



# Biodegradacja wybranych związków organicznych przy użyciu organizmów *White Rot Fungi* (cz. II)

Iwona Krzyżewska, Aleksandra Kozarska

Obecnie obserwowany jest wzrost stężenia związków organicznych, farmaceutyków i środków higieny osobistej w środowisku wodnym, które stanowią balast na oczyszczalniach ścieków. Poszukiwane są wciąż nowe metody i sposoby oczyszczania ścieków oraz usunięcia wysokich stężeń ksenobiotyków ze środowiska wodnego. Grzyby z rodzaju *White Rot Fungi* wydzielają enzymy ligninolityczne, takie jak: peroksydaza ligninowa, peroksydaza manganowa oraz lakaza, które zdolne są do biodegradacji trwałych związków organicznych, związków organicznych o złożonej budowie oraz budowie podobnej do struktury ligniny.

## Zastosowanie WRF

Grzyby zgnilizny białej i produkowane przez nie enzymy modyfikujące ligninę są zdolne do degradacji szerokiej gamy śladowych zanieczyszczeń organicznych podejrzewanych o niekorzystny wpływ na zdrowie ludzkie oraz kondycję fauny i flory. W związku z niewystarczającą efektywnością usuwania zanieczyszczeń organicznych, np. farmaceutyków i produktów higieny osobistej w oczyszczalniach ścieków niektóre substancje są wciąż często wykrywane w wodach, do których wprowadzane są oczyszczone ścieki. Chociaż zanieczyszczenia występują w środowisku w stężeniach w zakresie od kilku nanogramów do kilku mikrogramów na litr, mogą wciąż wywierać szkodliwy wpływ na gatunki zamieszkujące środowiska wodne. [12]

Powszechnie, w celu skutecznej eliminacji hydrofobowych i/lub łatwo biodegradowal-

nych śladowych związków organicznych, tj. ibuprofenu i bisfenolu A, stosowane są procesy biologicznego oczyszczania ścieków, m.in. poprzez zastosowanie konwencjonalnego osadu czynnego lub bioreaktorów membranowych. Jednakże słabe lub niestabilne wyniki otrzymuje się dla wysoce hydrofilowych i odpornych na biologiczne działanie zanieczyszczeń organicznych, takich jak karbamazepina i diklofenak. Ostatnio spore zainteresowanie budzą grzyby zgnilizny białej w związku z ich specyficznymi zdolnościami degradacji śladowych zanieczyszczeń organicznych. Odnotowano możliwości degradacji takich zanieczyszczeń jak barwniki azowe, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, chlorofenole, nitrotolueny i polichlorowane bifenyle przez WRF. Jednocześnie nie podlegają one rozkładowi przez bakterie. Oprócz wykorzystania całych komór-

rek kultury szczepów, alternatywa, rozdzielająca rozwój grzybów i etap bioremediacji, wykorzystuje ekstrakt pozakomórkowe w postaci oczyszczonych enzymów. System enzymów wewnątrzkomórkowych, tj. cytochrom P450 odgrywa ważną rolę w usuwaniu niektórych zanieczyszczeń śladowych. [12]

Ogólnie rzecz biorąc, związki o silnych grupach elektronodonorowych EDG, takich jak aminowa (-NH<sub>2</sub>), hydroksylowa (-OH), alkoksylowa (-OR), alkilowa (-R) i acylowa (-COR), ulegają skutecznej eliminacji. WRF prowadziły do wysokiego usunięcia związków fenolowych, tj. nonylofenolu, bisfenolu A, bisfenolu B i bisfenolu F oraz hormonów, posiadających grupy hydroksylowe (-OH) w swojej strukturze [12].

Związki zawierające silne grupy elektroakceptorowe EWG są trudne do usunięcia (grupy amidowe -CONR<sub>2</sub>,

karboksylowe -COOH, halogenowe -X i nitrowe -NO<sub>2</sub>). Przykładem może być karbamazepina, zawierająca grupę amidową, wysoce odporną na degradację bakteryjną. Odnotowano brak skuteczności lub bardzo niską eliminację karbamazepiny przez szczepy grzybów WRF, takie jak *I. lacteus* (2%) i *P. chrysosporium* (0%) w przypadku zastosowania początkowego stężenia na poziomie 10 mg/l związku. [12]

