy. *Eng. Proc.* 97(1), 16. <https://doi.org/10.3390/engproc2025097016>
- Gapiński M., Woźniak W., 1999. *Pieczarka. Technologia uprawy i przetwarzania*. PWRiL, Poznań.

- Gernon D., 2024. The very nature of mushroom picking is difficult to automate. FreshPlaza – North America, 11 lipca 2024. <https://www.freshplaza.com/north-america/article/9643046/the-very-nature-of-mushroom-picking-is-difficult-to-automate-as-they-grow-sporadically-in-clusters-and-are-very-sensitive/> [dostęp: 23.11.2025].
- Goglio P., Ponsioen T., Carrasco J. i in., 2024. An environmental assessment of *Agaricus bisporus* ((J.E.Lange) Imbach) mushroom production systems across Europe. Eur. J. Agron. 155, 127108. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127108>
- Goglio P., Ponsioen T., Carrasco J. i in., 2025. Environmental impact of peat alternatives in growing media for European mushroom production. Sci. Total Env. 964, 178624. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178624>
- Griensven L.J.L.D. (red.), 1988. The cultivation of mushrooms, tłum. Interlingua T.T.I. Ltd. Darlington Mushroom Laboratories, Rustington. <https://archive.org/details/cultivationof-mus0000unse> [dostęp: 23.11.2025].
- Griensven L.J.L.D. van, 1982. Proefstation voor de champignoncultuur. <https://research.wur.nl/en/publications/proefstation-voor-de-champignoncultuur/> [dostęp: 23.11.2025].
- Gruda N.S., Hirschler O., Stuart J., 2024. Peat reduction in horticulture – an overview of Europe. ISHS Acta Hortic. 1391, IX South-Eastern Europe Symposium on Vegetables and Potatoes. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1391.75>
- Halford G.S., Baker R., McCredde J.E. i in., 2005. How many variables can humans process?. Psychol. Sci. 16(1), 70–76. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2005.00782.x>
- He L., Mahnan S., Pecchia J., 2025. Overview of button mushroom harvesting technologies. <https://extension.psu.edu/overview-of-button-mushroom-harvesting-technologies/> [dostęp: 23.11.2025]
- Hirschler O., Osterburg B., 2025. Achieving peat-free hobby gardening for climate mitigation in Germany. Insights into prices of growing media constituents, potting soils and policy options. Res. Conserv. Recycl. 220, 108330. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108330>
- Hirschler O., Osterburg B., Weimar H. i in., 2022. Peat replacement in horticultural growing media. Availability of bio-based alternative materials. Thünen Working Pap. 190. <https://doi.org/10.3220/WP1648727744000>
- <http://grzyby.grzybnia.pl/component/content/article/7-spis-tresci/3286-rekordowy-plon-416kgm2> [dostęp: 23.11.2025].
- <https://hajduk.pl/podloze-do-pieczarek/> [dostęp: 23.11.2025].
- <https://umdis.org/labour-accounts-for-44-of-the-total-production-cost/> [dostęp: 23.11.2025]
- <https://umdis.org/what-are-the-main-challenges-of-the-cultivated-mushroom-industry-in-2024/> [dostęp: 23.11.2025].
- <https://www.farmer.pl/fakty/polska-pie-polska-najwiekszym-w-europie-producentem-pieczarek,92897.html> [dostęp: 23.11.2025].
- <https://www.opportimes.com/en/poland-consolidates-its-position-as-the-largest-exporter-of-mushrooms-in-the-world/> [dostęp: 23.11.2025].
- <https://www.p-m-n.pl/technologie/> [dostęp: 23.11.2025].
- https://www.sadyogrody.pl/warzywa/102-pieczarkarnia_na_skraju_bankructwa_lokalna_firma_apeluje_o_wsparcie,49148.html [dostęp: 23.11.2025].
