



Anna TABASZEWSKA

Katedra Technologii Chemicznej Organicznej i Petrochemii,  
Politechnika Śląska, Krzywoustego 4, 44-100 Gliwice



Anna WOLNY

Katedra Technologii Chemicznej Organicznej i Petrochemii,  
Politechnika Śląska, Krzywoustego 4, 44-100 Gliwice,  
anna.wolny@polsl.pl

# Zastosowanie enzymów w produkcji przemysłowej

Use of enzymes in industrial production

DOI: 10.15199/5.2024.1.2

*Wprowadzane przez Unię Europejską regulacje, normy i dyrektywy w ramach wspierania ochrony środowiska oraz zrównoważonego rozwoju gospodarki wymuszają transformację w produkcjach przemysłowych. Rozwój zielonych technologii stał się wiodącym nurtem zmian w przemyśle chemicznym. W szczególności warte uwagi są rozwiązania biotechnologiczne, których wdrożenie oferuje wiele zalet, nie tylko w obszarze ochrony środowiska, lecz także w poprawie bezpieczeństwa procesowego oraz efektywności i ekonomiczności całej produkcji. Procesy biokatalityczne charakteryzuje ponadto wysoka selektywność i wydajność produkcji, łagodne warunki procesowe oraz wysoka czystość i jakość otrzymywanych produktów, co potwierdza ich ogromny potencjał użytkowy w syntezach przemysłowych w przyszłości.*

*Słowa klucze: biokataliza, enzymy, przemysł, technologie, zielona chemia*

*A review, with 62 refs. of the use of enzymes in the chem., pharmaceutical, cosmetic and food industries. Special attention was paid to the use of lipases. Enzyme technologies developed by companies such as Kaneka, Pfizer and BASF were presented. The problem of loss of enzyme activity and various methods of enzyme immobilization on carriers as well as technologies for using immobilized enzymes in industry were discussed.*

*Keywords: biocatalysis, enzymes, industry, technologies, green chemistry*

## Wstęp

W dzisiejszych czasach przemysł chemiczny wymaga ciągłych zmian, które wynikają ze wzrostu świadomości ekologicznej społeczeństwa i pojawianiem się nowych dyrektyw oraz regulacji europejskich. Przemysł chemiczny stoi przed coraz większym wyzwaniem dostosowania się do nowych standardów zrównoważonego rozwoju. Zgodnie z Agendą 2030 na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju, naszym zadaniem jest zapewnienie zdrowego środowiska dla ludzkości oraz ochrona planety poprzez zrównoważoną produkcję i podejmowanie niezbędnych i pilnych działań dotyczących zmian klimatycznych. W ten sposób działania te będą służyć zarówno obecnym, jak i przyszłym pokoleniom [1]. Pomimo wyraźnych wysiłków na rzecz wprowadzenia ekologicznych innowacji, niektóre sektory przemysłu nadal stosują technologie i praktyki, które stanowią zagrożenie dla środowiska. Jednym z takich przykładów jest stosowanie tradycyjnych, często niebezpiecznych i toksycznych katalizatorów. Wzrastająca troska o planetę i rozwój ekologicznych produkcji poprzez biotechnologię zwróciła uwagę przedsiębiorstw chemicznych na biokatalizatory, czyli zielone katalizatory w przemyśle [2,3]. Na rys. 1. przedstawiono ogólne zastosowanie enzymów w przemyśle chemicznym, farmaceutycznym, kosmetycznym i spożywczym.

Enzymy, jako tzw. zielone katalizatory, stanowią doskonałą alternatywę dla katalizatorów generujących odpady niebezpieczne dla środowiska tj. nadtlenuki i związki metali [2]. Enzymy, będące białkami, to naturalne, biodegradowalne katalizatory, które obniżają energię aktywacji reakcji chemicznych. Kataliza enzymatyczna zachodzi poprzez wiązanie substratów z centrum aktywnym białka [4]. Centrum aktywne składa się z uporządkowanych w konkretny

sposób aminokwasów, co wpływa na ich właściwości elektrostatyczne, strukturę enzymu oraz aktywność chemiczną [5, 6]. Wyróżnia myślicie głównych klas enzymów: oksydoreduktazy, transferazy, hydrolazy, liazy, izomerazy oraz ligazy, które katalizują różnego typu reakcje chemiczne. Oksydoreduktazy katalizują reakcje utleniania i redukcji, transfera zymigrację grup funkcyjnych (np. glikozydowych lub metylowych), a hydrolazy są klasą, która bierze udział w hydrolizie wiązań typu C-C, C-O, C-N. Liazy katalizują reakcje eliminacji, izomerazy reakcje izomeryzacji, natomiast ligazy utworzenie nowych wiązań kowalencyjnych [4, 7, 8]. Enzymy charakteryzuje wysoka aktywność katalityczna, co umożliwia prowadzenie reakcji w łagodnych warunkach. Dodatkowo użycie enzymów redukuje problemy związane z czystością otrzymywanych produktów, gdyż procesy enzymatyczne przebiegają z wysoką regioselektywnością, enancjoselektywnością i chemoselektywnością, co prowadzi do otrzymywania bardziej czystych produktów końcowych [2, 8].