Grzyby zgnilizny białej są szeroko wykorzystywane do poprawienia strawności paszy w przypadku pokarmu dla zwierząt. Ich użycie jako etap przygotowania biomasy lignocelulozowej przed fermentacją beztlenową jest wciąż stosunkowo nowe. Wstępne przygotowanie z wykorzystaniem WRF opiera się na złożonych mechanizmach, związanych z bogatym systemem enzymatycznym, polegającym na degradacji ligni-



ny i wiązań estryfikowanych fenolowych kwasowych, jak również hydrolizie hemiceluloz i celulozy. W celu zmaksymalizowania produkcji metanu z biomasy lignocelulozowej, niezwykle istotny jest brak ligniny. Ponadto pewne modyfikacje węglowodanów przez WRF mogą ułatwić fermentację: w pewnych przypadkach krystaliczna struktura celulozy może ulec naruszeniu, a rozgałęzione związki hemicelulozy zostają usunięte. Jednakże należy unikać strat wysoce fermentujących cukrów, a selektywna eliminacja ligniny jest kluczowa w celu ograniczenia utraty materii. Dlatego też szczepy WRF powinny być starannie wyselekcjonowane, a warunki prowadzenia wstępnego przygotowania muszą zostać zoptymalizowane. Te warunki obejmują zawartość wody, napowietrzanie, temperaturę, uzupełnienie składników żywnościowych i czas trwania wstępnego przygotowania, ponieważ fermentacja na podłożu stałym jest najbardziej odpowiednia dla wstępnego przygotowania biomasy lignocelulozowej. [13]

Satysfakcjonujące rezultaty osiągnięto w procesach podnoszenia zawartości białka z wykorzystaniem technik mikrobiologicznych. Przykładem może być skórka manioku, cienka brązowa zewnętrzna osłona z grubszą szorstką mięsową osłoną wewnętrzną, która traktowana jest jako odpad generowany podczas przetwarzania manioku do postaci jadalnej lub produktów przemysłowych. Skórka ta może stanowić do 10-20%

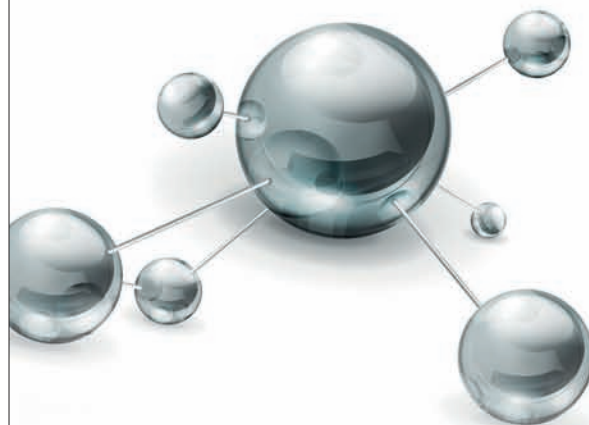
wagi mokrej korzeni, wskazując na jej ogromny potencjał w procesach biotechnologicznych i przemysłowych, w związku z powszechną dostępnością i niskim kosztem surowca. Jednakże obierki są traktowane jako odpady i wyrzucane, powodując poważne problemy środowiskowe, związane z ich rozkładem. Bardzo niewielka ilość jest wykorzystywana jako pasza dla zwierząt, w związku z niską zawartością białka, wysokim poziomem cyjanowodoru oraz dużą zawartością surowych włókien. W krajach rozwijających się maniok jest trzecim najważniejszym źródłem kalorii po pszenicy i ryżu. [14]

Część grzybów tworzy zarodniki, które mogą powodować problemy oddechowe w związku z ich niewielkimi rozmiarami, czy też wydzielają mykotoksyny, co przyczynia się do utrudnionego wykorzystania jako karma dla zwierząt. Dlatego też biokonwersji poddaje się grzyby białej zgnilizny niezarodnikujące, zdatne do spożycia. Jednym z najbardziej obiecujących szczepów jest lokalnie (Malezja) wyizolowany *Panus tigrinus*, wydzielający trzy enzymy, modyfikujące ligninę, degradujące cząsteczki budujące ścianę komórkową, syntetyzujące białko mikroorganizmów bez formowania zarodników [14].

Maksymalna produkcja enzymów jest jednym z głównych celów prowadzenia bioprocessów, obejmującym rozwój szczepów, optymalizację podłoża i pożywki. Stanowią one istotne narzędzia rozwoju procesu fermentacji w przemyśle. [14]

# WZORCE ANALITYCZNE

ISO 17025 i ISO GUIDE 34



PESTYCYDY, HERBICYDY  
NEONIKOTENOIDY  
WWA, LZO  
PCB, PBDE, CFR, PFR, BFR  
CHZT, BZT, TOC, TIC  
PRZEWODNOŚĆ, BARWA, MĘTNOŚĆ

## BOGATA OFERTA

SUBSTANCJE CZYSTE  
ROZTWORY, MIESZANINY  
CERTYFIKOWANE MATERIAŁY  
REFERENCYJNE

## RÓŻNORODNE METODY ANALITYCZNE

IC, UV-VIS, GC, HPLC,  
KOLORYMETRIA  
ICP, ICP-MS, ASA

## BADANIA BIEGŁOŚCI

RUNDY MIESIĘCZNE I KWARTALNE  
QUIK RESPONSE – raport w 2 dni!

