

METÓDY ODSTRÁŇOVANIA FARBÍV

Zuzana SANNY¹ - Alexandra KUCMANOVÁ² - Kristína GERULOVÁ³

DYE REMOVAL METHODS REVIEW



¹ Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta Trnava, Ústav integrovanej bezpečnosti, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika ✉ Email: zuzana.sanny@stuba.sk ORCID iD: 0000-0003-2079-4277

² Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta Trnava, Ústav integrovanej bezpečnosti, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika ✉ Email: alexandra.kucmanova@stuba.sk ORCID iD: 0000-0003-3089-7712

³ Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta Trnava, Ústav integrovanej bezpečnosti, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika ✉ Email: kristina.gerulova@stuba.sk ORCID iD: 0000-0003-2588-8627

Competing interests : The author declare no competing interests.

Publisher's Note: Slovak Society for Environment stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations. Copyright: © 2021 by the authors.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

This license allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, so long as attribution is given to the creator. The license allows for commercial use.

Review text in the conference proceeding: Contributions published in proceedings were reviewed by members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.

ABSTRAKT

Farbivo je vďaka svojej komplexnej chemickej štruktúre jednou z najťažších zložiek v odpadových vodách z textilu, ktoré je možné čistiť. Farbivá sú organicky znečisťujúce látky a svojimi nebezpečnými účinkami predstavujú vysoké riziko pre ľudí a pre vodný život. Aby sa znížili negatívne účinky odpadových vôd kontaminovaných farbivami, musí sa odpadová voda pred vypúšťaním do hlavných prúdov starostlivo čistiť. V tomto príspevku sú spomenuté metódy odstraňovania farbív z vody a odpadových vôd. Zdôraznené sú techniky čistenia odpadových vôd, ako je adsorpcia, membránová technológia, ozonizácia, fotokatalýza, biologické čistiace postupy. Každá z metód má svoje výhody či nevýhody. Chemické ošetrovanie nie je nákladovo efektívne. Adsorpčný proces je jednoduchý a efektívny. Aktívne uhlie je účinnejšie z dôvodu vysokého špecifického povrchu a vysokej adsorpčnej kapacity, ale vyžaduje vysoké náklady a úsilie na jeho výrobu pomocou niekoľkých odpadových produktov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: Farbivá, odpadová voda, čistiace techniky, adsorpcia, biologické metódy, chemické metódy

ABSTRACT

Due to its complex chemical structure, the dye is one of the most difficult components in textile wastewater that can be treated. Dyes are organic pollutants and due to their dangerous effects, pose a high risk to humans and aquatic life. To reduce the negative effects of wastewater contaminated with dyes, the wastewater must be carefully treated before being discharged into the main streams. This

paper mentions methods for removing dyes from water and wastewater. Emphasis is placed on wastewater treatment techniques such as adsorption, membrane technology, ozonation, photocatalysis, biological treatment processes. Each of the methods has its advantages or disadvantages. Chemical treatment is not cost-effective. The adsorption process is simple and efficient. Activated carbon is more efficient due to its high specific surface area and high adsorption capacity but requires high costs and effort to produce it using several waste products.

KEY WORDS: *Dyes, Wastewater, Wastewater Treatment techniques, Adsorption, Biological methods, Chemical methods*

ÚVOD

Do životného prostredia sa vypúšťa veľké množstvo farebných odpadových vôd s vlastnosťami toxickými, biologicky neodbúrateľnými a karcinogénnymi a spôsobuje vážne environmentálne problémy. Prítomnosť niektorých toxických farbív v priemyselných odpadových vodách je hlavným problémom životného prostredia, pretože sú zvyčajne veľmi odolné voči mikrobiálnej degradácii. V niektorých situáciách spôsobí roztok farbiva anaeróbnou degradáciu a vytvorí karcinogénne zlúčeniny, ktoré skončia v potravinovom reťazci [1].