W przemyśle chemicznym najczęściej stosowanymi enzymami są lipazy. Lipazy są enzymami, które wykazują aktywność zarówno w środowiskach polarnych, jak i niepolarnych. Dodatkowo, są one rozpuszczalne w wodzie, co umożliwia im działanie w różnorodnych warunkach środowiskowych [9]. Lipazy działają w na granicy fazy lipidowej a wodnej, co czyni je uniwersalnymi biokatalizatorami w różnych środowiskach przemysłowych. W ich strukturze nad miejscem aktywnym znajduje się ruchoma pokrywa, która pełni rolę osłony i warunkuje aktywność katalityczną enzymu. W warunkach wodnych pokrywa jest zazwyczaj zamknięta, natomiast w obecności substancji hydrofobowych otwiera się częściowo, co wpływa na aktywność enzymu. Taki mechanizm aktywacji charakterystyczny dla lipaz nazywany jest aktywacją międzyfazową [10,11]. Lipazy



Rys. 1. Zastosowanie enzymów w przemyśle

są szeroko wykorzystywane w przemyśle, od spożywczego przez biopaliwa, detergenty, aż po przemysł skórzany, tekstylny i papierniczy [12, 13, 14]. Są one uznawane za jedną z najważniejszych grup enzymów na rynku, a prognozy dla międzynarodowego rynku lipaz sugerują, że do 2025 roku ich sprzedaż przekroczy 797,7 milionów USD. O tym jak duże znaczenie mają lipazy dla wielu procesów chemicznych świadczą liczne badania naukowe oraz przeglądy na ich temat opublikowane w ostatnich latach [12, 15-23].

### Zalety stosowania enzymów w katalizie przemysłowej

Biokataliza jest szeroko wykorzystywana w różnych sektorach przemysłowych jako alternatywa dla katalizy chemicznej. Liczne zastosowanie katalizy enzymatycznej w przemyśle zawdzięczamy jej znacznemu rozwojowi w ostatnich dwóch dekadach [24]. Coraz więcej cząsteczek jest syntetyzowanych za pomocą enzymów, dzięki znaczącym postępom w rozwoju hodowli enzymów i inżynierii białek, a także dużemu znaczeniu zielonej chemii w produkcji przemysłowej [25].

Enzymy wykazują nadzwyczajną aktywność katalityczną, co pozwala na przereagowanie substratu w łagodnych warunkach temperatury i ciśnienia. Dodatkowo ich biodegradowalność, wysoka selektywność i specyficzność substratowa sprawiają, że znacząco redukują ilość generowanych niebezpiecznych odpadów w trakcie produkcji. Wysoka enancjoselektywność i specyficzność substratowa są niezwykle istotne przede wszystkim dla sektora farmaceutycznego, gdyż produkcja wielu leków i substancji aktywnych przebiega przez etap, w którym wysoka enancjoselektywność procesu jest wymagana [26, 28, 27]. Szybki postęp techniczny w dziedzinach biologii molekularnej, biochemii i biotechnologii umożliwił skuteczne wykorzystanie wielu enzymów jako biokatalizatorów w procesach przemysłowych. Dzięki rozwojowi technologii, naukowcy są w stanie coraz dokładniej analizować, modyfikować i wytwarzać

enzymy o pożądanych właściwościach. Oznacza to, że możliwe jest zaprojektowanie substratów białka pod konkretne właściwości oraz procesy chemiczne, co jest ogromną zaletą, gdyż w efekcie mogą być wykorzystane w szerokim spektrum przemysłowych procesów chemicznych. Z tego względu enzymy są atrakcyjną alternatywą dla tradycyjnych katalizatorów wykorzystywanych w procesach chemicznych [26]. Pomimo znaczących postępów w tych dziedzinach, wciąż istnieją wyzwania związane ze stabilnością enzymów oraz kosztami produkcji i zastosowaniem w przemyśle. Z tego względu kontynuacja badań nad poprawą stabilności enzymów oraz redukcja kosztów ich produkcji są kluczowymi zagadnieniami dla badaczy na całym świecie, aby wykorzystanie enzymów jako biokatalizatorów w przemyśle mogło być efektywne i ekonomiczne [2, 24, 26, 27].

### Zastosowanie enzymów w przemyśle

Udział procesów biokatalitycznych w przemyśle chemicznym znacząco rośnie, znajdując zastosowanie w różnych jego segmentach [29, 30]. W ostatnich latach obserwowany jest dynamiczny wzrost wykorzystania enzymów w przemyśle chemicznym, co głównie wynika ze wzrastających wymogów środowiskowych i ekonomicznych produkcji [30, 31]. W Tabeli 1 zestawiono przykłady zastosowania enzymów jako biokatalizatorów w produkcji różnych chemikaliów.