**TH** TUSNOVICS  
INSTRUMENTS

www.tusnovics.pl  
tel. 12 633 13 54  
office@tusnovics.pl

WZORCE – CRM – PT ANALIZA ŚRODOWISKA



Parametry operacyjne, tj. zawartość wilgoci, wielkość inokulum, pH były identyfikowane jako najważniejsze w produkcji skórek manioku, wzbogaconych białkiem, stosowanych jako pasza dla zwierząt, w związku z ich wpływem na wzrost mikroorganizmów, wykorzystaniem podłoża i produkcją enzymów procesie fermentacji na podłożu stałym (SSF). Maksymalny wzrost zawartości białka (55,16%) zaobserwowano po 14 dniach prowadzenia fermentacji na podłożu stałym. [14]

Biomasa lignocelulozowa stanowi odnawialne źródło energii, zdolne do produkcji etanolu, ponieważ nie koliduje z celami w zakresie bezpieczeństwa żywności podobnie jak w przypadku innych źródeł energii, tj. kukurydzy czy pszenicy. Jeden z rodzajów biomasy lignocelulozowej, wykorzystywanej w Indonezji w celu produkcji bioetanolu, pochodzi z pustych kłosek owoców palmy olejowej (OPEFB). Dodatkowo należy nadmienić, iż Indonezja jest największym producentem oleju palmowego na świecie. Lignoceluloza składa się z celulozy, hemicelulozy, ligniny, materiałów ekstrakcyjnych i nieorganicznych substancji. Produkcja etanolu składa się z trzech głównych procesów: wstępnego przygotowania, hydrolizy i fermentacji. Obróbka wstępna jest wymagana do produkcji makroskopijnej i mikroskopijnej struktury biomasy, używanej do hydrolizy do cukrów ulegających fermentacji i rozerwania wiązań ligniny i hemicelulozy. Stosowaną metodą przygo-

towania wstępnego jest użycie chemikaliów alkalicznych NaOH. Podczas tego procesu produkowane są duże ilości ścieków, tzw. ługu czarnego. Czarny kolor jest głównie spowodowany procesem degradacji lignocelulozy i pośrednio mierzony ilością związków ligniny, obecnych w strumieniu odpływów. [15]

Ścieki ługu czarnego, jeśli dostaną się bezpośrednio do wody bez odpowiedniego wymaganego oczyszczania mogą wpłynąć szkodliwie na organizmy środowiska wodnego, m.in. na ryby, dafnie, plankton. Ścieki ługu czarnego zawierają 40% związków organicznych, 25% lignin, 7,5% hemiceluloz, 7,5% kwasów organicznych i 20% związków nieorganicznych, takich jak NaOH. [15]

Ligniny składają się z grup fenolowych, hydroksylowych, karbonylowych, metoksylowych i aldehydowych, pełniąc funkcję potencjalnego adsorbenta dla zanieczyszczeń. Ścieki ługu czarnego oczyszcza się z wykorzystaniem wielu technologii włączając oczyszczanie fizykochemiczne (sedymentacja, koagulacja-flokulacja, adsorpcja, chemiczne utlenianie, filtracja membranowa i ozonowanie), oczyszczanie biologiczne (oczyszczanie tlenowe i beztlenowe oraz z wykorzystaniem grzybów). [15]

Metoda koagulacji-flokulacji z użyciem chlorku żelazowego (III), wapna, alunu, siarczanu żelazowego (II), chlorku poliglinitowego (PAC) jest jedną z najlepszych opcji oczyszczania ścieków ługu czarnego w związku z jego niskim kosztem w porównaniu z innymi

metodami takimi jak filtracja membranowa czy ozonowanie. Głównymi zaletami oczyszczania chemicznego są: zredukowanie koloru, COD (chemiczne zapotrzebowanie na tlen) i TSS (zawiesina ogólna). Z drugiej strony grzyby zgnilizny białej (WRF) są często wykorzystywane do rozkładu szerokiego spektrum zanieczyszczeń, przypominających strukturę ligniny. Kilka WRF takich jak *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor* i *T. elegansare* wykazują zdolność degradacji lignin i ścieków ługu czarnego. [15]

