



Od płytek agarowych do aplikacji mobilnych: ewolucja monitoringu mikrobiologicznego

dr n. tech. Anna Ławniczek-Walczyk^{a,b} (ORCID: 0000-0001-8234-340X)

prof. dr hab. n. med. Rafał L. Górny^a (ORCID: 0000-0001-5703-5835)



Fot. jarun011/Bigstockphoto

W artykule omówiono rozwój metod i rozwiązań stosowanych w laboratoriach mikrobiologicznych – od klasycznych technik manualnych po nowoczesne systemy automatyczne i aplikacje mobilne wspomagające codzienną pracę diagnostyczną. Omówiono potencjał hybrydowego podejścia polegającego na łączeniu sprawdzonych metod z najnowocześniejszymi technologiami cyfrowymi opartymi na sztucznej inteligencji (ang. *artificial intelligence* – AI) i uczeniu maszynowym (ang. *machine learning* – ML). Wskazano również na kierunki przyszłych badań, które mogą prowadzić do uzyskania bardziej precyzyjnych rozwiązań (aplikacji na smartfony) oraz systemów (np. ciągów technologicznych), zapewniających jednocześnie oszczędność czasu i kosztów.

Słowa kluczowe: laboratorium mikrobiologiczne, badanie mikrobiologiczne, automatyzacja, sztuczna inteligencja AI, aplikacje

From agar plates to mobile apps: the evolution of microbiological monitoring

The article discusses the development of methods and solutions used in microbiological laboratories – from classical manual techniques to modern automated systems and mobile applications that support everyday diagnostic work. It highlights the potential of a hybrid approach combining proven methods with state-of-the-art digital technologies based on Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML). The paper also points out future research directions that may lead to more precise solutions (e.g., smartphone applications) and systems (e.g., technological lines) while simultaneously ensuring time and cost efficiency.

Keywords: microbiological laboratory, microbiological testing, automation, artificial intelligence (AI), mobile applications

^a Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

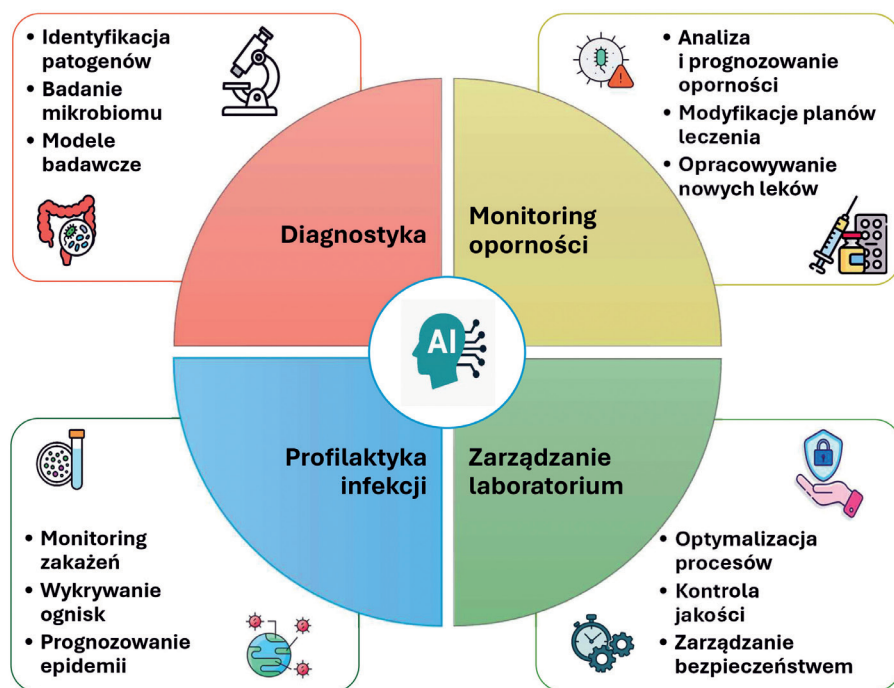
^b Kontakt: anlaw@ciop.pl.

