

BIODEGRADACE TEXTILNÍCH BARVIV V ODPADNÍCH VODÁCH POMOCÍ LAKAS

KLÁRA HERKOMMEROVÁ a IVA PICHOVÁ

Laboratoř virových a mikrobiálních proteinů, Ústav organické chemie a biochemie AV ČR, v.v.i., Flemingovo nám. 542/2, 160 00 Praha 6
iva.pichova@uochb.cas.cz

Došlo 2.6.17, přijato 28.6.17.

Klíčová slova: lakasy, biotechnologie, „zelená“ chemie, syntetická barviva, odpadní vody, textilní průmysl, organické polutanty, biodegradace

Obsah

1. Úvod
2. Lakasy a jejich biotechnologický význam
3. Využití lakas v textilním průmyslu
 - 3.1. Biodegradace barviv
 - 3.2. Dekolorizace odpadních vod
4. Závěr

1. Úvod

Rozvoj průmyslu s sebou vždy přináší i určitou míru znečištění životního prostředí. Textilní průmysl se řadí mezi největší producenty průmyslového odpadu vůbec. Odhaduje se, že více než 10 000 různých barviv a pigmentů se používá pro barvení nejrůznějších materiálů a roční produkce těchto barviv přesahuje $7 \cdot 10^5$ tun. Přitom 10 % z toho množství se díky ne zcela účinným procesům barvení dostává do odpadních vod, které kontaminují okolní půdu a vodní zdroje. Kromě toho, že jsou některá barviva vysoce toxická a mutagenní, svou přítomností ve vodních tocích snižují průnik světla a omezují tak fotosyntetickou aktivitu vodních rostlin a snižují rovněž množství rozpuštěného kyslíku ve vodě, což má negativní dopad na vodní faunu. Díky své komplexní struktuře jsou syntetická barviva velmi stabilní a obtížně se odstraňují. Komplikací je i přidávek antimikrobiálních látek, které se často přidávají během zpracovávání přírodních vláken typu bavlny. Takovýto odpad je pak rezistentní k biodegradaci¹. Pro remediaci barviv z odpadních vod je k dispozici řada metod. Jsou to především fyzikálně-chemické metody např. adsorpce, chemická oxidace, precipitace, koagulace, filtrace, elektrolyza, fotodegradace atd. Nevýhodou těchto metod je jejich nákladnost a omezená kapacita. Naproti tomu biologický-

mi metodami lze dosáhnout úplné mineralizace organických polutantů. Je známo, že některé houby, kvasinky, bakterie a řasy mohou díky svému enzymovému aparátu kompletně degradovat barviva na produkty, které jsou méně nebo nejsou toxické vůbec. Navíc je celý tento proces šetrný k životnímu prostředí a není tak finančně nákladný². Množství vědeckých publikací z posledních let zabývajících se biodegradací organických polutantů a biologickým ošetřením odpadních vod významně roste, což poukazuje na zvýšený zájem o tyto metody a na snahu o jejich zavedení do praxe^{3–7}.

2. Lakasy a jejich biotechnologický význam

Lakasy (EC 1.10.3.2, benzodiol:kyslík oxidoredukta-sy) patří mezi enzymy s velkým biotechnologickým potenciálem a v současné době je k dispozici řada přehledných článků popisujících jejich strukturu^{8–10}, biochemické vlastnosti^{11,12}, fyziologické funkce^{13–16} a reakční mechanismus^{17,18}. Tyto enzymy jsou často využívány především pro biodegradaci organických polutantů (převážně syntetických barviv), a to hlavně ve spráženém systému lakasa/mediátor^{19–23}. Mediátorem je nízkomolekulární látka (syntetického nebo přírodního původu), která napomáhá přenosu elektronů mezi lakasou a substrátem, který má buď velký redoxní potenciál, nebo je příliš velký, aby se dostal do katalytického místa enzymu²⁴. Samotné lakasy působí během reakcí jako tzv. „zelené“ katalyzátory. Jsou schopny oxidovat i bez mediátorů širokou škálu různých substrátů (např. fenoly, aromatické a alifatické aminy), a to pouze v přítomnosti molekuly kyslíku ze vzduchu, která je následně redukována na dvě molekuly vody. Voda je jediným vedlejším produktem reakcí katalyzovaných lakasami. Enzymová oxidace je tedy z hlediska ekologického šetrnější alternativou k oxidaci chemické¹⁷. I proto jsou lakasy používány v mnoha biotechnologických procesech zahrnující nejen biodegradaci barviv^{25–27} a dalších organických polutantů^{28–32}, ale také v procesech biosyntézy různých bioaktivních látek pro farmaceutický průmysl a zemědělství^{33,34}. Kromě toho se lakasy využívají v potravinářském a papírenském průmyslu, v nanobiotechnologiích a při výrobě biopaliv^{35,36}.