Optymalne warunki odbarwienia ścieków ługu czarnego o stężeniu 30000 ppm na poziomie 96% uzyskano dla stężenia koagulantu 1% w stosunku alun-PAC 3:1 przy całkowitym czasie retencji wynoszącym 33 min. Spośród trzech badanych grzybów, *Trametes versicolor* U97 hodowany na pożywce agarowej z ługiem czarnym, wykazywał największą biodegradowalność. Na pożywce płynnej procent dekoloryzacji kształtował się na poziomie od 70 do 89% w ciągu 30 dni w zależności od badanego szczepu grzybów. Proces odbarwienia z wykorzystaniem grzybów WRF wymaga znacznie więcej czasu aniżeli metoda koagulacja-flokulacja. Natomiast zaletami oczyszczania biologicznego są: brak osadów ściekowych i mniejsza toksyczność ze względu na rozkład struktury ługu czarnego dzięki aktywności enzymów produkowanych przez grzyby. [15]

Grzyby zgnilizny białej mogą być również stosowane do eliminacji fitotoksycznych

substancji takich jak związki fenolowe, obecne w suchej pozostałości z przetworni oliwek, za pośrednictwem aktywności enzymu lakazy. Dwuetapowy proces tłoczenia w przetworni oliwek generuje rocznie miliony ton stałych produktów ubocznych, tzw. „alpeorujo”. Wilgotne produkty uboczne są suszone i ekstrahowane rozpuszczalnikami w celu uzyskania suchej pozostałości, która zawiera dużą ilość polifenoli, węglowodany, materię organiczną i ligninę. Ta pozostałość może być wykorzystana jako nawóz, w związku z wysoką zawartością związków organicznych, w sposób bezpośredni lub po procesie kompostowania. Sucha pozostałość z przetworni oliwek zawiera związki fitotoksyczne zdolne do hamowania wzrostu mikroorganizmów i rozwoju roślin. Efekty fitotoksyczne są głównie przypisywane związkom fenolowym. [16]

Chociaż zanieczyszczenie gleb suchą pozostałością z przetworni oliwek stanowi poważny problem, proponuje się rozwiązania w postaci metod biologicznych takich jak bioremediacja z wykorzystaniem grzybów degradujących ligninę. Zdolność rozkładu ligniny przez grzyby białej zgnilizny jest związana z uwalnianiem enzymów pozakomórkowych – głównie peroksydaz ligniny, Mn-peroksydaz i lakazy – uczestniczących zarówno w usuwaniu monomerycznych fenoli i dekoloryzacji pozostałości z tłoczenia oliwy. [16]

Badano wpływ aktywności lakazy dwóch grzybów zgnilizny białej na poziom toksyczności



substancji rozpuszczalnych w wodzie, otrzymanych z suchej pozostałości, na uprawę pomidorów. *Pycnoporus cinnabarinus* i *Corioloopsis rigida* przyczyniły się do zmniejszenia zawartości fenoli do 73% po 15 dniach. Oczyszczanie roztworu substancji rozpuszczalnych w wodzie z użyciem grzybów białej zgnilizny prowadzi do zmniejszenia jego fitotoksyczności na uprawy pomidorów. Odnotowano ścisły związek pomiędzy ilością wyprodukowanej lakazy, zmniejszeniem zawartości fenoli w roztworze przez grzyby saprobiontyczne, spadkiem fitotoksyczności roztworu oraz wzrostem suchej masy z uprawy pomidorów. [16]

Biomasa lignocelulozowa jest najczęściej występują-

cym materiałem organicznym i dzięki temu spotyka się z zainteresowaniem jako surowiec do produkcji bioetanolu. W celu opłacalnej produkcji materiałów z odnawialnych źródeł lignocelulozowych, proces biokonwersji mikrobiologicznej musi efektywnie wykorzystywać cukry pentozy – ksylozy, jako że są one głównym składnikiem hydrolizatów lignocelulozowych. Jednakże drożdże *Saccharomyces cerevisiae*, powszechnie używane w produkcji etanolu z heksoz, nie są zdolne do wykorzystania cukrów pentozy, takich jak ksyloza. Dlatego też wymagany jest rozwój systemu opartego na mikrobiologicznej aktywności, który będzie w stanie bezpośrednio wykorzystywać

pentozę, prowadząc do ekonomicznej konwersji lignocelulozy w procesach biorafinerijnych. [17]