- Huang M., He L., Choi D. i in., 2021. Picking dynamic analysis for robotic harvesting of *Agaricus bisporus* mushrooms. Comput. Electron. Agric. 185, 106145. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106145>
- Humfeld H., 1948. The production of mushroom mycelium (*Agaricus campestris*) in submerged culture. Science 107(2780), 373. <https://doi.org/10.1126/science.107.2780.373>
- Jacob M.S., Xu A., Qian K. i in., 2025. Artificial intelligence in edible mushroom cultivation. J. Fungi 11(11), 758. <https://doi.org/10.3390/jof11110758>

- Kavaliauskas Ž., Šajev I., Gecevičius G. i in., 2022. Intelligent control of mushroom growing conditions using an electronic system for monitoring and maintaining environmental parameters. *Appl. Sci.* 12(24), 13040. <https://doi.org/10.3390/app122413040>
- Kim K., Choi B., Lee I. i in., 2011. Bioproduction of mushroom mycelium of *Agaricus bisporus* by commercial submerged fermentation for the production of meat analogue. *J. Sci. Food Agric.* 91(9), 1561–1568. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4348>
- Koirala B., Zakeri A., Kang J. i in., 2024. Robotic button mushroom harvesting systems. A review of design, mechanism, and future directions. *Appl. Sci.* 14(20), 9229. <https://doi.org/10.3390/app14209229>
- Kristensen H.L., Rosenqvist E., Edlund A., 2012. Increase of vitamin D₂ by UV-B exposure during the growth and postharvest handling of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Food Nutr. Res.* 56, 7114. <https://doi.org/10.3402/fnr.v56i0.7114>
- Leithäuser H., Kirschner R., Tsai M.J., 2025. Exploring mushroom cultivation under the 13 principles of the agroecological transition. A review. *J. Sust. For.* 44(7), 679–712. <https://doi.org/10.1080/10549811.2025.2532823>
- Liang X., Wang Y., Zhang Y. i in., 2021. Viral abundance, community structure and correlation with bacterial community in soils of different cover plants. *Appl. Soil Ecol.* 168, 104138. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104138>
- Ma X., Yan S., Wang M., 2025. Spent mushroom substrate. A review on present and future of green applications. *J. Environ. Manag.* 373, 123970. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123970>
- Mami, Y., Peyvast G., Ghasemnezhad M. i in., 2013. Supplementation at casing to improve yield and quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Agric. Sci.* 4(1), 27–33. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2013.41005>
- Maseko K.H., Regnier T., Bartels P. i in., 2025. Mushroom mycelia as sustainable alternative proteins for the production of hybrid cell-cultured meat. A review. *J. Food Sci.* 90(2), e70060 <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70060>
- Mavridis P., Mavrikis N., Mastrogeorgiou A. i in., 2023. Low-cost, accurate robotic harvesting system for existing mushroom farms. 2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Seattle, 144–149. <https://doi.org/10.1109/AIM46323.2023.10196219>
- Mushroom cultivation in 2025: situation, challenges and prospects in Italy and Europe, 2025. FreshPlaza Europe, <https://www.freshplaza.com/europe/article/9694920/mushroom-cultivation-in-2025-situation-challenges-and-prospects-in-italy-and-europe/> [dostęp: 23.11.2025].
- Navarro M.J., Carrasco J., Gea F.J., 2021. The role of water content in the casing layer for mushroom crop production and the occurrence of fungal diseases. *Agronomy* 11(10), 2063. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102063>
- Noble R., Gaze R.H., 1994. Controlled environment composting for mushroom cultivation. Substrates based on wheat and barley straw and deep-litter poultry manure. *J. Agric. Sci.* 123(1), 71–79. <https://doi.org/10.1017/S0021859600067794>
- Noble R., Gaze R.H., 2009. Controlled environment composting for mushroom cultivation: substrates based on wheat and barley straw and deep-litter poultry manure. Cambridge University Press, https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/abs/controlled-environment-composting-for-mushroom-cultivation-substrates-based-on-wheat-and-barley-straw-and-deep-litter-poultry-manure/543E6FD83BF5DB426F4AD895A38D2108?utm_source=chatgpt.com [dostęp: 23.11.2025].