Wstęp

W każdym środowisku pracy, w którym istnieje potwierdzone narażenie na chorobotwórcze drobnoustroje, zwłaszcza w sektorze spożywczym, medycznym, rolniczym i farmaceutycznym, ważnymi elementami ograniczania rozprzestrzeniania się patogenów są systematyczny monitoring zanieczyszczenia mikrobiologicznego i bezwzględne przestrzeganie procedur higienicznych. Ten monitoring sam w sobie może stanowić kontrolę nie tylko jakości higienicznej środowiska pracy, lecz także procesu mycia i dezynfekcji powierzchni roboczych i sprzętu oraz właściwej higieny rąk pracowników. Badanie mikrobiologiczne składa się z wielu etapów i obejmuje m.in.: pobieranie próbek, ich transport, laboratoryjne opracowanie, w tym hodowlę, identyfikację oraz raportowanie wyników. Podczas przeprowadzania takiego badania mogą wystąpić liczne trudności (zwłaszcza w przypadku analizy próbek środowiskowych), które dotyczą głównie takich aspektów, jak: niestandardowe rozmiary próbek, skomplikowane czynności związane z ich obróbką wstępną, konieczność dostosowywania testów do rodzaju próbek i wykonywania wielu etapów analizy ręcznie oraz problematyczna identyfikacja niektórych drobnoustrojów. Jedną z najczęściej wykonywanych analiz w laboratorium klinicznym i środowiskowym jest oznaczanie liczby kolonii na płytkach agarowych oraz ocena wrażliwości drobnoustrojów na środki przeciwdrobnoustrojowe metodą dyfuzyjno-krażkową. Niewątpliwymi zaletami obu tych metod są łatwość stosowania, powszechność i ugruntowana pozycja w międzynarodowych normach [1–4], natomiast poważnymi ograniczeniami – czasochłonność, subiektywność odczytów i konieczność angażowania wysoko wykwalifikowanego personelu. Rozwiązaniem tych problemów może być wprowadzenie cyfrowych usprawnień procesów pracy w laboratorium, opartych na sztucznej inteligencji i uczeniu maszynowym [5–8].

Sztuczna inteligencja (AI) to ogólne określenie systemów komputerowych, które potrafią analizować dane, wyciągać wnioski i podejmować decyzje w sposób przypominający ludzkie myślenie. Natomiast uczenie maszynowe (ML) jest częścią AI i polega na tym, że algorytmy uczą się na podstawie danych, zamiast działać wyłącznie według wcześniej zapisanych reguł. Najprościej mówiąc: AI określa, co system ma robić, a ML odpowiada za to, jak system uczy się na danych [6–8].

W mikrobiologii AI i ML wykorzystuje się do automatycznego rozpoznawania kolonii, analizy obrazów mikroskopowych, prognozowania oporności bakterii oraz



Rys. 1. Wykorzystanie sztucznej inteligencji w diagnostyce i badaniach w obszarze mikrobiologii klinicznej [8]
 Fig. 1. The use of artificial intelligence in diagnostics and research within the field of clinical microbiology [8]

identyfikacji patogenów (rys. 1). Sztuczna inteligencja wspiera też systemy automatyzacji laboratoriów. W laboratoriach działań jakością i diagnostycznych (czyli wszędzie tam, gdzie liczy się szybkość i powtarzalność wyników) metody manualne coraz częściej podlegają procesowi automatyzacji (w piśmiennictwie przedmiotu jest ona definiowana jako zastosowanie technologii, która pozwala wykonywać określone czynności bez udziału człowieka [9]) i są wspierane przez AI [6, 8]. Pierwsze etapy automatyzacji w laboratorium mikrobiologicznym obejmowały usprawnienie posiewów, inkubacji i digitalizacji płytek, co umożliwiło odczyt wyników na obrazach cyfrowych oraz precyzyjny wybór kolonii do dalszej analizy [5, 10]. Obecnie rozwój inteligentnych algorytmów i systemów eksperckich stopniowo wprowadza głębszą automatyzację procesów identyfikacji (np. wysokoprzepustowe sekwencjonowanie DNA) oraz ułatwia raportowanie i archiwizację wyników [7, 11–15]. Dzięki temu nowoczesne systemy automatyczne mogą wspierać każdy etap pracy laboratoryjnej, zwiększając jego dokładność, powtarzalność i efektywność. Należy jednak zauważyć, że kompleksowa identyfikacja kolonii w próbkach mieszanym (środowiskowym) wciąż stanowi wyzwanie dla maszyny.

Celem tego artykułu jest prześledzenie ewolucji metod – od tradycyjnych technik po automatyczne systemy i aplikacje mobilne wspierające rutynowe prace w laboratorium mikrobiologicznym. W artykule podkreślono potencjał hybrydowego

podejścia, polegającego na łączeniu sprawdzonych metod z najnowocześniejszymi technologiami cyfrowymi, oraz wskazano na kierunki przyszłych badań, które mogą prowadzić do uzyskania bardziej precyzyjnych rozwiązań (aplikacji na smartfony) i systemów (np. ciągów technologicznych) z zapewnieniem oszczędności czasu i kosztów.