Hlavným problémom resp. zdrojom, ktorý ovplyvňuje kvalitu pitnej vody v dôsledku prítomnosti organických znečisťujúcich látok, sú syntetické farbivá pochádzajúce zo farbenia textilných vlákien, papiera, kože, plastov, elastomérov a liečiv. Vzhľadom na vysokú farebnú intenzitu a veľkú variabilitu v zložení je veľmi ťažké čistiť textilné odpadové vody [2]. Na čistenie týchto druhov odpadových vôd sú potrebné životaschopné technicko-ekonomické riešenia. Ekologická a ekonomicky prijateľná sanácia odpadových vôd pomocou nanotechnológie je jednou z aktuálnych oblastí zamerania. Nanobioremediácia je nová vznikajúca technika, ktorá využíva nanočastice na čistenie životného prostredia a účinne odstraňuje znečisťujúce látky a farbivá [1].

1. KLASIFIKÁCIA FARBÍV

Farbivá sú chemické zlúčeniny, ktoré sa môžu pripojiť k povrchom alebo tkaninám a dodať im farbu. Väčšina farbív sú komplexné organické molekuly a vyžaduje sa od nich odolnosť voči mnohým látkam, ako je napríklad pôsobenie detergentov. Syntetické farbivá sa široko používajú v mnohých oblastiach vyspelých technológií [3].

Molekula farbiva obsahuje komplexnú chemickú štruktúru chromogén-chromosféry, ktorá sťažuje biologický rozklad. Z vyrobeného farbiva 80% používa textilný priemysel. Textilný priemysel využíva na mokré spracovanie textilu značné množstvo vody a chemikálií. S procesom farbenia súvisí takmer 8 000 chemických výrobkov [1]. Vzhľadom na vysokú rozpustnosť farbív vo vode je ťažké odstrániť farbivá z odpadových vôd konvenčnými metódami. V dôsledku nesprávneho procesu farbenia sa prebytočné farbivo mieša s vodou a uvoľňuje sa ako odpadová voda [4].

Farbivá sú rozpustné v substráte a tak sa dispergujú na molekulárnej úrovni, zatiaľ čo **pigmenty** sú nerozpustné a dispergujú sa ako častice. Farbivá poskytujú jasnejšiu farbu ako bežné pigmenty, sú však menej stabilné proti svetlu a menej trvácne. Častice pigmentu musia byť na podklad pripevnené ďalšími zlúčeninami, napríklad polymérom vo farbe, plastu alebo tavenine [5].

Farbivá môžu byť **prírodné**, ktoré sa získavajú z rastlín, zvierat, hmyzu a prírodných minerálnych zdrojov, alebo môžu byť **syntetické**, ktoré sú vzhľadom na svoje biologicky neodbúrateľné komplexné molekulárne štruktúry spojené s vážnym nebezpečným problémom pre vody [6].

Farbivá sú klasifikované ako kyslé (aniónové), zásadité (kationové) [6] a neiónové (disperzné farbivá) podľa ich disociačného správania vo vodných roztokoch [7]. Kyslé farbivá sú soli sírových, karboxylových alebo fenolových skupín a sú rozpustné vo vode a môžu byť čiastočne alebo úplne viazané na kationový substrát (ako sú vlna, hodváb, nylon a akrylové vlákna). Zásadité farbivá sú kationové farbivá, ktoré obsahujú monoazoové, diazoické a azínové zlúčeniny [6].

V súčasnosti existuje 100 000 komerčne dostupných farbív [8] a na proces farbenia sa vo väčšine textilného priemyslu používa 60 - 70% azo skupinových farbív a približne 15 - 20% celkového množstva farbiva sa vypúšťa do životného prostredia počas procesu [9].

Okrem vyššie uvedenej kategorizácie sú farbivá veľmi často klasifikované podľa chemickej štruktúry, vrátane azo, antrachinónu, indigoidu, nitroza, nitro a triarylmetánu [10].