- Noble R., Grogan H., Corbett E. i in., 2023. The future of casing. Review of casing materials and availability of peat for mushroom cultivation, https://isms.biz/common/Uploaded%20files/AMGA%20Future%20of%20Casing%20Report_FINAL_V1.2.pdf [dostęp: 23.11.2025].

- Noble R., Hobbs P.J., Mead A., 2002. Influence of straw types and nitrogen sources on mushroom composting emissions and compost productivity. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 29(3), 99–110. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000292>
- Noble, R., Thai M., Kertesz M.A., 2024. Nitrogen balance and supply in Australasian mushroom composts. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 19(108), 151. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12933-2>
- O'Connor S., 2024. 4AG Robotics claim to have production-ready harvesting robot. UMDIS Mushroom Information Agency – News, Technology. <https://umdis.org/4ag-robotics-claim-to-have-production-ready-harvesting-robot/> [dostęp: 23.11.2025]
- Okuda Y., 2022. Sustainability perspectives for future continuity of mushroom production. The bright and dark sides. *Front. Sust. Food Sys.* 6, 1026508. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1026508>
- Optimising nitrogen transformations in mushroom production, 2024. Final Report. MU17004. Hort Innovation Australia, Sydney. <https://www.horticulture.com.au/globalassets/laserfiche/assets/project-reports/mu17004/mu17004-final-report.pdf> [dostęp: 23.11.2025].
- Pardo A., de Juan A.J., Pardo J., 2004. Assessment of different casing materials for use as peat alternatives in mushroom cultivation. Evaluation of quantitative and qualitative production parameters. *Spanish J. Agric. Res.* 2(2), 267–272. <https://doi.org/10.5424/sjar/2004022-80>
- Pardo-Giménez A., Catalán L. Carrasco J. i in., 2015. Effect of supplementing crop substrate with defatted pistachio meal on *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* production. *J. Sci. Food Agric.* 96(11), 3838–3845. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7579>
- Perera K., Packeeran R., Suriyabandara Y. i in. 2024. Button mushroom farming using machine learning. *Proc. Comp. Sci.* 235, 1742–1751. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.165>
- Pérez-Bassart Z., Reyes A., Martínez-Abad A. i in., 2023. Feasibility of *Agaricus bisporus* waste biomass to develop bio-based and biodegradable films. *Food Hydrocolloids* 142, 108861. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108861>
- Pudelko K., 2015. Studia nad produkcją kompostu i jego wpływ na plon *Agaricus bisporus* (Lange) Imbach. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.
- Rahman H., Omar F., Bin Abdul Hai T. i in., 2022. IoT enabled mushroom farm automation with Machine Learning to classify toxic mushrooms in Bangladesh. *J. Agric. Food Res.* 7, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100267>
- Randle P.E., Flegg P.B., 1985. The effect of duration of composting on compost density and the yield of mushrooms. *Sci. Hortic.* 27(1–2), 21–31. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(85\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0304-4238(85)90051-2)
- Rastogi M., Nandal M., Khosla B., 2020. Microbes as vital additives for solid waste composting. *Heliyon* 6(2), e03343. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03343>
- Rathore H., Prasad S., Kapri M. i in., 2019. Medicinal importance of mushroom mycelium. Mechanisms and applications. *J. Functional Foods* 56, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.03.016>
- Royse D.J., 2010. Effects of fragmentation, supplementation and the addition of water during phase II on mushroom yield. *Biores. Technol.* 101(1), 188–192. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.073>
- Royse D.J., Sánchez J.E., Beelman R. i in., 2008. Re-supplementing and re-casing mushroom (*Agaricus bisporus*) compost for a second crop. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 24(3), 319–325. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9473-9>
- Sakson N., 2004. Pieczarka. Uprawa intensywna. PWRiL, Poznań.