Rozdzielanie mieszanin racemicznych poprzez enancjoselektywną enzymatyczną reakcję jest stosowane w wielu produkcjach chiralnych substancji. Firma BASF opracowała zoptymalizowaną metodę otrzymywania optycznie aktywnych amin takich jak: ChiPros® NP-1-(1-Naftyl)etyloamina, ChiPros® NP-1-(3-metoksyfenyl)etyloamina, ChiPros® NP-1-(4-metoksyfenyl)etyloaminanp. Wykorzystującą katalizę z użyciem lipazy B z *Candida antarctica*, która może być skalowana nawet do produkcji kilku tysięcy ton [32, 43, 44]. Produkty chiralne są niezwykle istotne dla przemysłu

Tabela 1. Zastosowanie enzymów w przemyśle chemicznym

Firma	Enzym	Surowiec	Produkt	Skala produkcji [ton/rok]	Literatura
BASF	Lipaza B z <i>Candida antarctica</i>	Racemat 1-fenylloetyloaminy	Aminy chiralne	1000	[32]
BASF	Nitrylaza	Cyjanohydryny	Kwas NP-migdałowy	Multi tysiące	[33]
Qingdao Kehai Biochemistry Company	<i>Aspergillus terreus</i>	Cukry proste	Kwas itakonowy	10 000 000	[34, 35]
Royal DSM z Roquette Frères	<i>Escherichia coli</i>	Pochodne skrobi	Kwas bursztynowy	10 000	[36, 37]
Orlen Południe	<i>Lactobacillus acidophilus</i>	Melasa	Kwas mlekowy	5000	[38,39]
BASF	<i>Rhodococcus rhodochrous</i>	Akrylonitryl	Akryloamid	50 000	[40, 41]
Chemie Linz	Świńska lipaza trzustkowa	Racemat kwasu 2-halopropionowego	Herbicydy fenoksypropionowe	0,1	[32]

farmaceutycznego oraz agrochemicznego, ponieważ produkuje się z nich masowo substancje lecznicze i produkty rolne [34]. Poza aminami chiralnymi, firma BASF produkuje kwas np. migdałowy z wykorzystaniem biokatalizatorów na skalę wielu tysięcy t/rok. Produkcja polega na enancjoselektywnej hydrolizie cyjanohydrin za pomocą nitrylaz. W efekcie powstaje tylko jeden enancjomer kwasu migdałowego, podczas gdy niewykorzystana cyjanohydryna ulega racemizacji, a pożądaną kwas np. migdałowy akumuluje się z wysoką efektywnością i znacznym nadmiarem enancjomerycznym. Produkt ten ma istotne znaczenie dla przemysłu farmaceutycznego oraz kosmetycznego. Kwas migdałowy jest jednym z głównych odczynników chemicznych stosowanych w syntezie leków, a jego korzystne działanie na skórę sprawia, że jest wykorzystywany w produkcji kosmetyków [33, 45-47]. Kwas itakonowy, będący jednym z kluczowych składników dla przemysłu polimerowego, został wprowadzony do produkcji na dużą skalę przy wykorzystaniu grzyba nitkowatego *Aspergillus terreus* przez firmę Qingdao Kehai Biochemistry Company. Proces umożliwia produkcję kwasu itakonowego z surowców odnawialnych na skalę 10 000 Mt/rok [34, 35]. Innym istotnym produktem otrzymywanym z udziałem enzymów jest kwas bursztynowy. Firma DSM i Roquette Frères opracowały wspólnie metodę produkcji biokwasu bursztynowego na bazie fermentacji opartej na drożdżach *Escherichia coli*. Dużą zaletą procesu jest możliwość stosowania niższego pH w odróżnieniu od konkurencyjnych metod, co pozwala na otrzymanie kwasu bursztynowego o wysokiej wydajności, przy niższym zużyciu energii. Należy zaznaczyć, że jest to pionierski proces biologiczny, który po raz pierwszy wykorzystuje sekwestrację dwutlenku węgla w trakcie produkcji. Skala produkcji biokwasu bursztynowego wynosi ok. 10 000 t/rok [36, 37]. W zakładzie Orlen Południe produkowany jest od 2022 roku kwas mlekowy z użyciem mikroorganizmów na skalę 5000 t/rok. Głównym surowcem w produkcji biokwasu mlekowego jest melasa, która jest odpadem po produkcji cukru. Zapotrzebowanie na kwas mlekowy stale rośnie, a produkt ten ma szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu [31]. Enzymatyczna produkcja akryloamidu z akrylonitrylu przez firmę BASF to innowacyjny proces, który wykorzystuje enzym *Rhodococcus rhodochrous* [40, 41]. Tradycyjnie akryloamid jest otrzymywany w obecności katalizatora tlenu miedzi lub platyny. Metoda enzymatyczna oferuje wiele korzyści, w tym większą selektywność procesu, niższe koszty energetyczne i mniejsze ilości odpadów. Akryloamid jest produkowany na dużą skalę ok. 50 000 ton/rok, co świadczy o szerokim zapotrzebowaniu tego związku chemicznego przez różne branże przemysłowe, np. w oczyszczaniu ropy naftowej [40]. Innym procesem produkcyjnym

wykorzystującym enzymy jest produkcja środków chwastobójczych przez firmę Chemie Linz. Metoda polega na selektywnym rozdzielaniu kwasów 2-halopropionowych w obecności świńskiej lipazy trzustkowej w celu otrzymania herbicydów fenoksypropionowych stosowanych jako środki chwastobójcze w rolnictwie. Skala produkcyjna w tym przypadku wynosi 0,1 t/rok [32].