Wygenerowano system ekspresji genów reduktazy ksylozowej (XR) ze szczepu *Phanerochaete chrysosporum*. Transformant X7 wykazywał zwiększoną produkcję ksylytolu i znacząco wyższą aktywność XR aniżeli w przypadku dzikich szczepów. W trakcie RT-PCR (łańcuchowa reakcja polimerazy z analizą w czasie rzeczywistym) zaobserwowano wzrost aktywności XR, związany ze stałą ekspresją rekombinowanego genu. Ekspresja rekombinowanego genu przyczynia się do poprawy produkcji ksylytolu przez WRF. [17]

Ponadto redukcję wybranych substancji agrochemicznych,

insektycydów imiprotryny (IP) i cypermetryny (CP), insektycydu/nematocydu karbofuranu (CBF), antybiotyku używanego w przemyśle agrochemicznym oksytetracykliny, uzyskano z wykorzystaniem *T. versicolor*. Przebieg procesu degradacji został dodatkowo potwierdzony w przypadku CBF i CP poprzez detekcję produktów ich przemian. [18]

Grzyby białej zgnilizny (WRF) wykazują zdolności do przemian i niekiedy mineralizacji szerokiego spektrum ksenobiotyków, takich jak barwniki tekstylne, chlorowane rozpuszczalniki, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, bromowane środki zmniejszające palność, farmaceutyki i filtry UV. [18]

## UNI-EXPORT Instruments Polska



Agilent Technologies



### MIKROSKOPIA ELEKTRONOWA

- Skaningowe mikroskopy elektronowe: wyposażone w katodę wolframową, LaB6 lub emisję polową
- Systemy FIB, litografia elektronowa
- Systemy SEM/FIB z działem plazmowym
- Zintegrowane systemy analityczne SEM TOF-SIMS
- Stoliki specjalne
- Detektory EDS, WDS, EBSD, EBIC, CL, BSE/CL, TE
- Modernizacja starszych urządzeń SEM i EDS
- Systemy automatycznej analizy orientacji ziaren i tworzenia map fazowych metodą precesji w TEM

### ANALIZA MATERIAŁÓW POROWATYCH PROSZKÓW I PIANEK

- Analizatory sorpcji gazów i par cieczy
- Pomiar powierzchni właściwej (BET) i porowatości
- Porozymetry rtęciowe do pomiaru dystrybucji wielkości porów
- Piknometry helowe do pomiaru gęstości rzeczywistej ciał stałych i proszków
- Pomiar zawartości komórek otwartych i zamkniętych w sztywnych piankach

### TECHNIKA PRÓŻNIOWA

- Pompy próżniowe (rotacyjne, bezolejowe typu scroll, turbomolekularne, dyfuzyjne i jonowe)
- Detektory helowe i kompletne stanowiska do testowania szczelności
- Głowice próżniowe i próżniomierze
- Kontrolery i mierniki przepływu gazów - MFC
- Spektrometry masowe, analizatory gazów: RGA, FTIR, NDIR
- Zawory i armatura próżniowa
- Dedykowane systemy próżniowe
- Regeneracja pomp próżniowych

### CHARAKTERYZOWANIE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH ZAWIESIN, EMULSJI I PIAN

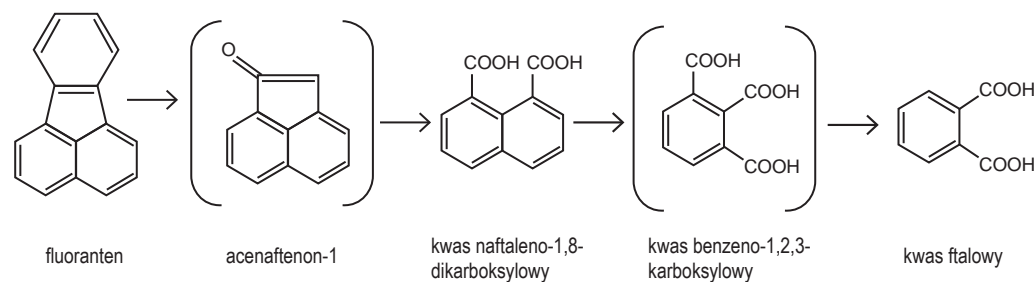
- Stabilność – wykrywanie i identyfikacja wszystkich rodzajów niestabilności: śmietankowanie, sedymentowanie, flokulacja, agregowanie, flotacja, demulgowanie
- Ocena właściwości lepko-sprężystych – płynięcie, smarowność, stabilność kształtu, żelowanie, czas relaksacji, stabilność

04-369 Warszawa, ul. Ludwika Kickiego 4A, lok. 50 [www.uni-export.com.pl](http://www.uni-export.com.pl)