- Sakson N., 2007. Produkcja podłoża do uprawy pieczarek. PWRiL, Poznań.
- Sakson N., 2008. Produkcja pieczarki na podłożu fazy III. PWRiL, Poznań.
- Sakson N., 2009. Zielone pleśnie w uprawie pieczarki. PWRiL, Poznań.

- Sakson N., 2012. Nowa ochrona pieczarki. PWRiL, Poznań.
- Sakson N., 2013. Pieczarka. Uprawa intensywna, wyd. 2 popr. i uzupełn. PWRiL, Poznań
- Sangeeta, Sharma D., Ramniwas S. i in., 2024. Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. Food Chem. 10(23), 101774. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>
- Shanmugaraj C., Saranraj K., Biswas M.K., 2024. Effect of organic supplements with casing mixture on the biological efficacy of *Agaricus bisporus* under the agro-ecological condition of west Bengal. J. Mycopathol. Res. 62(3), 647–652. <https://doi.org/10.57023/JMycR.62.3.2024.647>
- Shin H.J., Ro, H.S., Kawauchi M.Y. i in., 2025. Review on mushroom mycelium-based products and their production process: from upstream to downstream. Biores. Bioproc. 12(3), 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00836-7>
- Singh M., Kamal S., Sharma V.P., 2020. Status and trends in world mushroom production–III: World production of different mushroom species in the 21st century. Mushroom Res. 29(2), 75–111. <https://doi.org/10.36036/MR.29.2.2020.113703>
- Siwulski M., Sas-Golak I. (red.), 2014. Pieczarka *Agaricus*. Gatunki, uprawa, właściwości prozdrowotne. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.
- Siwulski M., Sobieralski K., 2004. Uprawa grzybów jadalnych i leczniczych w warunkach naturalnych. Kurpisz, Poznań.
- Sommer K., Hillinger M., Vetter W., 2024. Previtamin D₂, vitamin D₂, and vitamin D₄ amounts in different mushroom species irradiated with ultraviolet (UV) light and occurrence of structurally related photoproducts. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 126(10), 2300181. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202300181>
- Stefko O., Ciesielska B., 2014. Szanse i zagrożenia dla rozwoju produkcji pieczarek w Polsce. Rocz. Nauk. Ekon. Rol. Rozw. Obsz. Wiej. 101(3), 180–187. <https://doi.org/10.22630/RNR.2014.101.3.45>
- Straatsma G., Gerrits J.P.G., Thissen J. i in., 2000. Adjustment of the composting process for mushroom cultivation based on initial substrate composition. Biores. Technol. 72(1), 67–74. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00088-7)
- Szudyga K., 2005. Uprawa pieczarki. Hortpress, Warszawa.
- Szumigaj-Tarnowska J., 2023. Metodyka ekologicznej uprawy pieczarki. Instytut Ogrodnictwa – PIB, Skierniewice. https://www.inhort.pl/wp-content/uploads/2024/01/7.2_metodyka_PIE-CZARKA.pdf [dostęp: 23.11.2025].