Většina lakas používaných v biotechnologiích pochází původně z hub, převážně z oddělení Ascomycota nebo Basidiomycota. Houby produkují tyto enzymy extracelulárně v poměrně velkém množství, nevýhodou ovšem je produkce několika isoforem, které mají rozdílné vlastnosti a obtížně se od sebe izolují. I proto se uplatňuje heterologní produkce těchto enzymů, především v bakteriích, kvasinkách a ve vláknitých houbách. U rekombinantních lakas mohou být navíc, díky metodám genového inženýrství,

pozměněny některé jejich vlastnosti, např. aktivita, substrátová specifita a stabilita³⁷. To představuje další výhodu pro uplatnění v biotechnologických procesech, během kterých jsou enzymy většinou vystaveny extrémním podmínkám (zvýšená teplota, přítomnost solí, rozpouštědel apod.). Imobilizací lakas nebo organismů produkujících lakasy je možné rovněž docílit vyšší stability těchto biokatalyzátorů, které mohou být navíc díky tomu dlouhodobě skladovány a používány opakovaně^{38,39}.

3. Využití lakas v textilním průmyslu

Aplikace lakas v textilním průmyslu se neomezuje pouze na degradaci a remediaci barviv z odpadních vod, i když se bezpochyby jedná o nejčastější využití těchto enzymů. Svě místo si lakasy našly i v jiných sektorech. V první řadě se jedná o proces bělení, který předchází samotnému barvení, během kterého jsou z vláken odstraněny přírodní pigmenty a jiné nečistoty. Lakasy jsou v tomto případě šetrnějším prostředkem než běžně používané bělidlo, peroxid vodíku. V současné době jsou testovány různé systémy pro zvýšení účinnosti samotného bělicího procesu, zkrácení jeho doby, snížení procesní teploty a množství používaného peroxidu. Jedná se především o různé kombinace lakasy s příslušným mediátorem, peroxidu a ultrazvuku, který napomáhá prostupu enzymu daným vláknem. „Bělicího“ účinku lakas se využívá rovněž pro degradaci

indigo barviv, čímž se získávají různé odstíny džínových oděvů. Tato metoda odbarvení opět přináší menší ekologickou zátěž než použití bělidla chlornanu sodného⁴⁰. Polymerizačních schopností lakas se využívá pro modifikaci přírodních vláken za účelem zlepšení jejich vlastností (voděodolnost, ochrana proti UV záření, antimikrobiální vlastnosti, nesrážlivost atd.), dále při výrobě nových barviv nebo v samotném procesu barvení^{40–42}.

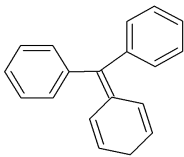
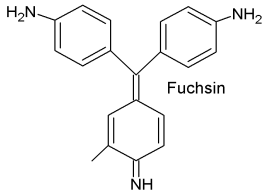
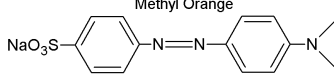
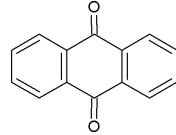
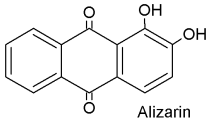
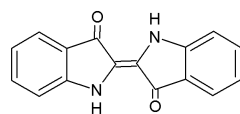
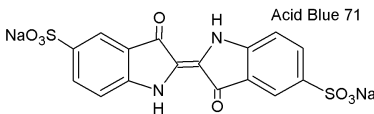
3.1. Biodegradace barviv