**Przykłady biodegradacji związków organicznych przy udziale *White Rot Fungi***

Grzyby białej zgnilizny są zdolne do wydzielania enzymów ligninolitycznych. Tym samym mogą one uczestniczyć w procesie biodegradacji takich substancji jak: lignina, ligninoceluloza, hemiceluloza, oraz celuloza. Substancje te stanowią biomasę pochodzenia roślinnego, np. celuloza stanowi 45% suchej masy drewna. Rozkład biologiczny tych związków zależy od wieku drewna, złożoności struktury oraz stadium rozwoju. Celuloza charakteryzuje się budową polimeryczną, zbudowana jest z podjednostek D-glukozy, między którymi występują wiązania beta-1,4-glikozydowe. Długie łańcuchy tych polimerów połączone są ze sobą wiązaniami wodorowymi oraz siłami van der Waalsa. [3]

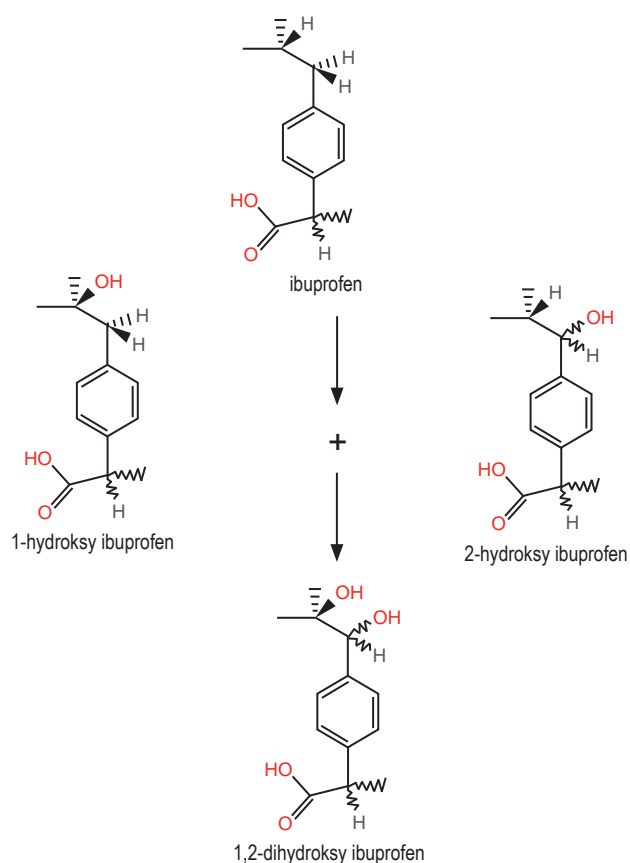
Większość szczepów grzybów white rot fungi jest zdolnych do transformacji związków o skomplikowanej i złożonej budowie chemicznej, tak jak wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Transformacja polega na przekształcaniu związku pierwotnego do innych związków chemicznych o prostszej strukturze. Idealnym przekształceniem byłaby transformacja związku organicznego do dwutlenku węgla i wody, lecz nie jest to do końca możliwe w przypadku trwałych zanieczyszczeń organicznych. Są one bowiem odporne na działanie czynników zarówno chemicznych jak i biologicznych. Organizmy *Polyporus sp.* (S133) dzięki właściwościom enzymatycznym



Schemat 4. Szlak metabolizmu fluorantenu (na podstawie [4,5])

wykazywały zdolność do biodegradacji fluorenu – trójpierścieniowego przedstawiciela wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. W ciągu 23-dniowej inkubacji stężenie tego związku w środowisku wyraźnie zmalało. W trakcie analizy zbadano, iż pierwszym etapem biodegradacji było powstanie chinonu. W kolejnych etapach powstał kwas 9-fluoreno-1-karboksylowy, następnie 9-fluoreno-1-ol oraz kwas protokatechowy. Finalnie kwas protokatechowy został przekształcony do kwasu trójkarboksylowego. Z uwagi na wyższą toksyczność metabolitów fluorenu jego rozkład w środowisku może być niebezpieczny. [19]

Innym przykładem biodegradacji związków organicznych w obecności grzybów white rot fungi są organizmy *Armillaria sp.* (F022). Użyte zostały one między innymi do: dekoloryzacji barwników przemysłowych, biodegradacji naftalenu i fluorantenu. Degradacja fluorantenu polegała na jego konwersji do acenaftenonu, otwarciu pierścienia aromatycznego i powstaniu kolejnego metabolitu: kwasu 8-hydroksymetyl-1-naftoesowego, oraz przekształcenie go do kwasu naftaleno-1,8-dikarboksylowego. Ten me-