Firma Kaneka zyskała uznanie jako pionier w dziedzinie biokatalizy, wyprzedzając swoich konkurentów poprzez innowacyjne podejścia i zaawansowane technologie. Jednym z kluczowych produktów, który wyróżnia Kanekę na tle innych firm, jest jej doskonała produkcja biodegradowalnego polimeru KANEKA Green Planet poprzez biokatalizę w której stosują mikroorganizmy, a zdolność produkcyjna sięga 20 000 t/rok. Biodegradowalne polimery stanowią ważną alternatywę dla tradycyjnych tworzyw sztucznych, ponieważ mogą ulec rozkładowi biologicznemu pod wpływem mikroorganizmów, co przyczynia się do zmniejszenia obciążenia środowiska naturalnego [48]. Firma Pfizer to jedna z największych i najbardziej znanych firm farmaceutycznych na świecie, znana ze swojej zaawansowanej technologii i innowacyjności w dziedzinie produkcji leków. W ramach swoich działań, Pfizer stosuje różnorodne metody i technologie, w tym również biokatalizę, aby syntezować swoje produkty. Dla przykładu, produkowany w skali 120 000 t/rok Liptor, lek wykorzystywany w leczeniu różnych schorzeń, w tym depresji, zaburzeń lękowych i innych zaburzeń psychicznych jest otrzymywany w wieloetapowym procesie, w którym wykorzystuje się biokatalizę do przeprowadzenia istotnych etapów syntezy, co pozwala na bardziej efektywną i ekologiczną produkcję tego leku. Podobnie jak w przypadku Liptoru, lek Cibinqo stosowany w leczeniu chorób autoimmunologicznych, takich jak reumatoidalne zapalenie stawów, również otrzymywany jest w procesie wykorzystującym biokatalizę [49, 50].

## Immobilizacja enzymów

Enzymy, pomimo wielu zalet stosowania mają znaczącą wadę, którą jest niska stabilność w zmiennych warunkach środowiska reakcji, oraz problem z wydzielaniem białka z mieszaniny reakcyjnej i jego zawrotem. Do dzisiaj opracowano wiele metod stabilizacji enzymów podnoszących ich odporność mechaniczną i termiczną, a czasami również aktywność katalityczną [51]. Jedną z najpopularniejszych metod zwiększających stabilność białek jest ich immobilizacja. Immobilizacja enzymów polega na połączeniu białka ze stałym nośnikiem w celu całkowitego lub częściowego unie-

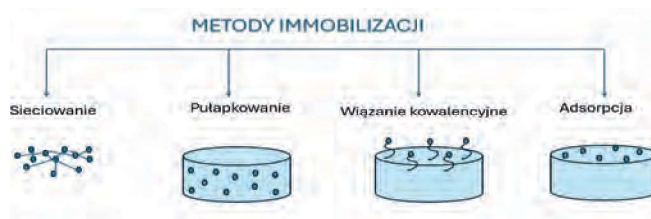


Tabela 2. Zastosowanie immobilizowanych enzymów w przemyśle

Firma	Enzym	Surowiec	Produkt/składnik spożywczy	Nośnik	Literatura
Unilever, Fuji Oil Company	Lipaza z <i>Rhizopus miehei</i>	Mieszany środkowej frakcji palmowej i kwasu stearynowego	Odpowiednik masła kakaowego	Ziemia okrzemkowa	[25]
Archer Daniels Midland (ADM)	Lipaza z <i>Thermomyces lanuginosus</i>	Kwasy tłuszczowe	Margaryny i tłuszcze piekarskie	Żywica polimerowa	[25]
Firma IOI-Loders Crocklaan z Rotterdamu	lipazy z <i>Thermomyces lanuginosus</i>	Składnik stearyny palmowej	Betapol	Brak	[25]
Desmet, Ballestra	Lipaza B z <i>Candida Antarctica</i> (Novozym 435).	Wolne kwasy tłuszczowe	Biodiesel	Żywica akrylowa	[57-59]

ruchomienia [26]. Immobilizacja enzymów może być zrealizowana przez zastosowanie różnych technik, takich jak: immobilizacja fizyczna (adsorpcja lub pułapkowanie) i immobilizacja chemiczna (wiązanie kowalencyjne i sieciowanie), które przedstawiono na rys. 2. [25]. Metoda immobilizacji adsorpcyjnej jest najprostszą oraz najtańszą techniką unieruchamiania enzymów i zależy głównie od oddziaływań nośnik-enzym. Pomiędzy nośnikiem a enzymem tworzą się oddziaływania jonowe, wiązania wodorowe lub siły Van der Waalsa [52-54]. Technika wiązania białka pozwala na związanie enzymu z powierzchnią nośnika za pomocą wiązań kowalencyjnych. W opisanym warunkiem koniecznym jest możliwość funkcjonalizacji powierzchni matrycy w celu utworzenia wiązań pomiędzy białkiem a nośnikiem. Grupami funkcyjnymi białka, które biorą udział w utworzeniu wiązania z nośnikiem są np. grupy: aminowe, fenolowe, imidazolowe i tionyloze. Wadą tej metody jest możliwość częściowej dezaktywacji białka podczas procesu immobilizacji [53]. Sieciowanie polega na utworzeniu wiązań kowalencyjnych pomiędzy cząsteczkami enzymów lub ich agregatów za pomocą czynników sieciujących, takich jak aldehyd glutarowy. Metoda ta jest skomplikowana w wykonaniu, a białko często wykazuje niższą aktywność katalityczną, natomiast sieciowane enzymy cechuje bardzo wysoka stabilność [55-57]. Immobilizacja enzymu poprzez pułapkowanie polega na polimeryzacji monomeru lub polimeru o niskiej masie cząsteczkowej wokół białka, co prowadzi do jego unieruchomienia. Pułapkowanie również jest metodą skomplikowaną w wykonaniu, a enzym częściowo traci swoją aktywność podczas procesu unieruchamiania, jednakże stabilność immobilizowanego tą techniką białka jest bardzo wysoka [54]. Podczas wyboru sposobu unieruchomienia enzymu należy wziąć pod uwagę czynniki, takie jak: tolerancja enzymu na warunki chemiczne i fizyczne związane z immobilizacją, charakterystyka powierzchni matrycy, właściwości hydrofilowe/hydrofobowe materiału i możliwość jego funkcjonalizacji [54, 55].