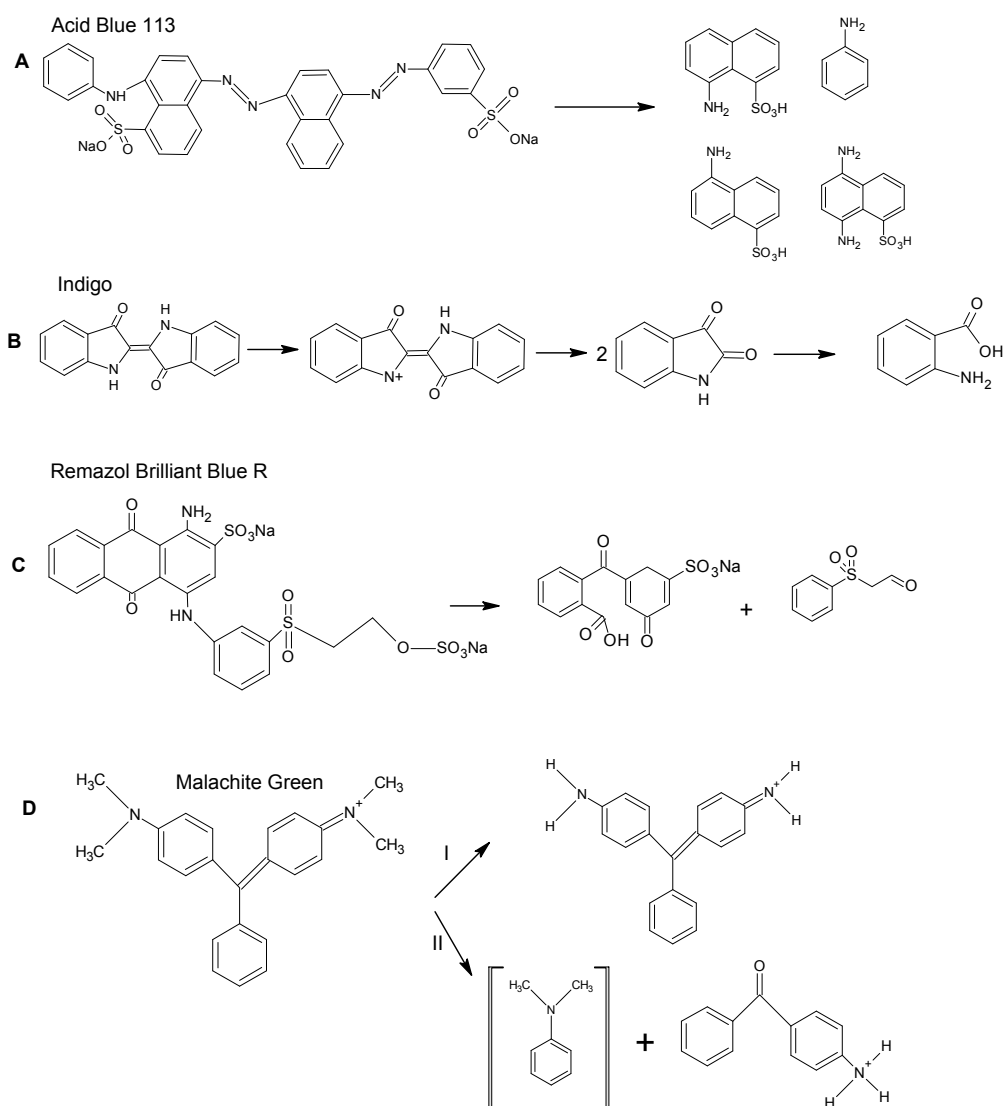
Pod pojmem biodegradace se rozumí rozštěpení struktury barviv činností mikrobiálních enzymů. Enzymy mohou daná barviva buď odbarvit (dekolorizovat) tím, že rozštěpí část jejich molekuly nazývanou chromofor nebo je mohou zcela degradovat na menší a strukturně jednodušší molekuly⁴². Rozdělení nejčastěji používaných skupin barviv v textilním průmyslu dle typu chromoforu je uvedeno v tab. I.

Schopnost lakas z hub dekolorizovat a/nebo degradovat barviva byla popsána v řadě souhrnných článků^{2,43,44}. Účinnost degradace závisí především na chemické struktuře daného barviva, konkrétně na přítomnosti různých substituentů, jejich počtu a lokalizaci. Je známo, že přítomnost substituentů poskytujících elektron ($-OH$, $-CH_3$, $-NH_2$) zvyšuje odbouratelnost daného barviva, stejně tak, jako pozice substituentů v polohách *ortho* a *meta*. Naproti tomu barviva, která obsahují funkční skupiny $-COOH$, $-$

Tabulka I

Přehled nejčastěji používaných skupin barviv v textilním průmyslu. Klasifikace barviv je dle typu přítomného chromoforu. Převzato a upraveno podle cit.^{42,63}