Schemat 5. Rozkład ibuprofenu na podstawie [20]

tabolit uległ w późniejszym etapie transformacji do kwasu benzeno-1,2,3-trójkarboksylowego i kwasu ftalowego (Schemat 4) [4]. Biodegradacja fluorantenu została również zbadana przez [5]. W obecności organizmów *Pleurotus pulmonarius* (F043) podczas 30-dniowej inkubacji, stwierdzono prawie 100% usunięcie fluorantenu. Określono metabolity fluorantenu i również

były nimi kwas naftaleno-1,8-dikarboksylowy, kwas benzeno-1,2,3-trójkarboksylowego oraz kwas ftalowy. Powszechnie używanymi szczepami z rodziny white rot fungi są *Trametes versicolor*. W badaniu [20] zostały one użyte do biodegradacji ibuprofenu wraz z innymi organizmami (*Ganoderma lucidum*, *Irpex lacteus*, *Phanerochaete chrysosporium*). Najłatwiej



biodegradowalnym związkiem okazał się ibuprofen, który został całkowicie zmetabolizowany w ciągu 43 godzin inkubacji. Głównymi metabolitami ibuprofenu był wówczas 1,2-hydroksy ibuprofen (Schemat 5).

Żywice fenolowe są syntetycznymi polimerami zbudowanymi z fenolu i formaldehydu. Żywice te cieszą się przemysłowym i komercyjnym zastosowaniem ze względu na ich odporność na wysokie temperatury oraz trwałość. Są odporne na działanie termitów i drobnoustrojów czy grzybów, dlatego używane są między innymi w budownictwie. Ich struktura chemiczna podobna jest do struktury ligniny, dlatego też do ich rozkładu

zastosowano grzyby z rodzaju *white rot fungi* - organizmy *P. chrysosporium*. Podczas inkubacji żywic fenolowych w obecności organizmów *P. chrysosporium* zauważono zadarcia, rowki i pęknięcia struktury polimeru fenolowo-formaldehydowego, co świadczy o zdolności organizmów grzybowych do biodegradacji tych związków [21]. Podsumowując, grzyby z rodzaju *white rot fungi* posiadają zdolność do biodegradacji związków organicznych o złożonej strukturze, takich jak lignina [22], celuloza i hemiceluloza [3], nonylofenoli [23], ibuprofenu [20] oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych [4, 5, 19]. Szlaki metaboliczne

(szlaki rozkładu) związków są wynikiem biotransformacji związków w inne metabolity o prostszej budowie. Dzięki rozkładowi biologicznemu związków organicznych możliwe jest ich usunięcie ze środowiska. W środowisku wzrasta tym samym stężenie metabolitów tych związków, co niekiedy może być niebezpieczne z uwagi na fakt, iż niektóre metabolity charakteryzują się wyższą toksycznością niż pierwotne struktury.

#### Podsumowanie

Zgniliznę drewna można podzielić na trzy rodzaje: białą, brunatną i miękką. Grzyby z rodzaju białej zgnilizny drewna – *White Rot Fungi* – zdolne są do rozkładu zwią-

ków organicznych o skomplikowanej budowie, lub budowie podobnej do ligniny. Zdolność biodegradacji tych organizmów jest związana z wydzielaniem enzymów ligninolitycznych: peroksydaz i lakaz. Enzymy te pozwalają na transformację związków organicznych, przy czym często produkty biodegradacji charakteryzują się wyższą toksycznością od pierwotnych form związków organicznych. Obecnie grzyby WRF są używane do usuwania takich związków jak: farmaceutyki, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, polichlorowane bifenyle, chlorowane rozpuszczalniki a nawet barwniki tekstylne. Organizmy WRF są używane w przemyśle





w procesach takich jak: usuwanie barwników z wód i ścieków, poprawa strawności paszy dla zwierząt hodowlanych, wydzielanie enzymów, oraz oczyszczanie ścieków. Mechanizm działania tych organizmów nie jest do końca poznany a dotychczasowa wiedza opiera się na działaniu enzymów.