W przemyśle coraz częściej wybiera się enzymy immobilizowane, zamiast ich formy natywnej, ze względu na fakt, że są bardziej stabilne, ich separacja z mieszaniny reakcyjnej jest prosta (np. poprzez filtrację) oraz jest możliwość ich zawrotu do kolejnego cyklu reakcyjnego. Dodatkowo immobilizowane enzymy można wykorzystać w syntezie ciągłej, która umożliwia redukcję operacji jednostkowych w produkcji, oferuje łatwiejsze przeskalowanie procesu oraz otrzymanie produktów o bardzo wysokiej czystości i jakości. Podczas wyboru metody immobilizacji enzymu do zastosowań w przemyśle powinno kierować się prostotą i szybkością wykonania, ekonomicznością oraz powtarzalnością. Proste metody immobilizacji enzymów umożliwiają lepszą analizę cyklu życia (LCA), promując bardziej ekologiczną produkcję przemysłową oraz gospodarkę w obiegu zamkniętym [26].



Rys. 2. Metody immobilizacji enzymów

## Zastosowanie immobilizowanych enzymów w przemyśle

Wykorzystanie enzymów jako biokatalizatorów niesie za sobą wiele zalet, takich jak łagodne warunki reakcji, zdolność do biodegradacji oraz wysoka efektywność katalityczna. Niemniej jednak, surowe warunki przemysłowych procesów mogą prowadzić do destabilizacji enzymów, co skraca ich żywotność w skali przemysłowej. W odpowiedzi na te wyzwania, technologia immobilizacji enzymów stanowi skuteczne rozwiązanie, poprawiając ich katalityczne właściwości oraz stabilność operacyjną [24, 25, 56]. W tabeli 2 zestawiono przykłady zastosowania immobilizowanych enzymów jako biokatalizatorów w produkcji różnych chemikaliów.

Firma Unilever wytwarza zamiennik masła kakaowego z mieszaniny środkowej frakcji palmowej z kwasem stearynowym z wykorzystaniem biokatalizy. W tym procesie stosowana jest lipaza z *Rhizopus niveus* unieruchomiona poprzez adsorpcję na ziemi okrzemkowej. Inna firma Fuji Oil Company również opracowała proces wykorzystujący 1,3-specyficzną lipazę z *Rhizopus niveus* zaadsorbowaną na tym samym nośniku w celu wyprodukowania substytutu masła kakaowego z kwasów tłuszczowych, nadającego się do produkcji czekolady [25]. Firma Archer Daniels Midland (ADM) wykorzystuje enzymatyczną interstryfikację w produkcji olejów interstryfikowanych za pomocą immobilizowanej lipazy z *Thermomyces lanuginosus*. Przedsiębiorstwo to zdobyło nagrodę Presidential Green Chemistry Award od Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska za wprowadzenie opisanego nowatorskiego procesu [20]. Kolejnym innowacyjnym zastosowaniem lipaz w przemyśle jest produkcja Betapolu przez firmę IOI-Loders Crocklaan z Rotterdamu. Produkt ten został stworzony w celu dokładnego naśladowania składu tłuszczu i struktury mleka kobiecego. W procesie wytwarzania modyfikowanego mleka z wolnych kwasów tłuszczowych wykorzystuje się immobilizowaną na żywicy akrylowej lipazę B z *Candida Antarctica* (Novozym 435) [60]. Innym przykładem zastosowania immobilizowanych enzymów jest produkcja biodiesla przez firmę Desmet Ballestra. Desmet Ballestra jest zdecydowanym pionierem w produkcji biodiesla na świecie,

zdolność produkcyjna wynosi od 50 000 do 500 000 t/rok, spełniając przy tym najbardziej rygorystyczne międzynarodowe specyfikacje. Firma zbudowała obecnie 103 wytwórnię biodiesla na świecie [61]. Synteza biodiesla za pomocą enzymów stanowi korzystną alternatywę dla tradycyjnych metod chemicznych. W przeciwieństwie do procesów chemicznych, które mogą generować odpady i zużywać więcej energii, enzymatyczna synteza biodiesla oferuje bardziej efektywny i przyjazny dla środowiska sposób produkcji biopaliwa. Dodatkowo, możliwość wykorzystania surowców alternatywnych, takich jak oleje i tłuszcze zwierzęce z recyklingu, zwiększa elastyczność i zrównoważenie całego procesu produkcyjnego [62].