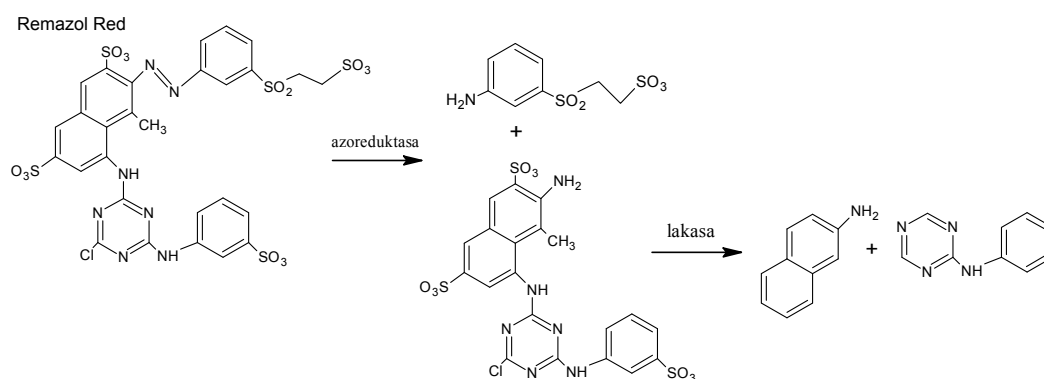
Druh barviva	Chromofor	Příklad
Trifenylmethanová		 Fuchsin
Azo	$—N=N—$	 Methyl Orange
Antrachinonová		 Alizarin
Indigo		 Acid Blue 71



Obr. 1. **Příklady degradace barviv katalyzované lakasou:** (A) degradace azobarviva Acid Blue 113 na čtyři meziprodukty (8-aminonafalen-1-sulfonová kyselina; anilin; 5-aminonafalen-1-sulfonová kyselina; 5,8-diaminonafalen-1-sulfonová kyselina). Převezato a upraveno dle cit.⁵⁰. (B) schéma degradace Indigo barviva na meziprodukt isatin, který se dále degraduje na kyselinu isatinovou, jejíž dekarboxylací vzniká kyselina anthranilová. Převezato a upraveno dle cit.⁵¹. (C) degradace antrachinonového barviva Remazol Brilliant Blue R zahrnuje redukční, hydroxylační, deaminační a oxidační reakce, vedoucí ke vzniku 5-(2-karboxybenzoyl)-3-oxocyklohexa-1,4-dien-1-sulfonátu sodného a 2-(fenylsulfonyl)acetaldehydu. Převezato a upraveno dle cit.⁵². (D) degradace trifenylmethanového barviva Malachite Green pomocí dvou paralelních, ale kompetitivních drah. Během první degradační dráhy je barvivo demetylováno a následnou degradací nebo polymerizací je dosaženo i destrukce chromoforu (odbarvení). Ve druhé dráze dochází nejprve k hydroxylaci barviva za vzniku příslušné karbinolové formy, která je rychle degradována a následnou oxidací a demethylací vznikají produkty *N,N*-dimethylanilin a protonovaná forma (4-aminofenyl)(fenyl)methanonu. Převezato a upraveno dle cit.⁵³

SO_3H , $-\text{NO}_2$, $-\text{Cl}$, $-\text{Br}$, lakasy oxidují hůře. Účinnost oxidace rovněž závisí na rozdílech mezi redoxním potenciálem daného barviva a lakasy. I proto jsou v biotechnologiích využívány především lakasy z lignolytických hub, které se řadí mezi enzymy s vysokým redoxním potenciálem⁴⁵. Příklady degradace strukturálně odlišných barviv katalyzované lakasou a vznik příslušných produktů

jsou uvedeny na obr. 1. Míra dekolizace nebo rychlost odbourání barviv se může ještě zvýšit v přítomnosti mediátorů. Jako mediátor přítom může sloužit i samotné barvivo. Např. antrachinonová barviva, která jsou lakasami velmi účinně degradována, mohou zároveň sloužit i jako mediátory při degradaci azobarviv⁴⁶. Právě ta jsou v textilním průmyslu nejvíce používána a díky své kom-