Płytki agarowe, posiewy i antybiogramy

Podstawową metodą oceny zanieczyszczenia mikrobiologicznego powierzchni, powietrza lub innego materiału (surowca technicznego, próbki biologicznej) jest metoda hodowlana. W uproszczeniu polega ona na tym, że próbka po pobraniu jest przywożona w odpowiednich warunkach do laboratorium (zazwyczaj w temperaturze 4–8°C) i poddawana wstępnej obróbce, np. poprzez ekstrakcję, odwirowanie czy rozcieńczenie. Następnie uzyskany materiał posiewa się na odpowiednie podłoże agarowe i inkubuje w odpowiedniej temperaturze, np. 36°C, przez 24–48 godzin. Po okresie inkubacji zlicza się kolonie wyrosłe na podłożu, a wyniki wyraża w jednostkach tworzących kolonie (JTK) na jednostkę (odpowiednio) powierzchni, pojemności/objętości lub masy (w przypadku powierzchni – JTK/cm², cieczy – JTK/ml, materiału stałego – JTK/g, powietrza – JTK/m³). Zaletami tej metody są prostota wykonania i niskie koszty, dlatego jest ona uznawana za tzw.

złoty standard w mikrobiologii [1, 2]. Aby określić gatunek wyizolowanego szczepu, należy wykonać dalsze analizy, obejmujące: izolację czystej kultury (najczęściej przez wykonanie posiewu redukcyjnego i inkubację), obserwacje makroskopowe (określenie cech kolonii: np. wielkości, kształtu, barwy, odbarwienia podłoża) i mikroskopowe (określenie cech komórek wybarwionych np. metodą Grama) oraz wykonanie testów biochemicznych (API ID Strip, RapID Systems lub podobnych) bądź innych, umożliwiających identyfikację (np. testów genetycznych, analizy białek rybosomalnych).

Integralną częścią oceny mikrobiologicznej jest też badanie lekowrażliwości bakterii za pomocą antybiogramu (ang. *antimicrobial susceptibility testing* – AST). Najbardziej znaną i najczęściej stosowaną metodą oznaczania lekowrażliwości jest metoda dyfuzyjno-krążkowa Kirby’ego-Bauera [16]. Polega ona na wysianiu badanego szczepu na podłożu Mullera-Hintona i naniesieniu krążków bibułowych impregnowanych antybiotykami. Następnie po inkubacji dokonuje się pomiaru średnicy stref zahamowania wzrostu wokół poszczególnych krążków. Alternatywną metodą jest oznaczanie minimalnego stężenia hamującego (ang. *minimum inhibitory concentration* – MIC) lub stosowanie pasków gradientowych. Interpretacja wyników (zwanymi antybiogramami) odbywa się na podstawie międzynarodowych wytycznych, opracowanych przez Europejski Komitet ds. Oznaczania Lekowrażliwości (European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing – EUCAST) w Europie [4] czy Instytut Standardów Klinicznych i Laboratoryjnych (Clinical and Laboratory Standards Institute – CLSI) w Stanach Zjednoczonych [3]. Wykonywanie antybiogramów ma istotne znaczenie zarówno w medycynie (umożliwia dobór skutecznego antybiotyku do konkretnego patogenu wywołującego chorobę), jak i w monitoringu rozprzestrzeniania się szczepów wielolekoopornych w różnych środowiskach [3, 4, 17].

Pomimo swojej uniwersalności metody hodowlane są obarczone wieloma ograniczeniami. Do najważniejszych należą długi czas potrzebny do uzyskania wyników, tj. od 24 do 72 godzin (a w przypadku pleśni nawet do 7–14 dni), co może opóźnić kolejne kroki postępowania w przypadku wykrycia skażenia. W trakcie liczenia kolonii, posiewu i pomiaru stref zahamowania wzrostu może dojść do wystąpienia błędów ludzkich, które negatywnie wpływają na powtarzalność i wiarygodność analiz [2, 18]. Kolejne problemy mogą się pojawić na etapie interpretacji i raportowania

wyników, zwłaszcza w kontekście braku uniwersalnie obowiązujących limitów dopuszczalnych stężeń drobnoustrojów dla różnych powierzchni i środowisk [2, 19].