## Podsumowanie

Zastosowanie enzymów jako katalizatorów w produkcjach przemysłowych wspiera przede wszystkim idee zrównoważonego rozwoju oraz wdrażanie zielonych i czystych technologii. Technologie wykorzystujące enzymy charakteryzuje wysoka selektywność i wydajność produkcji, łagodne warunki i wysokie bezpieczeństwo procesowe oraz otrzymywanie produktów o wysokiej czystości i jakości. Wdrażanie rozwiązań biotechnologicznych w przemyśle chemicznym odpowiada na wiele regulacji, norm oraz dyrektyw przyjętych przez Komisję Europejską i Radę. Do najważniejszych możemy zaliczyć Agendę 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju (ONZ), normę ISO 14001:2015, regulację europejskiego rejestru emisji i transferu odpadów (EC 166/2006, 01.2006), dyrektywy dotyczące emisji przemysłowych – zintegrowana prewencja i kontrola zanieczyszczeń (2010/75/UE, 11.2010) oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych w UE (RED III, EU/2023/2413, 11.2023), a także plan „Ku zerowemu zanieczyszczeniu powietrza, wody i gleby” (05.2021) i plan działania dotyczący gospodarki w obiegu zamkniętym (03.2020). Przedstawione w niniejszym artykule przykłady zastosowań enzymów w produkcji przemysłowej potwierdzają ogromny potencjał wdrażania zielonych technologii w przemyśle chemicznym najbliższej przyszłości.

**Anna TABASZEWSKA**, obecnie studentka trzeciego roku studiów na kierunku Technologia Chemiczna, o specjalizacji Technologia Organiczna, na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej. Moje zainteresowania naukowe to biokatalizacja transformacji procesów chemicznych na bardziej ekologiczne. Dodatkowo aktywnie uczestniczę w życiu naukowym jako członek koła naukowego.

**Mgr inż. Anna WOLNY** (ORCID 0000-0003-1843-8791) od 2020 roku doktorantka w dyscyplinie inżynieria chemiczna na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej. W ramach pracy doktorskiej prowadzi badania nad projektowaniem aktywnych, stabilnych i heterogenicznych układów dla poprawy jakości, ekologiczności i ekonomiczności procesów chemicznych. Laureatka konkursów, takich jak PRELUDIUM22 organizowanego przez NCN oraz „Drive Innovations – Rozwiązania dla Zrównoważonego Rozwoju” organizowanego przez firmę BASF, a także współautorka licznych publikacji naukowych, zgłoszeń patentowych i uczestniczka wielu konferencji naukowych o wymiarze krajowym i międzynarodowym.