Obr. 2. **Předpokládaný mechanismus degradace azobarviva Remazol Red.** V prvním kroku dochází k rozštěpení azovazby katalyzované azoreduktasou za vzniku 2-((3-aminofenyl) sulfonylethyl) sulfonové kyseliny a 3-amino(4,5-(6-chloro-1,3,5-triazin-2-yl)amino)naphthalen-2,4,7-benzenetrisulfonové kyseliny, která je dále oxidována lakasou na 2-aminonaphthalen a *N*-fenyl-1,3,5-triazin. Převzato a upraveno dle cit.⁴³

plexní struktury se velmi obtížně degradují. Pro kompletní degradaci těchto barviv je většinou potřeba více komplexní přístup. Jedná se např. o využití mikrobiálních konsorcií a kombinace anaerobního a aerobního odbourávání, kdy nejprve za anaerobních podmínek dochází k rozštěpení azovazby pomocí azoreduktasy za vzniku aromatických aminů, které mohou, ale také nemusí být v následujícím kroku aerobně štěpeny, např. oxidací pomocí lakasy (viz obr. 2). Obecně lze říci, že aromatické aminy odvozené od benzenu jsou aerobně odbouratelné na rozdíl od aromatických aminů odvozených od naftalenu. Stejně tak toxicita degradačních produktů v porovnání s toxicitou původních barviv může, ale nemusí být nižší^{47–49}. Ne vždy tedy platí, že dekolorizace znamená rovnou i detoxifikaci.

3.2. Dekolorizace odpadních vod

Textilní průmysl spotřebovává během procesu barvení obrovské množství vody (60–400 dm³/1 kg látek) a chemikálií, zahrnujících nejen samotná barviva, ale také soli, kovy, surfaktanty, detergenty, oleje a disperzanty, které napomáhají k lepšímu přichycení barviv a tedy k účinnějšímu barvení tkanin. Všechny tyto látky (v různém množství) končí v odpadních vodách, které jsou díky tomu barevné (mnoho barviv obarví vodu již při koncentraci 1 mg dm⁻³ a koncentrace barviv v odpadních vodách se pohybuje v rozmezí 10–200 mg dm⁻³), silně zásadité (pH >10), s vysokými hodnotami biologické spotřeby kyslíku (BOD) a chemické spotřeby kyslíku (COD)⁵⁴. Degradace barviv v odpadních vodách a její případná detoxifikace je za těchto podmínek a v tomto systému daleko složitější a vyžaduje většinou součinnost různých metod.

Fyzikální metody pro dekolorizaci odpadních vod zahrnují především adsorpci na aktivním uhlí, která je velmi účinná, ale zároveň i velmi drahá, neboť adsorbent se velmi obtížně regeneruje, a dále metody filtrace

(ultrafiltrace, nanofiltrace, reverzní osmóza), které jsou často používány především pro zachycení a recyklaci některých barviv a aditiv. Tím dochází sice ke snížení koncentrace těchto látek v odpadních vodách (snížuje se tím i BOD a COD vody), ale zároveň vzniká sekundární odpad, který je potřeba dále zpracovat. Z chemických metod se využívá především kavitace a fotokatalytické oxidace produkující hydroxylové radikály, které oxidují nejen barviva, ale také ostatní organické a anorganické látky přítomné ve vodě. Aplikace Fentonova činidla je velmi účinná pro degradaci i nerozpustných pigmentů, ale dochází často k flokulaci reagentu a barviv a tím ke vzniku dalšího odpadu. Pro degradaci barviv obsahující konjugovanou dvojnou vazbu nebo aromatické struktury se často používá peroxid vodíku nebo ozon. Možnost použití ozonu v plynném stavu je velkou výhodou, protože nedochází ke zvětšování objemu odpadní vody. Na druhou stranu může touto oxidací vznikat řada toxických vedlejších produktů⁵⁵.

Pro biologické čištění odpadních vod jsou většinou využívány buď čisté mikrobiální kultury vláknitých hub, bakterií nebo mikrobiální konsorcia, u kterých může být, díky synergickému efektu různých metabolismů, dosaženo lepších výsledků než při použití čistých kultur. Existuje zde ale řada překážek. Předně je to pH odpadní vody, které je pro většinu mikrobiálních kultur používaných pro biodegradaci příliš vysoké, a které bývá pro tyto účely upravováno. Snaha je i o vylepšení vlastností samotných mikroorganismů (metodami genového inženýrství) tak, aby degradovaly barviva napříč pH spektrem. Upravovat se musí i teplota odpadní vody, která je po procesu barvení vysoká (70 °C). Mikrobiální činnost je rovněž inhibována různými aditivy přidávanými do reakcí pro účinnější proces barvení. Přesto se zdá být použití mikroorganismů pro dekolorizaci odpadní vody finančně méně nákladné a hlavně šetrnější k životnímu prostředí a je mu tedy v posledních letech věnována velká pozornost⁷. Další možnou