- Temel F.A., Akyol E., Goktas M., 2023. Artificial intelligence and machine learning approaches in composting process. A review. Biores. Technol. 370, 128539. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128539>
- Thai M., Safianowicz K., Bell T.L. i in., 2022. Dynamics of microbial community and enzyme activities during preparation of *Agaricus bisporus* compost substrate. Front. Microbiol. 2(1), art. 985351. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.985351>
- Vedder P., 1983. Our formula to be competitive in the mushroom business. Mushroom J. 121, 32–37. <https://isms.biz/common/Uploaded%20files/ISMS/Mushroom%20Journal%201990-1983/1983-1.pdf> [dostęp: 23.11.2025]
- Vieira F.R., Pecchia J., 2018. An exploration into the bacterial community under different pasteurization conditions during substrate preparation (composting-phase II) for *Agaricus bisporus* cultivation. Microbial Ecol. 75, 318–330. <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1026-7>
- Vieira W.G., da Silva Alves L., de Moura J.B. i in., 2025. Evaluation of reuse of spent mushroom substrate for new *Pleurotus ostreatus* crop cycle. AgriEngineering 7(10), 342. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7100342>
- Vos A.M., Heijboer A., Boschker H.T.S. i in., 2017. Microbial biomass in compost during colonization by *Agaricus bisporus*. AMB Exp. 7, 12. <https://doi.org/10.1186/s13568-016-0304-y>

- Walsh É., Borrión A., Walsh L., 2025. Environmental assessment of compost for *Agaricus bisporus*. *Cleaner Circular Bioecon.* 12, 100183. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2025.100183>
- Wattanavichean N., Phanthuwongpakdee J., Koedrith P. i in. 2025. Mycelium-based breakthroughs. Exploring commercialization, research, and next-gen possibilities. *Circ. Econ. Sust.* 5, 3211–3253. <https://doi.org/10.1007/s43615-025-00539-x>
- Whitehead A., 2023. Defra's complete ban on peat in horticulture could take another seven years. *Garden organic*, <https://www.gardenorganic.org.uk/news/defras-complete-ban-on-peat-in-horticulture-could-take-another-seven-years#:~:text=Defra%20has%20confirmed%20it%20will%20be%20banning%20peat,latest%20announcement%20on%20the%20peat%20ban%20in%20England> [dostęp: 23.11.2025].
- Zgłoszenie patentowe P.438706. Sposób wytwarzania bioselektywnej okrywy do uprawy grzybów jadalnych. Hreczuch Wiesław MEXEO, Kędzierzyn-Koźle.
- Zgłoszenie patentowe P.450644. Sposób kalibracji metod analitycznych oznaczania ditlenku chloru w fazie gazowej. Chruściel Arkadiusz, MEXEO, Kędzierzyn-Koźle.
- Zgłoszenie patentowe P.452691. Okrywa humusowa, sposób wytwarzania okrywy humusowej i zastosowanie okrywy humusowej do uprawy, Afirma, Wojnowo.
- ZHAW – Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, 2025. PEATLESS – Developing peat-free substrates for horticulture and mushroom production. EU Project Database, <https://peatless.eu/> [dostęp: 23.11.2025].
- Zmarlicki K., Brzozowski P., 2018. Perspektywy, szanse i zagrożenia dla produkcji pieczarek. Instytut Ogrodnictwa – InHort, Skierniewice. https://www.inhort.pl/files/program_wieloletni/PW_2015_2020_IO/spr_2018/Zmarlicki_2018_RAPORT_pieczarki_zad_5.1.pdf [dostęp: 23.11.2025].

Źródło finansowania: Praca jest rezultatem projektu nr POIR.01.01.01-00-0829/16-00 „Innowacyjna, mykoselektywna okrywa oraz podłoże do uprawy pieczarek” (BIOMEX) realizowanego w latach 2017–2023 w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of the current state of the mushroom sector in Poland, which remains the global leader in mushroom exports. The authors diagnose major threats to the industry, including workforce shortages, rising energy costs, peat availability, lack of recognition of spent mushroom compost (SMC) as fertilizer, and insufficient institutional support. The article highlights the need for consolidation and modern R&D infrastructure, while identifying opportunities such as EU funding for innovations and the revival of national industry conferences. The paper has a review and strategic focus.

Keywords: mushroom cultivation, peat, substrate, casing, energy, innovation

Otrzymano/Received: 6.07.2025
Zaakceptowano/Accepted: 19.10.2025
Opublikowano/Published: 31.12.2025