## LITERATURA

- [1] „Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030” Organizacja Narodów Zjednoczonych. Rezolucja przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne w dniu 25 września 2015 r.
- [2] Aditya K., Lavanya K.S., Jaya P., Mohit M., Prasanna K. S., Green catalysis for chemical transformation: The need for the sustainable development, *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, 2022, 5
- [3] Sheldon, R.A., Woodley, J.M., Role of biocatalysis in sustainable chemistry. *Chem. Rev.* 2018, 118, 801–838.
- [4] Lewis T., Stone W. L., *Biochemistry, Proteins Enzymes*, StatPearls Publishing, 2023.
- [5] Selvaraj C., Rudhra O., Alothaim A. S., Alkhanani M., Singh S. K., Structure and chemistry of enzymatic active sites that play a role in the switch and conformation mechanism, *Adv. Protein Chem. Struct. Biol.*, 2022, 130, 59–83.
- [6] Pytko M., Janas P., Kordowska-Wiater M., Wybrane enzymy pochodzenia mikrobiologicznego stosowane w przemyśle spożywczym, *Przemysł Spożywczy*, 12, 2019, 28–32.
- [7] Porto de Souza Vandenberghe L., Karp S. G., Binder Pagnoncelli M. G., von Linsingen Tavares M., Ne Libardi N., Valladares Diestra K., Aparecida Viesser J., Soccol C. R., Chapter 2 – Classification of enzymes and catalytic properties, *Biomass, Biofuels, Biochemicals*, 2020, 11–30.
- [8] Robinson P. K., *Enzymes: principles and biotechnological applications*, *Essays Biochem.*, 2015, 59, 1–41.
- [9] Kuo T. M., Gardner H., *Lipid Biotechnology*. CRC Press, 2002, 1.
- [10] Khan F. I., Lan D., Durrani R., Huan W., Zhao Z., Wang Y., The Lid Domain in Lipases: Structural and Functional Determinant of Enzymatic Properties. *Front Bioeng. Biotechnol.*, 2017, 5, 16
- [11] Arana-Peña S., Rios N. S., Carballeas D., Gonçalves L. R.B., Fernandez-Lafuente R., Immobilization of lipases via interfacial activation on hydrophobic supports: Production of biocatalysts libraries by altering the immobilization conditions, *Catalysis Today*, 2021, 362, 130–140.
- [12] Ali S., Khan SA, Hamayun M, Lee IJ. The Recent Advances in the Utility of Microbial Lipases: A Review. *Microorganisms.*, 2023, 17, 11.
- [13] Mehta A., Guleria S., Sharma R., Gupta R., 6 – The lipases and their applications with emphasis on food industry, *Microb. Biotechnol. Food Health*, 2021, 143–164.
- [14] Król M., *Enzymy w przemyśle spożywczym*, *J. NutriLife*, 2014, 4, 2300–8938.
- [15] Ashok K., Sharma P., Lipase-catalyzed ester synthesis in organic media, *A Review*, 2012, 2, 91–119
- [16] Chandra P., Enespa, Singh R., Arora P.K., Microbial lipases and their industrial applications: a comprehensive review. *Microb. Cell. Fact.* 2020, 26, 19, 169.
- [17] Lakshmi, L.B., Audipudi A. V., Biochemical Characterization of Extracellular Lipase from an Improved Strain of *Penicillium Citrinum* KU613360, *Ann. Rom. Soc. Cell Biol.*, 2021, 25, 7758–7770.
- [18] Ma X., Kexin Z., Yonggang, W., Ebadi A. G., Toughani M., Optimization of Low-Temperature Lipase Production Conditions and Study on Enzymatic Properties of *Aspergillus Niger* Iran, *J. Chem. Chem. Eng.*, 2021, 40, 1364–1374.
- [19] Yang, X., Zhang, Y., Pang, H., Yuan, S., Wang, X., Hu, Z., Zhou, Q., He Y., Yan, Y., Xu L., Codisplay of *Rhizopus oryzae* and *Candida rugosa* lipases for biodiesel production. *Catalysts* 2021, 11, 421.
- [20] Phukon L. C., Chourasia R., Kumari M., Godan T. K., Sahoo D., Parameswaran B., Rai A. K., Production and characterisation of lipase for application in detergent industry from a novel *Pseudomonas helmanticensis* HS6, *Bioresour Technol.*, 2020, 309.
- [21] Szelwicka, A., Erfurt, K., Jurczyk, S., Boncel, S.; Chrobok, A. Outperformance in Acrylation: Supported D-glucose-based ionic liquid phase on MWCNTs for immobilized lipase B from *Candida antarctica* as catalytic system. *Materials* 2021, 14, 3090.
- [22] Drożdż, A.; Chrobok, A.; Baj, S.; Szymańska, K.; Mrowiec-Białoń, J.; Jarzębski, AB Chemo-enzymatyczne utlenianie Baeyera-Villigera cyklicznych ketonów z wykorzystaniem wydajnej lipazy na nośniku krzemionkowym jako biokatalizatora. *Appl. Katal. A Gen.* 2013, 467, 163–170.
- [23] Szelwicka, A.; Chrobok, A. Metody zwiększania aktywności i stabilności enzymów w procesach prowadzonych w obecności cieczy jonowych. *Przem. Chem.* 2018, 97, 89–93.
- [24] Wu S., Snajdrova R., Moore J. C., Baldenius K., Bornscheuer U. T., *Biocatalysis: Enzymatic Synthesis for Industrial Applications*, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2021, 4, 60, 88–119.
- [25] Basso A., Serban S., *Industrial applications of immobilized enzymes—A review*, *Mol. Catal*, 2019, 479.
- [26] Imam H. T., Marr P. C., Marr A.C., Enzyme entrapment, biocatalyst immobilization without covalent attachment, *Green Chem.*, 2021, 23.
- [27] Nowak D. Enzymy jako nowoczesne narzędzie technologiczne. *Agro Przem.*, 2008, 28 – 30.
- [28] Coelho M. M., Fernandes C., Remião F., Tiritan M.E., Enantioselectivity in Drug Pharmacokinetics and Toxicity: Pharmacological Relevance and Analytical Methods., *Molecules*, 2021, 26, 3113.
- [29] Schmid A., Dordick J. S., Hauer B., Kiener A., Wubbolts M., Witholt B., *Industrial biocatalysis today and tomorrow*. *Nature*, 2001, 409, 258–68.
- [30] Bednarski W., J. Fiedurek, M. Adamczyk, R. Gawroński, J. Leman, K. Szewczyk. *Podstawy biotechnologii przemysłowej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2015.
- [31] Choi J.M., Han S.S., Kim H.S., Industrial applications of enzyme biocatalysis: Current status and future aspects. *Biotechnol. Adv.*, 2015, 33, 1443–54.
- [32] ChiralVision, *Industrial Biocatalysts*, *Biocatalysis with Standard Hydrolytic Bulk Enzymes*, *Speciality Chem. Magazine*, 2007, 27, 8.
- [33] Thayer A. M., *Biocatalysis helps reach a resolution*, *Chem. I & Eng. News*, 2006, 84, 29–31.
- [34] Willke T., Vorlop K.D., *Biotechnological production of itaconic acid*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2001, 56, 289–95.