Poziomy automatyzacji w mikrobiologii

Dostępne na rynku systemy wspierające laboratoria mikrobiologiczne można podzielić na półautomatyczne i automatyczne, różniące się stopniem złożoności i zakresem realizowanych funkcji (zob. tabelę). Systemy półautomatyczne są zazwyczaj wyposażone w moduły umożliwiające automatyczny posiew na pożywkę zestaloną agarową lub pożywkę płynną w próbkach, precyzyjne dozowanie materiału i kontrolowanie inkubacji. W niektórych modelach dostępne są dodatkowe funkcje, takie jak cyfrowe obrazowanie kolonii i zliczanie JTK. Mimo to ostateczna interpretacja wyników wciąż wymaga udziału doświadczonego personelu. Pierwsze proste systemy półautomatyczne, takie jak BACTEC™ (BD Kiestra, Holandia) czy inocuLAB (Dynacon, Kanada) zostały wprowadzone na rynek w latach 80.

ubiegłego wieku. Obecna generacja urządzeń oferuje znacznie większe możliwości niż wcześniejsze systemy. Wśród najbardziej znanych systemów są m.in.: Autoplak (Sener Diagnostics, Hiszpania) i Inoqula (BD Kiestra, Holandia). Systemy te umożliwiają automatyczne analizowanie szerokiego zakresu próbek płynnych oraz w odróżnieniu od tradycyjnych metod manualnych zapewniają standaryzację i powtarzalność posiewu [5, 10, 20].

Przykładami rozwiązań półautomatycznych są również urządzenia do identyfikacji gatunkowej drobnoustrojów, oparte na technice spektrometrii mas MALDI-TOF MS (ang. *matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry*), np. MALDI-TOF MS Biotyper (Bruker Daltonics, USA) i VITEK MS (bioMérieux, Francja). Technika MALDI-TOF MS bazuje na analizie białek rybosomalnych, które są specyficzne dla poszczególnych gatunków drobnoustrojów. W celu zidentyfikowania gatunku drobnoustroju pracownicy muszą ręcznie przygotować próbkę, włączając w to pobranie kolonii z płytek hodowlanych, nakładanie ich na płytki testowe i dodanie roztworu matrycy. Aby uzyskać wyższą jakość odczytu, wymagany

Tabela. Porównanie systemów pracy i urządzeń w laboratorium mikrobiologicznym [2, 10, 11, 20, 21]
Table. Comparison of work systems and equipment in a microbiological laboratory [2, 10, 11, 20, 21]

Rodzaje systemów	Manualne	Półautomatyczne	W pełni automatyczne
Zakres funkcji	Ręczne wykonywanie wszystkich etapów: posiewu, inkubacji, odczytu i interpretacji wyników	Automatyzacja wybranych etapów – zwykle posiewu i inkubacji; odczyt i interpretacja – częściowo manualne	Pełna integracja procesu: inokulacja, inkubacja, digitalizacja, analiza obrazu, archiwizacja i raportowanie
Przykłady systemów	Wykwalifikowany pracownik	BD Kiestra Inoqula, Previ-Isola (bioMérieux), Autoplak (NTE-SENER), MALDI-TOF MS, VITEK	BD Kiestra TLA, WASP Lab (Copan), Innova (BD), PreLUD (I2A)
Udział człowieka	Znaczny – każdy etap wymaga pracy manualnej	Średni – personel nadzoruje proces, ale część czynności jest wykonywana automatycznie	Niski – operator pełni funkcję kontrolną i weryfikuje wyniki
Zalety	Elastyczność, niskie koszty wdrożenia, możliwość pracy z małymi seriami próbek	Redukcja błędów ludzkich, standaryzacja posiewów, optymalizacja czasu pracy	Wysoka przepustowość, pełna ścieżka cyfrowa, archiwizacja obrazów, szybki dostęp do wyników
Ograniczenia	Zmienność wyników, ryzyko kontaminacji, ograniczona powtarzalność, długi czas analizy	Brak pełnej integracji, konieczność manualnej interpretacji wyników, ograniczone funkcje obrazowania	Wysokie koszty inwestycji i utrzymania, potrzeba reorganizacji przepływu pracy, ograniczenia dotyczące niestandardowych testów
Zastosowanie	Małe laboratoria, zakłady przemysłu spożywczego, badania terenowe	Laboratoria średniej przepustowości, szpitale regionalne, jednostki referencyjne	Duże laboratoria diagnostyczne, centra referencyjne, sieci badawcze
Integracja z AI	Niska – częściowa integracja z aplikacjami mobilnymi i bazami danych	Ograniczona – częściowa integracja z bazami danych AI, aplikacjami mobilnymi	Wysoka – integracja z systemami LIMS, AI, analizą obrazu i raportowaniem w czasie rzeczywistym