1.1. Prírodné farbivá

Farbivo z prírodných zdrojov môže znížiť riziko syntetických farbív. Farbivá je možné extrahovať zo stromov, kôry, listov, kvetov a mnohých ďalších zdrojov. Väčšina prírodných farbív vykazuje špeciálne vlastnosti, ako sú antimikrobiálne vlastnosti, menšia toxicita, nižšia alergénita, UV ochrana. Použitie prírodných farbív v procese farbenia textilu môže byť krokom k novej ére menej znečisťujúceho spracovania textilu. Používanie biologicky odbúrateľných, netoxických a menej znečisťujúcich prírodných farbív bude šetrné k životnému prostrediu. K najpoužívanejším prírodným zložkám, z ktorých sa získavajú farbivá, sú ovocie z opuncie, list Henny, kurkuma, turecká červená borovica, šafran, Indigo, granátové jablko, šupka z červenej cibule, eukalyptový strom a nechtíkový kvet [11].

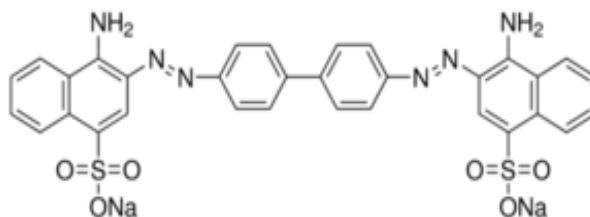
Medzinárodný dopyt po prírodných farbivách je asi 10 000 ton, čo je iba 1% svetovej spotreby syntetických vlákien. Prírodné farbivá obsahujú širokú škálu chemických tried ako indigoid, lac, antrachinóny, naftochinóny, flavóny, chlorofyl a ketón [12].

1.2. Syntetické farbivá

Sú farbivá pochádzajúce z organických alebo anorganických molekúl. Tieto textilné farbivá sú zaradené do niekoľkých skupín, pričom ako základ pre ich klasifikáciu je použitá všeobecná chémia farbív [2].

Azo farbivá kationové alebo aniónové nesú jednu alebo viac azoických väzieb (N=N). Okrem stability voči svetlu, teplu a aeróbne tráveniu, môžu spôsobiť vážne ohrozenie ľudského zdravia (vracanie, cyanóza, alergické problémy a genetické mutácie) [13].

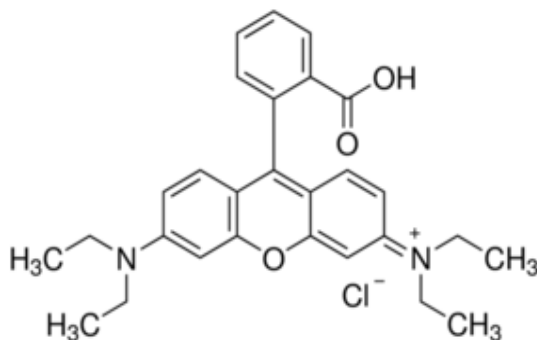
Azofarbivá, tvoria najväčšiu skupinu doteraz známych organických farbív. Medzi kyslé farbivá patrí **kongo červená (CR)**. Je najbežnejším vo vode rozpustným azo-farbivom, ktoré sa široko používa v bavlnenom textilnom, drevárskom a papierenskom priemysle. Je to sodná soľ kyseliny benzidíndiazo-bis-1-naftylamín-4-sulfónovej (vzorec: $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ (Obr. 1) s molekulovou hmotnosťou $696,66 \text{ g mol}^{-1}$ [6].



Obr. 1 Štruktúra farbiva Kongo Red [14]

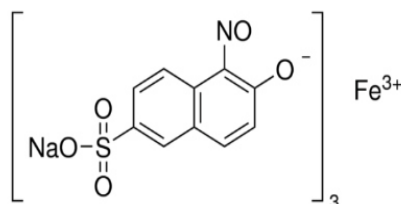
Mení farbu z tmavočervenej pri pH 12 na modrú pri pH 4-2. Používa sa ako indikátor pH [15]. CR významne znečisťuje vodu a môže mať vplyv na morský život, ako sú rastliny a vodné organizmy. U ľudí spôsobuje toxicitu a choroby, ako sú mutácie a problémy s dýchaním [16].