„ekologickou“ variantou pro ošetření odpadních vod je aplikace enzymů. Enzymy, převážně pak lakasy, se ukázaly jako velmi účinný nástroj. Nevýhodou této metody ovšem jsou vysoké náklady spojené s produkcí čistých enzymů a jejich nestabilita při různých hodnotách pH, teplot a v přítomnosti dalších složek obsažených ve vodě, např. solí a organických rozpouštědel. Řešením může být jednak rekombinantní produkce enzymu s vylepšenými vlastnostmi (vyšší stabilita, substrátová specifita atd.), a jednak imobilizace těchto enzymů, která by kromě jejich vyšší stability zajistila i jejich jednoduchou separaci po skončení bioremediačního procesu^{56,57}. Pro dekolorizaci a detoxifikaci odpadních vod je v řadě vědeckých prací testován především lakasa/mediátorový systém^{58–60}. V přítomnosti syntetických mediátorů (2,6-dimethoxyfenol; 1-hydroxybenzotriazol (HBT)) většinou bývá dosaženo vyšší míry dekolorizace odpadní vody než v případě použití mediátorů přírodních (syngaldehyd, acetosyringon, vanilin). Opačná situace nastává v případě testování toxicity. Samotná lakasa může mít toxický efekt v závislosti na testovaném organismu. V případě ošetření odpadní vody lakasou a syntetickým mediátorem HBT dochází sice k odbarvení vody, ale její toxicita se nemusí snížit. Při použití lakasy a acetosyringonu nebyvá dekolorizace vody tak značná, za to toxicita bývá nižší^{61,62}.

4. Závěr

Z dostupných dat vyplývá, že použití lakasy pro odbarvování samotných barviv za laboratorních podmínek je velmi efektivní, a to hlavně v kombinaci s vhodným mediátorem. V případě reálné odpadní vody, kde je přítomna řada látek organického a anorganického původu, tento systém však už není zcela dostačující. Obecně lze říct, že aplikace jen biologických nebo jen fyzikálně-chemických metod nemusí vést k úplné mineralizaci barviv nebo je k tomu zapotřebí dalších prostředků, které celý proces velmi prodraží. Jako účinný a ekonomicky výhodný se zdá být systém kombinace daných metod, např. chemická oxidace a následná biologická degradace nebo kavitace s následnou chemickou nebo biologickou oxidací. Jelikož má každá odpadní voda velmi specifické složení, není možné vytvořit jeden model pro její čištění. Vždy záleží na samotném procesu barvení, na druhu používaných barviv a druhu barveného materiálu. Další otázkou je toxicita odpadních vod, která se dlouhá léta nějak zvláště nezkoumala (hlavně v rozvojových zemích), ale která se ukázala být tím nejdůležitějším. Ne vždy je méně barevná voda i méně toxická. Proto se v dnešní době klade větší důraz na výběr/kombinaci metod, které minimalizují vznik toxických produktů a jsou šetrnější k životnímu prostředí.

Tato práce byla podpořena projektem NPU LO 1302 od MŠMT. Děkujeme Dr. Beierovi (ÚOCB AV ČR) za odbornou konzultaci.