### Literatura

- [1] Marchut-Mikołajczyk O., Kwapisz E., Antczak T. Enzymatyczna bioremediacja ksenobiotyków. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2013, 16, 1, 39-55.
- [2] Cameron M.D., Timofeevski S., Aust S.D. Enzymology of *Phanerochaete chrysosporium* with respect to the degradation of recalcitrant compounds and xenobiotics. *Appl Microbiol Biotechnol* 2000, 54, 751-758.
- [3] Percz J., Munoz-Dorado J., de la Rubia T., Martinez J. Biodegradation and biological treatment of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int Microbiol* 2002, 5, 53-63.
- [4] Hadibarata T., Kristanti R.A. Biotransformation studies on fluoranthene, a four-ring polycyclic aromatic hydrocarbon, by white rot fungus *Armillaria* sp. F022. The 2014 International Conference on Agro-industry (ICoA): Competitive and sustainable Agroindustry for Human Welfare. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2015, 3, 45-50.
- [5] Wirasnita R., Hadibarata T. Potential of the White-Rot Fungus *Pleurotus pulmonarius* F043 for Degradation and Transformation of Fluoranthene. *Pedosphere* 2016, 26 (1), 49-54.
- [6] PuraHong W., Arnstadt T., Kahl T., Bauhus J., Kellner H., Hofrichter M., Krüger D., Buscot F., Hoppe B. Are correlations between deadwood fungal community structure, wood physico-chemical properties and lignin-modifying enzymes stable across different geographical regions? *Fungal Ecology* 2016, 22, 98-105.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wood-decay\\_fungus](https://en.wikipedia.org/wiki/Wood-decay_fungus)
- [8] [http://www.forestpathology.org/dis\\_decay.html](http://www.forestpathology.org/dis_decay.html)
- [9] Aust S.D. Mechanisms of degradation by White Rot Fungi. *Environmental Health Perspectives* 1995, 103, 5, 59-61.
- [10] Dashtban M., Schraft H., Syed T.A., Qin W. Fungal biodegradation and enzymatic modification of lignin. *Int J Biochem Mol Biol* 2010, 1 (1), 36-50.
- [11] Polak J., Jarosz-Wilkolazka A. Reakcje katalizowane przez lakazę – mechanizm i zastosowanie w biotechnologii. *Biotechnologia* 2007, 4 (79), 82-94.
- [12] Yang S., Hai F.I., Nghiem L.D., Price W.E., Roddick F., Moreira M.T., Magram S.F. Understanding the factors controlling the removal of trace organic contaminants by white-rot fungi and their lignin modifying enzymes: A critical review. *Bioresource Technology* 2013, 141, 97-108.
- [13] Rouches E., Herpoël-Gimbert I., Steyer J.P., Carrere H. Improvement of anaerobic degradation by white-rot fungi pretreatment of lignocellulosic biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016, 59, 179-198.
- [14] Ruqayyah T.I.D., Jamal P., Alam M.Z., Mirghani M.E.S., Jaswir I., Ramli N. Application of response surface methodology for protein enrichment of cassava peel as animal feed by the white-rot fungus *Panus tigrinus* M609RQY. *Food Hydrocolloids* 2014, 42, 293-303.
- [15] Sari A.A., Kurniawan H.H., Nurdin M., Abimanyu H. Decolorization of black liquor wastewater generated from bioethanol process by using oil palm empty fruit bunches. *Energy Procedia* 2015, 68, 254-262.
- [16] Aranda E., Sampedro I., Ocampo J.A., García-Romera I. Phenolic removal of olive-mill dry residues by laccase activity of white-rot fungi and its impact on tomato plant growth. *International Biodegradation & Biodegradation* 58 2006, 58, 176-179.
- [17] Hirabayashi., Wang J., Kawagishi H., Hirai H. Improving xylitol production through recombinant expression of xylose reductase in the white-rot fungus *Phanerochaete sordida* YK-624. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 2015, 120, 1, 6-8.
- [18] Mir-Tutusaus J.A., Masís-Mora M., Corcellas C., Eljarrat E., Barceló D., Sarrà M., Caminal G., Vicent T., Rodríguez-Rodríguez C.E. Degradation of selected agrochemicals by the white rot fungus *Trametes versicolor*. *Science of the Total Environment* 2014, 500-501, 235-242.
- [19] Lazim Z.M., Hadibarata T. Ligninolytic fungus *Polyporus* sp. S133 mediated metabolic degradation of fluorene. *Brazilian Journal of Microbiology* 2016, 47, 610-616.
- [20] Marco-Urrea E., Perez-Trujillo M., Vicent T., Caminal G. Ability of white-rot fungi to remove selected pharmaceuticals and identification of degradation products of ibuprofen by *Trametes versicolor*. *Chemosphere* 2009, 74, 765-772.
- [21] Gusse A.C., Miller P.D., Volk T.J. White-Rot Fungi demonstrate first biodegradation of phenolic resin. *Environmental Science and Technology* 2006, 40, 4196-4199.
- [22] Tuomela M., Vikman M., Hatakka A., Itävaara M. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology* 2000, 72, 169-183.
- [23] Krupiński M., Długoński J. Biodegradacja nonylofenoli przez wybrane drobnoustroje. *Postępy Mikrobiologii* 2011, 50, 4, 313-319.