Rodamín B (RB) je kyslé farbivo so všeobecným vzorcom $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ (Obr. 2) a s molekulovou hmotnosťou $479,02 \text{ g mol}^{-1}$. Často sa používa ako stopovacie farbivo vo vode na určenie rýchlosti a smeru toku a transportu. Rodamínové farbivá fluoreskujú a dajú sa tak ľahko a lacno zistiť pomocou fluorometrov [6].



Obr. 2 Štruktúra farbiva Rodamin B [17]

Naftolová zelená B (NGB) alebo tiež kyslá zelená 1, je pseudo oktaedrický komplex Fe^{3+} , ktorý obsahuje 1-nitroso-2-naftol-6-sulfonát (NNSH) v deprotonizovanom stave (NNS-) akobidentátny ligand (bidentátne ligandy sa môžu viazať k centrálnemu atómu prostredníctvom dvoch väzieb súčasne) [18]. Chemická štruktúra je znázornená na Obr. 3.



Obr. 3 Štruktúra farbiva Naftolová zelená [19]

Naftolová zelená patrí medzi aniónové farbivá používajúce sa na pigmentáciu rôznych materiálov, ako je drevo, hodváb, bavlna. U ľudí spôsobí zvýšenie srdcovej frekvencie, šok a cyanózu.

2.VPLYV TOXICKÝCH FARIEB NA ŽIVÉ ORGANIZMY

Farbivá, ako sú napr. kongo červená, rodamin B, metylénová modrá, metylénová violet, predstavujú vážny problém v životnom prostredí kvôli ich zložitým štruktúram a biologicky odbúrateľnému charakteru, vďaka ktorým sú toxické pre živé organizmy. Tieto farbivá negatívne ovplyvňujú ekosystém, znižujú jeho estetickú kvalitu a väčšinou sú karcinogénne [6]. Vysoká koncentrácia farbív v odpadových vodách pochádzajúcich z textilného priemyslu navyše zabraňuje prenikaniu kyslíka a slnečného žiarenia do vodného prostredia, čo má negatívny dopad aj na prítomnosť vodných organizmov a môže spôsobiť ich úhyn. V mnohých prípadoch už koncentrácia farbiva pod 1 ppm spôsobuje výrazné zafarbenie vody [9].

V záujme zvýšiť ochranu životného prostredia je dôležité minimalizovať toxicitu farbív a ich znečistenie, a to vhodnou úpravou odpadovej vody pred jej vypustením do vodného recipientu. V súčasnosti je v praxi k dispozícii niekoľko metód na čistenie odpadových vôd. Sú to pokročilé spôsoby čistenia odpadových vôd, ako je napríklad adsorpcia, nanofotokatalyzátor, membránová filtrácia, nanofotokatalýza spojená s keramickou membránovou filtráciou a čistenie odpadových vôd chemickými a biologickými metódami [20][21].

2.1. Metódy odstraňovania farbív

Na ošetrovanie odpadových vôd kontaminovaných farbivami sa používa niekoľko metód biologických, chemických a fyzikálnych, napr. ozonizácia, pokročilá oxidácia, elektrochemická oxidácia, biosorpcia, reverzná osmóza, zrážanie, membránová filtrácia, flokulácia/koagulácia, adsorpcia, ultrazvuková, fotochemická a sonochemická degradácia, fotokatalytická degradácia [8][10].

Nanotechnológia je definovaná ako transformácia hmoty pomocou fyzikálnych, chemických a biologických techník a procesov s alebo bez začlenením ďalších zložiek na výrobu látok so špeciálnymi funkciami, vylepšenými charakteristikami a špecifickými atribútmi, ktoré je možné použiť v rôznych oblastiach použitia [22].