LITERATURA

- Chequer F. M. D., de Oliveira G. A. R., Ferraz E. R. A., Cardoso J. C., Zanoni M. V. B., de Oliveira D. P., v knize: *Eco-Friendly Textile Dyeing and Finishing* (Günay M.), kap. 06, InTech, Rijeka 2013.
- Forgacs E., Cserhádi T., Oros G.: *Environ. Int.* **30**, 953 (2004).
- Sarayu K., Sandhya S.: *Appl. Biochem. Biotechnol.* **167**, 645 (2012).
- Khan R., Bhawana P., Fulekar M. H.: *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* **12**, 75 (2013).
- Rao M. A., Scelza R., Acevedo F., Diez M. C., Gianfreda L.: *Chemosphere* **107**, 145 (2014).
- García-Rodríguez A., Matamoros V., Fontas C., Salvado V.: *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **21**, 11708 (2014).
- Imran M., Crowley D. E., Khalid A., Hussain S., Mumtaz M. W., Arshad M.: *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* **14**, 73 (2015).
- Giardina P., Faraco V., Pezzella C., Piscitelli A., Vanhulle S., Sannia G.: *Cell. Mol. Life Sci.* **67**, 369 (2010).
- Dwivedi U. N., Singh P., Pandey V. P., Kumar A.: *J. Mol. Catal. B: Enzym.* **68**, 117 (2011).
- Hakulinen N., Rouvinen J.: *Cell. Mol. Life Sci.* **72**, 857 (2015).
- Morozova O. V., Shumakovich G. P., Gorbacheva M. A., Shleev S. V., Yaropolov A. I.: *Biochemistry (Moscow)* **72**, 1136 (2007).
- Baldrian P.: *FEMS Microbiol. Rev.* **30**, 215 (2006).
- Dittmer N. T., Kanost M. R.: *Insect Biochem. Mol. Biol.* **40**, 179 (2010).
- Rivera-Hoyos C. M., Morales-Álvarez E. D., Poutou-Piñales R. A., Pedroza-Rodríguez A. M., Rodríguez-Vázquez R., Delgado-Boada J. M.: *Fungal Biology Reviews* **27**, 67 (2013).
- Wang J., Feng J., Jia W., Chang S., Li S., Li Y.: *Biotechnol. Biofuels* **8**, 145 (2015).
- Forootanfar H., Faramarzi M. A.: *Biotechnol. Prog.* **31**, 1443 (2015).
- Jeon J. R., Baldrian P., Murugesan K., Chang Y. S.: *Microb. Biotechnol.* **5**, 318 (2012).
- Cannatelli M. D., Ragauskas A. J.: *Chem. Rec.* **17**, 122 (2017).
- Zeng S., Qin X., Xia L.: *Biochem. Eng. J.* **119**, 92 (2017).
- Jeon J. R., Chang Y. S.: *Trends Biotechnol.* **31**, 335 (2013).
- Canas A. I., Camarero S.: *Biotechnol. Adv.* **28**, 694 (2010).
- Zucca P., Cocco G., Sollai F., Sanjust E.: *Biocatalysis* **1**, 82 (2015).
- Riva S.: *Trends Biotechnol.* **24**, 219 (2006).
- Viswanath B., Rajesh B., Janardhan A., Kumar A. P., Narasimha G.: *Enzyme Res.* **2014**, 21.
- Rangabhashiyam S., Anu N., Selvaraju N.: *Res. J. Chem. Environ.* **17**, 88 (2013).