Fot. Aplikacja BactiCALC – podgląd funkcji (fot. A. Ławniczek-Wałczyk, archiwum CIOP-PIB)
 Photo. BactiCALC application – function preview (photo: A. Ławniczek-Wałczyk, CIOP-PIB archive)

jest dodatkowy etap manualnego przygotowania próbki, polegający na ekstrakcji białek z komórek przy użyciu różnego rodzaju rozpuszczalników. Wyjątkiem jest sytuacja, gdy urządzenia są wbudowane w ciąg technologiczny z systemem do automatycznego przygotowywania próbek. W analizie lekooporności wykorzystuje się takie urządzenia, jak Sensititre Complete Automated AST System (Thermo Scientific, USA) i VITEK 2 (bioMérieux, Francja). Systemy półautomatyczne wymagają obecności pracownika, zwłaszcza jego udziału w odczycie i interpretacji wyników. Ograniczeniem jest również brak pełnej integracji tych systemów z systemami zarządzania danymi LIS (ang. *laboratory information system*) i LIMS (ang. *laboratory information management system*), dlatego takie rozwiązania sprawdzają się najczęściej w laboratoriach o średniej przepustowości, w których pełna automatyzacja jest nieopłacalna lub trudna do wdrożenia [5, 10, 22].

Rozwój sztucznej inteligencji i technik przetwarzania obrazu doprowadził do powstania półautomatycznych systemów liczenia kolonii i oceny antybiogramów, które mogą zastępować subiektywne analizy manualne. Przykładem takich urządzeń są: UVP ColonyDoc-It Imaging Station (Analytik Jena US, USA), SCAN 300 (Interscience, Francja) i ProtoCol-3 (Synbiosis, Wielka Brytania). Umożliwiają one szybką i powtarzalną analizę zdjęć płytek agarowych, minimalizując ryzyko błędów ludzkich oraz pozwalają

na łatwiejszą archiwizację i analizę trendów [14, 15]. Wraz z postępem w zakresie AI pojawiła się nowa kategoria narzędzi wspierających badania mikrobiologiczne, którymi są aplikacje na smartfony i tablety. Wykorzystują one obraz przechwycony z kamery urządzenia mobilnego i dokonują analiz, np. umożliwiają zliczenie kolonii czy antybiogramu. Wśród nich znajdują się takie aplikacje, jak JTK.Ai, Omega Colony Counter, APD Colony Counter App Pro i BactiCALC [12, 14]. Na tle dostępnych narzędzi szczególnie interesującym przykładem jest właśnie aplikacja BactiCALC [23], opracowana przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB) w Warszawie. To darmowe, intuicyjne oprogramowanie mobilne zostało zaprojektowane do wspierania tradycyjnych badań mikrobiologicznych (zob. fot.). Aplikacja oferuje następujące moduły funkcjonalne:

- Licznik kolonii – do automatycznego rozpoznawania i zliczania kolonii na płytkach agarowych ze zdjęć wykonanych smartfonem;
- Kalkulator stężeń – do szybkiego przeliczenia wyników na standardowe jednostki (JTK/cm², JTK/ml, JTK/m³);
- Analiza antybiogramów – do interpretacji stref zahamowania wzrostu zgodnie z aktualnymi wytycznymi EUCAST;
- Raportowanie – do generowania i eksportu raportów w formacie PDF, co ułatwia dokumentowanie i archiwizację wyników.

Aplikacja BactiCALC działa zarówno w trybie online, jak i offline, dzięki czemu może być wykorzystywana w laboratoriach o ograniczonym dostępie do internetu czy w zakładach produkcyjnych o niskim stopniu cyfryzacji. Aplikacja łączy w sobie klasyczne metody hodowlane z nowoczesnymi narzędziami opartymi na sztucznej inteligencji. Ponieważ BactiCALC działa na zwykłym smartfonie lub tablecie, nie wymaga drogiego sprzętu. Ma prosty, intuicyjny interfejs, zatem mogą z niej korzystać także pracownicy bez specjalistycznego przygotowania informatycznego [24].