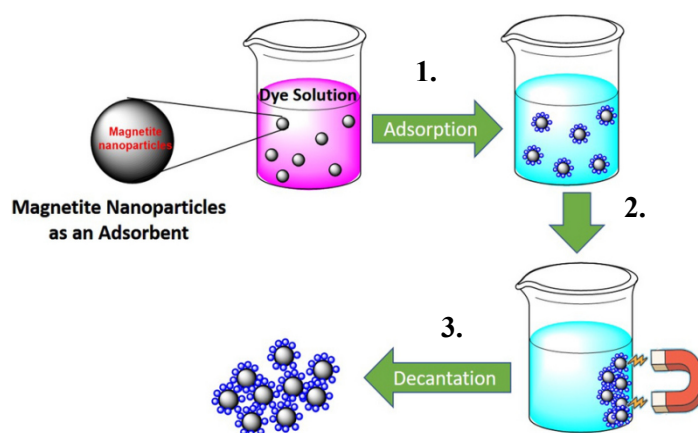


Úprava vody je najväčšou oblasťou použitia pre nanoremediáciu. Je to spôsobené rozmanitou a prevládajúcou kontamináciou, ktorá sa všeobecne rozdeľuje na rozpustené organické látky (detergenty, pesticídy, liečivá, biomateriály), anorganické látky (ťažké kovy a ióny arzenu, rozpustené soli a jemné frakcie)[23][24]. Chemické a biologické látky je možné detegovať a odstrániť pomocou nanočastíc, nanomembránových a nanokompozitných materiálov[25].

Adsorpcia

Jednou z techník čistenia odpadovej vody, či už z dôvodunízkyh nákladov a dostupnosti širokej škály adsorbentov, flexibility a jednoduchosti prevádzky a necitlivosti na toxické znečisťujúce látky je **adsorpcia** považovaná za veľmi efektívnu metódu používanú pri opakovanom čistení vody[26]. Nevýhodou je, že nemožno na odstránenie všetkých druhov znečisťujúcich látok použiť jediný adsorbent. V súčasnosti účinným adsorbentom na čistenie vody a čistenie odpadových vôd je **aktívne uhlie**. Hlavným problémom spojeným s používaním aktívneho uhlia ako adsorbenta na čistenie odpadových vôd je však vysoká cena. Ako alternatívy sa používajú materiály z poľnohospodárskeho odpadu. Výhodou lacných adsorbentov je dostupnosť vo veľkom množstve, nízka ekonomická hodnota a sú ekologické. Niektoré štúdie využívajú biopolyméry a prírodné anorganické materiály na výrobu kompozitov, zatiaľ čo iné používali syntetické polyméry a anorganické chemikálie navytvorenie nanokompozitov na báze polymérov s vysokou adsorpčnou kapacitou. Nanokompozity na báze polymérov sa používajú ako alternatívne adsorbenty na odstraňovanie nebezpečných znečisťujúcich látok kvôli vysokej adsorpčnej kapacite, stabilite a ľahkej regenerácii [27].

Pre rôzne znečisťujúce látky sa na základe ich vlastností používajú rôzne adsorbenty. Napríklad **adsorbenty na báze magnetických nanočastíc** majú veľkú účinnosť pri odstraňovaní farbív z vodného roztoku kvôli svojim výnimočným fyzikálnym a chemickým vlastnostiam. Tieto nanočastice navyše umožňujú modifikáciu ich povrchov zavedením určitých organických ligandov a skupín, ktoré výrazne zvyšujú adsorpčné parametre, napr. magnetit [28]. Navyše, po desorpcii adsorbovaných molekúl farbiva z povrchu magnetického adsorbentu je možné magnetickú adsorbent opätovne použiť. Preto sú magnetické nanočastice považované za lacné, prístupné, magneticky oddeliteľné adsorbenty pre jednoduchú, efektívnu, ekonomickú a masívnu adsorpciu molekúl farbiva z vodných vzoriek. Na obr. 4 je zjednodušene znázornená magnetická separácia farbív vo vzorke vody. Prvým krokom je adsorpcia molekúl farbiva z vodných vzoriek. Druhý krok predstavuje magnetickú separáciu adsorbentu a posledným krokom je regenerácia magnetických nanočastíc pre ďalší beh adsorpcie[29].