26. Kaushik P., Malik A.: *Environ. Int.* **35**, 127 (2009).
27. Gasser C. A., Ammann E. M., Shahgaldian P., Corvini P. F. X.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **98**, 9931 (2014).
28. Rodríguez-Delgado M., Orona-Navar C., García-Morales R., Hernández-Luna C., Parra R., Mahlkecht J., Ornelas-Soto N.: *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **108**, 34 (2016).
29. Kadri T., Rouissi T., Brar S. K., Cledon M., Sarma S., Verma M.: *J. Environ. Sci.* **51**, 52 (2017).
30. Maqbool Z., Hussain S., Imran M., Mahmood F., Shahzad T., Ahmed Z., Azeem F., Muzammil S.: *Environ. Sci. Pollut. Res.* **23**, 16904 (2016).
31. Macellaro G., Pezzella C., Cicatiello P., Sannia G., Piscitelli A.: *BioMed Res. Int.* **2014**, 8.
32. Kudanga T., Nemadziva B., Le Roes-Hill M.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **101**, 13 (2017).
33. Shoda S., Uyama H., Kadokawa J., Kimura S., Kobayashi S.: *Chem. Rev.* **116**, 2307 (2016).
34. Roth S., Spiess A. C.: *Bioprocess Biosyst. Eng.* **38**, 2285 (2015).
35. Mate D. M., Alcalde M.: *Microb. Biotechnol.* **9**, Special Issue (2016).
36. Antosova Z., Sychrova H.: *Mol. Biotechnol.* **58**, 93 (2016).
37. Fernández-Fernández M., Sanromán M. Á., Moldes D.: *Biotechnol. Adv.* **31**, 1808 (2013).
38. Bilal M., Asgher M., Parra-Saldivar R., Hu H. B., Wang W., Zhang X. H., Iqbal H. M. N.: *Sci. Total Environ.* **576**, 646 (2017).
39. Pezzella C., Guarino L., Piscitelli A.: *Cell. Mol. Life Sci.* **72**, 923 (2015).
40. Polak J., Jarosz-Wilkolazka A.: *Process Biochem.* **47**, 1295 (2012).
41. Fu J., Nyanhongo G. S., Gübitz G. M., Cavaco-Paulo A., Kim S.: *Biocatal. Biotransform.* **30**, 125 (2012).
42. Ali H.: *Water, Air, Soil Pollut.* **213**, 251 (2010).
43. Solís M., Solís A., Pérez H. I., Manjarrez N., Flores M.: *Process Biochem.* **47**, 1723 (2012).
44. Sen S. K., Raut S., Bandyopadhyay P., Raut S.: *Fungal Biology Reviews* **30**, 112 (2016).
45. Legerská B., Chmelová D., Ondrejovič M.: *Nova Biotechnol. Chim.* **15**, 90 (2016).
46. Senthivelan T., Kanagaraj J., Panda R. C.: *Biotechnol. Bioprocess Eng.* **21**, 19 (2016).
47. Popli S., Patel U. D.: *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **12**, 405 (2015).
48. Ramsay J. A., Nguyen T.: *Biotechnol. Lett.* **24**, 1757 (2002).
49. Ma L., Zhuo R., Liu H., Yu D., Jiang M., Zhang X., Yang Y.: *Biochem. Eng. J.* **82**, 1 (2014).
50. Kanagaraj J., Senthivelan T., Panda R. C.: *Clean Technol. Environ. Policy* **17**, 331 (2015).
51. Campos R., Kandelbauer A., Robra K. H., Cavaco-Paulo A., Gübitz G. M.: *J. Biotechnol.* **89**, 131 (2001).
52. Osma J. F., Toca-Herrera J. L., Rodríguez-Couto S.: *Bioresour. Technol.* **101**, 8509 (2010).
53. Yang J., Yang X. D., Lin Y. H., Ng T. B., Lin J., Ye X. Y.: *PLoS One* **10**, 14 (2015).
54. Ali N., Hameed A., Ahmed S.: *J. Hazard. Mater.* **164**, 322 (2009).
55. Holkar C. R., Jadhav A. J., Pinjari D. V., Mahamuni N. M., Pandit A. B.: *J. Environ. Manage.* **182**, 351 (2016).
56. Kűes U.: *Curr. Opin. Biotechnol.* **33**, 268 (2015).
57. Arca-Ramos A., Ammann E. M., Gasser C. A., Nas-told P., Eibes G., Feijoo G., Lema J. M., Moreira M. T., Corvini P. F.: *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **23**, 3217 (2016).
58. Benzina O., Daassi D., Zouari-Mechichi H., Frikha F., Woodward S., Belbahri L., Rodríguez-Couto S., Mechichi T.: *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **20**, 5177 (2013).
59. Khelifi-Slama R., Mechichi T., Sayadi S., Dhouib A.: *J. Microbiol.* **50**, 226 (2012).
60. Minussi R. C., Miranda M. A., Silva J. A., Ferreira C. V., Aoyama H., Marangoni S., Rotilio D., Pastore G. M., Duran N.: *Afr. J. Biotechnol.* **6**, 1248 (2007).
61. Khelifi R., Belbahri L., Woodward S., Ellouz M., Dhouib A., Sayadi S., Mechichi T.: *J. Hazard. Mater.* **175**, 802 (2010).
62. Guan Z. B., Shui Y., Song C. M., Zhang N., Cai Y. J., Liao X. R.: *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **22**, 9515 (2015).
63. Fleischmann C., Lievenbruck M., Ritter H.: *Polymers* **7**, 717 (2015).

K. Herkommerová and I. Pichová (*Laboratory of Viral and Microbial Proteins, Institute of Organic Chemistry and Biochemistry of the Czech Academy of Sciences, Prague*): **Biodegradation of Textile Dyes in Wastewaters by Laccases**

Environmental pollution by industrial waste is a major problem today. Textile industry is one of the principle sources of this pollution because it releases a large amount of water containing residues of dyes and other additives. Many methods are being currently used for wastewaters treatment. Here, we describe in detail the role of laccases in the process of dyes degradation and wastewaters treatment. The toxicity of wastewater before and after treatment by various methods is also discussed.