Choć zastosowanie aplikacji mobilnych w laboratoriach mikrobiologicznych wiąże się z pewnymi wyzwaniem, takimi jak jakość zdjęć i powtarzalność wyników, to dynamiczny rozwój sztucznej inteligencji wkrótce znacząco zwiększy ich potencjał i dokładność. Poza tym niski koszt i łatwa obsługa tego rodzaju oprogramowania pozwalają na jego szybkie wdrożenie w codziennej pracy bez konieczności wprowadzania kosztownych zmian w infrastrukturze [12, 14].

Automatyzacja TLA

Automatyzacja w mikrobiologii klinicznej, określana skrótem TLA (ang. *total laboratory automation*), opiera się na zintegrowanym przepływie pracy, który obejmuje etapy od momentu przyjęcia próbki, poprzez posiew, inkubację i digitalizację,



Rys. 2. Schematyczny diagram systemu TLA w mikrobiologii (ilustracja stworzona przy użyciu sztucznej inteligencji, ChatGPT, OpenAI)
 Fig. 2. Schematic diagram of the TLA system in microbiology (illustration created using artificial intelligence, ChatGPT, OpenAI)

aż po przygotowanie wstępnego raportu (rys. 2). W praktyce klinicznej najczęściej wykorzystywanymi tego typu systemami są BD Kiestra TLA (BD, USA) i WASPLab (Copan, USA). Dzięki zastosowaniu zaawansowanych urządzeń i kamer o wysokiej rozdzielczości obecnie jest możliwe automatyczne wykonywanie wielu czynności, które dotychczas wymagały udziału człowieka [5, 9–11, 20]. Według doniesień literaturowych wdrożenie TLA znacząco skraca czas uzyskania wyników (od kilku godzin do doby) oraz zapewnia lepszą powtarzalność, zwłaszcza gdy system TLA występuje z modułem do detekcji (np. MALDI-TOF MS, testy biochemiczne i PCR). Ponadto systemy TLA umożliwiają półilościową ocenę wzrostu w próbkach i detekcję wybranych patogenów, m.in. *Streptococcus agalactiae* (GBS), *Enterococcus faecium* VRE, *Staphylococcus aureus* MRSA czy *Streptococcus pyogenes* [11, 20, 22].

Dzięki zastosowaniu systemu TLA czas raportowania wyników negatywnych w próbkach moczu skrócił się z 52,1 do 28,3 godzin, przy jednoczesnym zwiększeniu wykrywalności rzadziej identyfikowanych uropatogenów, takich jak *Alloscardovia* spp. i *Aerococcus* spp. [20, 22]. Korzyści kliniczne związane z otrzymaniem przez lekarza szybszego wyniku antybiogramu są bardzo duże, ponieważ obejmują możliwość wcześniejszej modyfikacji terapii przeciwdrobnoustrojowej

u pacjenta [8, 17, 20]. Prawdopodobnie dobrany antybiotyk skraca czas terapii i ogranicza szansę na rozwój oporności bakterii, a ponadto pozwala uniknąć wystąpienia u pacjenta efektów ubocznych stosowania źle dobranych leków.

Ograniczenia i perspektywy rozwoju

Należy podkreślić, że nawet najbardziej zaawansowane systemy nie realizują jeszcze w pełni koncepcji „całkowitej automatyzacji” w laboratorium. Według badań przeprowadzonych przez Yu i wsp. wdrożenie systemu TLA w laboratorium klinicznym (biochemia, hematologia, koagulacja) znacząco uprościło pracę dzięki zredukowaniu liczby pojedynczych etapów przetwarzania próbek o 86%, a ponadto pozwoliło zmniejszyć konieczną powierzchnię roboczą w laboratorium o 45% oraz zatrudnienie o 2,5 etatu [25]. Mimo jednoznacznie widocznych zmian pełna integracja systemu TLA z dotychczasowym przepływem pracy w laboratorium mikrobiologicznym wymaga gruntownej reorganizacji, ponieważ niektóre procedury klasyczne, łatwe do wykonania ręcznie, mogą być mniej efektywne w warunkach automatycznych [10]. Praca z TLA nadal wymaga obecności pracownika, który jest niezbędny do: uzupełniania materiałów eksploatacyjnych,