Obr. 4 Adsorpcia farbiva pomocou magnetických nanočastíc[29]

Pri čistení odpadovej vody sa používajú **nanomateriály na báze uhlíka** (uhlíkové nanorúrky, fulerény, grafén) a nano - oxidy kovov (FeCl_3 , Mn, Al, Ti, Mg, Ce) [30].

Spomedzi všetkých dostupných nanočastíc majú **nanočastice striebra** a uhlíkové nanorúrky najširšiu škálu aplikácií. O niektorých z nich je známe, že majú antibakteriálne vlastnosti (narušujú rozmnožovanie baktérií). Priemyselne vyrábané NČ nachádzajú široké uplatnenie v šperkárstve,



fotografií a rôznych priemyselných aplikáciách. Veľké percento (90%) vyrobených NČ sa pridáva k niektorým výrobkom, ako sú výrobky z gúmy a betónu, aby sa zlepšila pevnosť [31].

Membránová technológia

Pri membránovom procese sa v porovnaní s konvenčnými systémami na úpravu vody spotrebuje menej energie a menej miesta. Membránové bioreaktory sa považujú za spoľahlivú technológiu na čistenie vody a odpadových vôd, ktorá kombinuje biologické reaktory s filtračným procesom, aby prekonala nevýhody konvenčných membránových systémov. Nevýhodou membrán je ich zanesenie. Riešenie problému zanesenia membrány pomocou nových materiálov môže viesť k rozšírenej aplikácii membránových bioreaktorov na čistenie vody a odpadových vôd a môže viesť k zníženiu nákladov na čistenie [27].

Membránové technológie sú jednou z odporúčaných metód spracovania textilných odpadov kvôli dobrým výsledkom pri odstraňovaní znečisťujúcich látok, ako aj vďaka technológiám recyklácie vody v procesoch textilnej výroby. Je to aplikácia pokročilých membrán v textilnom priemysle, konkrétne reverzná osmóza, nanofiltrácia, ultrafiltrácia, mikrofiltrácia, elektrodialýza, membránový bioreaktor a fotokatalytická membrána [32].

Ozonizácia

Ozón je jedným z najsilnejších oxidantov a bežne sa používa na čistenie komunálnych vôd a odpadových vôd. Je šetrný k životnému prostrediu, pri ktorom sa znečisťujúce látky vrátane farby, zápachu a mikroorganizmov priamo ničia oxidáciou bez vytvárania škodlivých chlórovaných vedľajších produktov alebo významných zvyškov. Ozón má nízku rozpustnosť a je to vysoko reaktívny plyn. Obvykle sa generuje na mieste zo suchého vzduchu alebo čistého kyslíka prostredníctvom vysokonapäťového korónového výboja [33].

Procesu ozonizácie vo všeobecnosti pomáhajú určité zlúčeniny, katalyzátory. Rôzne katalyzátory pre katalytickú ozonizáciu, vrátane homogénnych a heterogénnych katalyzátorov, ako sú ióny kovov, oxidy kovov, materiály na báze uhlíka pridané do systému môžu vykazovať vynikajúcu fotokatalytickú aktivitu proti degradácii farbiva [34]. Počas katalytickej ozonizácie môžu katalyzátory podporovať rozklad O_3 a vytvárať aktívne voľné radikály, ktoré môžu zvýšiť degradáciu a mineralizáciu organických znečisťujúcich látok [35].