- [35] Cunha da Cruz J., Machado de Castro A., Camporese SÉrvulo E.F., World market and biotechnological production of itaconic acid. 3 Biotech. 2018, 138.
- [36] Li C., Ong K.L., Cui Z., Sang Z., Li X., Patria R.D., Qi Q., Fickers P., Yan J., Lin C.S.K., Promising advancement in fermentative succinic acid production by yeast hosts., J. Hazard. Mater. 2021, 401.
- [37] <https://www.dsm.com/corporate/news/news-archive/2011/36-11-dsm-and-roquette-to-open-commercial-scale-bio-based-succinic-acid-plant-2012.html> 9 maja 2011.
- [38] <https://www.orlen.pl/pl/o-firmie/media/komunikaty-prasowe/2022/kwiecien/W-ORLEN-Poludnie-powstaje-innowacyjny-bioproduct> 13 kwiecień 2022.
- [39] Bangar S.P., Suri S., Trif M., Ozogul F., Organic acids production from lactic acid bacteria: A preservation approach, Food Biosci., 2022, 46.
- [40] Abdelraheem E. M. M., Busch H., Hanefeld U., Tonin F., Biocatalysis explained: from pharmaceutical to bulk chemical production, React. Chem. Eng., 2019, 4, 1878-1894.
- [41] <https://www.bionity.com/en/news/165409/basf-inaugurates-enzyme-based-production-plant-for-biocatalyzed-acrylamide.html> 24.10.2017.
- [43] <https://products.basf.com/global/en/ci/chipros-r-4-meo-pea.html>
- [44] <https://www.sigmaaldrich.com/PL/pl/technical-documents/technical-article/chemistry-and-synthesis/reaction-design-and-optimization/chipros-chiral-amines>
- [45] <https://products.basf.com/global/en/ci/30154849.html>
- [46] Choińska R., Dąbrowska K., Świsłocka R., Lewandowski W., Świergiel A.H., Antimicrobial Properties of Mandelic Acid, Gallic Acid and their Derivatives, Mini. Rev. Med. Chem., 2021, 21, 2544-2550.
- [47] Jacobs S.W., Culbertson E.J., Effects of Topical Mandelic Acid Treatment on Facial Skin Viscoelasticity, Facial Plast. Surg., 2018, 34, 651-656.
- [48] <https://www.kaneka.co.jp/en/topics/news/2022/enr2202071.html>, 7 luty 2022.
- [49] Novozhilov Y. V., Dorogov M. V., Blumina M. V., Smirnov A.V., Krasavin M., An improved kilogram-scale preparation of atorvastatin calcium. Chem Cent J. 2015, 9, 7.
- [50] Grajales D. B., Sewdat N., Leo R., Kar S., Unveiling abrocitinib: A thorough examination of the 2022 USFDA-approved treatment for atopic dermatitis (AD), Med. Drug. Discov. 2023, 20
- [51] Khana M. R., Immobilized enzymes: a comprehensive review., Bull. Natl. Res. Cent., 2021, 45, 207.
- [52] Datta S., Christena L. R., Rajaram Y. R. S., Enzyme immobilization: an overview on techniques and support materials., 3 Biotech., 2013, 3, 1-9.
- [53] Mohamad N.R., Marzuki N.H., Buang N.A., Huyop F., Wahab R.A., An overview of technologies for immobilization of enzymes and surface analysis techniques for immobilized enzymes., Biotechnol Biotechnol Equip, 2015, 29, 205-220.
- [54] Michael J. Moehlenbrock, Shelley D. Minter, Introduction to the Field of Enzyme Immobilization and Stabilization, Methods in Mol. Biol., 2016.
- [55] Sirisha V.L., Jain A., Jain A., Enzyme Immobilization: An Overview on Methods, Support Material, and Applications of Immobilized Enzymes. Adv. Food Nutr. Res., 2016, 79, 179-21.
- [56] Maghraby Y.R., El-Shabasy R.M., Ibrahim A.H., Azzazy H.M.E., Enzyme Immobilization Technologies and Industrial Applications. ACS Omega. 2023, 8, 5184-5196.
- [57] José C., Austic G.B., Bonetto R.D., Burton R. M., Briand L.E., Investigation of the stability of Novozym® 435 in the production of biodiesel, Catal. Today, 2013, 213, 73-80.
- [58] Thangaraj B., Solomon P. R., Muniyandi B., Ranganathan S., Lin L., Catalysis in biodiesel production—a review, Clean Energy, 2019, 3, 2-23.
- [59] Maugard T., Rajasse B., Synthesis of Water-Soluble Retinol Derivatives by Enzymatic Method, Biotech. Progress, 2002, 18, 424-428.
- [60] <https://www.naturalproductsinsider.com/healthy-living/oi-loders-croklaan-awarded-worldwide-patents-for-betapol-1> kwiecień 2012
- [61] <https://biodieselmagazine.com/articles/natural-selection-of-biodiesel-process-technology-2516242> 3 stycznia 2018
- [62] Mathew G.M., Raina D., Narisetty V., Kumar V., Saran S., Pugazhendi A., Sindhu R., Pandey A., Binod P., Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions. Sci Total Environ., 2021, 794.

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT 

*Bądź eko*

*Korzystamy z zielonej energii*

**wybierz prenumeratę**  
*cyfrową*

**Warianty prenumeraty czasopism**

**PRENUMERATA cyfrowa** - czasopismo wyłącznie w wersji cyfrowej dostępne na Portalu Informacji Technicznej [www.sigma-not.pl](http://www.sigma-not.pl), prenumeratorka otrzyma link aktywacyjny do zaprenumerowanego tytułu;

**Pakiet PLUS** - czasopismo w wersji papierowej (bez doliczanej opłaty za jej dostarczenie) oraz w wersji cyfrowej, wraz z dostępem do archiwum zaprenumerowanego tytułu na Portalu Informacji Technicznej [www.sigma-not.pl](http://www.sigma-not.pl); prenumeratorka otrzyma link aktywacyjny do zaprenumerowanego tytułu;

**PRENUMERATA papierowa** - czasopismo tylko w wersji papierowej (za jego dostarczenie doliczamy opłatę).

więcej informacji: 22 840 30 86, [prenumerata@sigma-not.pl](mailto:prenumerata@sigma-not.pl)  
[portal@sigma-not.pl](mailto:portal@sigma-not.pl)