pobrania, sortowania i załadunku próbek, oceny wyniku analizy i przygotowania raportu czy odbierania odpadów. Wciąż istnieją ograniczenia dotyczące automatycznego obrazowania próbek, błędów przy ocenie preparatów mikroskopowych oraz niektórych testów biochemicznych. Pełne wykorzystanie potencjału TLA wymaga zatem całodobowego nadzoru i obecności przeszkolonego personelu [9, 10, 25]. Wyzwania te częściowo rozwiązuje sztuczna inteligencja, która wspiera automatyczne rozpoznawanie kolonii oraz analizę obrazów płytek i odczytu antybiogramów. Algorytmy mogą porównywać zdjęcia uzyskane w różnych momentach inkubacji i wykrywać wzrost bakterii wcześniej niż człowiek, a także oceniać liczebność drobnoustrojów i morfologię kolonii oraz stężenie antybiotyku skutecznie hamujące ich rozwój. Systemy oparte na AI i ML w laboratoriach klinicznych mogą już dziś same identyfikować negatywne posiewy z krwi i moczu, a następnie przysyłać gotowe wyniki lekarzowi, co zwiększa przepustowość laboratorium i skraca czas oczekiwania na wynik [7, 21, 22]. Warto jednak zauważyć, że wszelkie nowe metody i urządzenia diagnostyczne w mikrobiologii klinicznej wymagają podjęcia dalszych testów mających na celu określenie ich realnej efektywności i skuteczności w laboratorium mikrobiologicznym. Wspomniane testy będą niezbędne do ustalenia rzeczywistej,

a nie postrzeganej lub oczekiwanej wartości automatyzacji całego laboratorium w mikrobiologii [5].

Podsumowanie

Rosnące wymagania co do poprawy jakości diagnostyki mikrobiologicznej, skrócenia czasu uzyskania wyników, optymalizacji zatrudnienia i racjonalnego stosowania antybiotyków powodują, że laboratoria na całym świecie poszukują skutecznych strategii zwiększających efektywność pracy. Rozwój nowoczesnych technologii TLA i sztucznej inteligencji otworzył nowe możliwości dla mikrobiologii. Algorytmy uczenia maszynowego i systemy oparte na analizie obrazu pozwalają na uproszczenie wielu etapów analizy w laboratorium mikrobiologicznym poprzez posiewy, automatyczne liczenie kolonii i interpretację stref zahamowania wzrostu drobnoustrojów przez antybiotyki oraz predykcję oporności. W laboratoriach przemysłowych technologie AI wspierają monitoring higieny produkcji i optymalizują procesy wytwórcze, a w medycynie umożliwiają personalizację terapii antybiotykowej. Połączenie klasycznych metod mikrobiologicznych z innowacjami technologicznymi staje się dziś ważnym wsparciem badań naukowych i badań diagnostycznych [6–8, 17, 21, 22]. Wprowadzanie nowych rozwiązań (np. aplikacji na urządzenia mobilne) i systemów TLA w długookresowej perspektywie pozwoli na obniżenie kosztów oraz przyczyni się do poprawy jakości i bezpieczeństwa w wielu sektorach gospodarki. Nie można jednak zapomnieć, że mimo postępującej automatyzacji obecność doświadczonego i wyspecjalizowanego pracownika pozostaje kluczowa dla prawidłowego funkcjonowania laboratoriów mikrobiologicznych.

Zrealizowano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Projekt nr I.PN.02 pt. „Biofilmotwórcze patogeny – opracowanie nowoczesnych narzędzi do monitorowania poziomu czystości mikrobiologicznej powierzchni”. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sanders E.R., *Aseptic laboratory techniques: plating methods*, „Journal of Visualized Experiments: JoVE”, 2012, 63: e3064; doi: 10.3791/3064.
- [2] Griffith C., *Surface sampling and the detection of contamination*, [w:] *Handbook of Hygiene Control in the Food Industry*, 2016, s. 673–696; doi: 10.1016/b978-0-08-100155-4.00044-3.
- [3] CLSI M100 *Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing*, Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI), 2025.
- [4] *Breakpoint tables for interpretation of MICs and zone diameters. Version 15.0*, The European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing (EUCAST), 2025.
- [5] Bourbeau P.P., Ledebner N.A., *Automation in clinical microbiology*, „Journal of Clinical Microbiology”, 2013, 51(6): 1658–1665; doi: 10.1128/JCM.00301-13.
- [6] Naugler C., Church D.L., *Automation and artificial intelligence in the clinical laboratory*, „Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences”, 2019, 56(2): 98–110; doi: 10.1080/10408363.2018.1561640.
- [7] Tsitou V.M. i in., *Microbiology in the era of artificial intelligence: transforming medical and pharmaceutical microbiology*, „Biotechnology & Biotechnological Equipment”, 2024, 38(1); doi: 10.1080/13102818.2024.2349587.
- [8] Ding T., Tang Y., Hao X., *Application of artificial intelligence in clinical microbiology: From research to practice*, iLABMED, 2025; doi: 10.1002/ila2.70033.
- [9] Burckhardt I., *Laboratory Automation in Clinical Microbiology*, „Bioengineering”, 2018, 5: 102; doi: 10.3390/bioengineering5040102.
- [10] Antonios K., Croxatto A., Culbreath K., *Current State of Laboratory Automation in Clinical Microbiology Laboratory*, „Clinical Chemistry”, 2022, 68 (1): 99–114; doi: 10.1093/clinchem/hvab242.
- [11] Moreno-Camacho J.L. i in., *Transformation from a conventional clinical microbiology laboratory to full automation*, „Laboratory Medicine”, 2017, 49(1): e1–e8; doi: 10.1093/labmed/lmx0791.