Fotokatalýza

Prírodná organická hmota predstavuje významnú hrozbu pre úpravu pitnej vody a značné riziko pre verejné zdravie. Pokročilé oxidačné procesy (angl. *Advanced Oxidation Processes* - AOP) sú široko používané metódy na odstraňovanie prírodnej organickej hmoty a úpravu vody. V oblasti AOP si fotokatalýza získala veľký záujem z celého sveta [36]. Princíp fotokatalýzy spočíva vo využívaní slnečného žiarenia a používa ho na oxidáciu rôznych kontaminantov vo vode, ako sú organické látky, mikróby a mikropolutanty, farbivá, antibiotiká [37][38].

V závislosti od toho, či je katalyzátor v inej fáze ako reaktanty (heterogénne) alebo v rovnakej fáze (homogénne), hovoríme o fotokatalýze heterogénnej alebo homogénnej. Heterogénne fotokatalyzátory sú oxidy a polovodiče kovov. Oxid titaničitý (TiO_2), najbežnejšie používaný fotokatalyzátor, má pomerne nízku cenu, je netoxický, stabilný a vysoko aktívny [39][40]. Pri ožiarení vhodnou vlnovou dĺžkou ($\lambda < 390$ nm) sa vytvárajú elektróny a otvory vo vodivých a valenčných pásmach TiO_2 . Medzifázový prenos elektrónov s látkami adsorbovanými na povrch TiO_2 alebo v jeho blízkosti indukuje tvorbu vysoko oxidujúcich radikálov, ako sú hydroxylové (OH), superoxidové (O_2^-), dusičnanové radikály a singletový kyslík, ktoré sú zodpovedné za degradáciu a mineralizáciu znečisťujúcich látok [39].

Medzi ďalšie heterogénne fotokatalyzátory patrí oxid zinočnatý (ZnO), ktorý vykazuje veľkú fotokatalytickú aktivitu, a grafitický nitrid uhlíka ($g-C_3N_4$), ktorý sa používa na odstraňovanie CO_2 z atmosféry [41].

Homogénne (foto-Fenton) aj heterogénne metódy fotokatalýzy môžu používať na ožarovanie buď UV svetlo alebo slnečné svetlo. Fotofentonová fotokatalýza má vyššiu reaktivitu ako heterogénna fotokatalýza, no jej prevádzka je zložitá a nákladná z dôvodu úpravy pH [42].

Biologické čistenie

Biologické čistiace postupy na odstraňovanie kontaminácií z odpadových vôd je bez používania chemikálií. Princíp biologickej úpravy je premena biologicky rozložiteľných odpadov prostredníctvom biologických procesov rôznymi mikroorganizmami. Procesy spracovania je možné rozdeliť na aeróbne alebo anaeróbne procesy. Použitými organizmami môžu byť baktérie (rod *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Providencia*), mikroskopické huby (rod *Aspergillus*), riasy (rod *Cladophora*, *Chara*) alebo rastliny. Pri biologickom ošetrovaní sa používa aj enzýmový systém. Konečnými produktmi po aeróbnom spracovaní sú oxid uhličitý, voda a biomasa, zatiaľ čo konečnými produktmi po anaeróbnom spracovaní sú oxid uhličitý, metán a biomasa. Táto úprava je schopná spracovať roztoky farbív spôsobom šetrným k životnému prostrediu bez vysokých investícií a nákladov [43].

ZÁVER

Prieskum literatúry odhaľuje, že adsorpcia a biologické úpravy sú v posledných rokoch najčastejšie skúšanými technikami odstraňovania farbív. Zistilo sa, že spomedzi všetkých doposiaľ uvedených metód adsorpčný proces ukazuje sľubné výsledky a prekonáva takmer všetky nevýhody. Jednou z najúčinnějších, ekonomicky výhodných, efektívnych metód pre odstránenie farbív z vodných roztokov je využitie adsorpcie pomocou magnetických nanočastíc. Ďalšou sľubnou technológiou pre odstránenie aj biologicky ťažko rozložiteľných organických látok je využitie procesov AOP. Membránová filtrácia je síce spoľahlivá a energeticky výhodná, avšak problémom je častá výmena membrán v dôsledku ich zanášania znečisťujúcimi látkami. Biologické metódy čistenia odpadových vôd sú účinnou ekologickou alternatívou. Pre zvýšenie efektivity odstraňovania farbív z odpadovej vody sa v praxi sa môžeme častokrát stretnúť s využitím kombinácie viacerých metód.