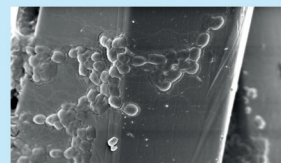
- [12] Moucka M. i in., *Performance of four bacterial cell counting apps for smartphones*, „Journal of Microbiological Methods”, 2022, 199: 106508; doi: 10.1016/j.mimet.2022.106508.
- [13] Jacot D. i in., *Development and evaluation of an artificial intelligence for bacterial growth monitoring in clinical bacteriology*, „Journal of Clinical Microbiology”, 2024, 62(5): e0165123; doi: 10.1128/jcm.01651-23.
- [14] Zhang L., *Machine learning for enumeration of cell colony forming units*, „Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art”, 2022, 5: 26; doi: 10.1186/s42492-022-00122-3.
- [15] Heuser E., Becker K., Idelevich E.A., *Evaluation of an Automated System for the Counting of Microbial Colonies*, „Microbiology Spectrum”, 2023, 11: e00673-23; doi: org/10.1128/spectrum.00673-23.
- [16] Bauer A.W. i in., *Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method*, „American Journal of Clinical Pathology”, 1966, 45(4): 493–496.
- [17] Salam M.A. i in., *Antimicrobial Resistance: A Growing Serious Threat for Global Public Health*, „Healthcare”, 2023, 11(13): 1946; doi: 10.3390/healthcare11131946.
- [18] Gajic I. i in., *Antimicrobial Susceptibility Testing: A Comprehensive Review of Currently Used Methods*, „Antibiotics”, 2022, 11(4): 427; doi: 10.3390/antibiotics11040427.
- [19] Losito P. i in., *Evaluation of hygienic conditions of food contact surfaces in retail outlets: Six years of monitoring*, „LWT – Food Science and Technology”, 2016, 77: 67–71; doi: 10.1016/j.lwt.2016.11.029.
- [20] Croxatto A. i in., *Laboratory automation in clinical bacteriology: What system to choose?*, „Clinical Microbiology and Infection”, 2016, 22: 217–235; doi: 10.1016/j.cmi.2015.09.030.
- [21] Mairi A., Hamza L., Touati A., *Artificial intelligence and its application in clinical microbiology*, „Expert Review of Anti-infective Therapy”, 2025, 23(7): 469–490; doi: 10.1080/14787210.2025.2484284.
- [22] Cherkaoui A., Schrenzel J., *Total Laboratory Automation for Rapid Detection and Identification of Microorganisms and Their Antimicrobial Resistance Profiles*, „Frontiers in Cellular and Infection Microbiology”, 2022, 12: 807668; doi: 10.3389/fcimb.2022.807668.
- [23] *Ocena zanieczyszczenia z aplikacją BactiCALC*, CIOP-PIB; <https://skroc.pl/Pxy28nS>.
- [24] Ławniczek-Wałczyk A., *Mobilna mikrobiologia w praktyce – jak nowoczesne technologie wspierają higienę i bezpieczeństwo w żywności w zakładach mięsnych*, <https://mieso.com.pl/aktualnosci/mobilna-mikrobiologia-w-praktyce-jak-nowoczesne-technologie-wspieraja-higienę-i-bezpieczenstwo-zywnosci-w-zakladach-miesnych>.
- [25] Yu H.E. i in., *Improving laboratory processes with total laboratory automation*, „Laboratory Medicine”, 2019, 50: 96–102; doi: 10.1093/labmed/lmy031.

POLECAMY



ANNA ŁAWNICZEK-WALCZYK

**BIOFILM I HIGIENA POWIERZCHNI
– PRAKTYCZNY INFORMATOR**



CIOP  75 