Pod'akovanie [zaradenie príspevku]

Článok bol vypracovaný s podporou Projektu grantovej agentúry KEGA Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR č. 020STU-4 /2021: „Vybudovanie inovatívneho výučbového laboratória pre praktické a dynamické vzdelávanie študentov v odbore BOZP.“

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] DESHPANDE, B. D., AGRAWAL, P. S., YENKIE, M. K. N., DHOBLE, S. J. 2020: Prospective of nanotechnology in degradation of waste water: A new challenges. *Nano-Structures and Nano-Objects*, vol. 22, s. 100442. Available online: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352507X20300184>.
- [2] BENJELLOUN, M., MIYAH, Y., AKDEMIR EVRENDILEK, G., ZERROUQ, F., LAIRINI, S. 2021: *Recent Advances in Adsorption Kinetic Models: Their Application to Dye Types*, vol. 14, s. 4, ISBN 0000000310.
- [3] YAGUB, M. T., SEN, T. K., AFROZE, S., ANG, H. M. 2014: Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review, *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 209, s. 172–184.
- [4] PAI, S., KINI, M. S., SELVARAJ, R. Environmental and energy management. A review on adsorptive removal of dyes from wastewater by hydroxyapatite nanocomposites. *Environmental Science and Pollution Research*, vol.28(10), p. 11835-11849.
- [5] GÜRSES, S., AÇIKYILDIZ, A., GÜNEŞ, M., GÜRSES K. 2016 :*Chapter 2: Dyes and Pigments: Their Structure and Properties*.
- [6] TARA, N., SIDDIQUI, S. I., RATHI, G., CHAUDHRY, S. A., INAMUDDIN, ASIRI, A. M. 2019: Nano-engineered Adsorbent for the Removal of Dyes from Water: A Review,” *Curr. Anal. Chem.*, vol. 16, s. 1, 14–40.
- [7] ELGARAHY, A. M., ELWAKEEL, K. Z., MOHAMMAD, S. H., ELSHOUBAKY, G. A. 2021: A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process, *Clean. Eng. Technol.*, vol. 4, no. June, p. 100209.

- [8] HANAFI, M. F., SAPAWA, N. 2021: A review on the current techniques and technologies of organic pollutants removal from water/wastewater, *Materials Today: Proceedings*. vol. 31(1), p. 1-8.
- [9] MEGHWAL, K., KUMAWAT, S., AMETA, Ch., JANGID. 2020: Effect of Dyes on Water Chemistry, Soil Quality, and Biological Properties of Water, in *Impact of Textile Dyes on Public Health and the Environment*, s. 90–114.
- [10] RANI BUSHRA, M. A., MOHAMAD, S., ALIAS, Y., JIN, Y. 2021: Current approaches and methodologies to explore the perceptible adsorption mechanism of dyes on low-cost agricultural waste: A review,” *Press. J. Pre-proof*, vol. 318, s. 135907.
- [11] ANM, S., Ahmed F, Saha P., Talukder B. 2021: A Review on Natural Dyes: Raw Materials, Extraction Process, and their Properties, *Adv. Res. Text. Eng.*, vol. 6, No. 1, p. 1-6, 2021.
- [12] SINGH, K., KUMAR, P., V SINGH, N. 2020: Natural Dyes : an Emerging Ecofriendly Solution for Textile Industries, *Poll Res*, vol. 39, no. January, pp. 87–94, 2020.
- [13] NATARAJAN, E. , PONNAIAH, G. P. 2017: Optimization of process parameters for the decolorization of Reactive Blue 235 dye by barium alginate immobilized iron nanoparticles synthesized from aluminum industry waste, *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 7, pp. 73–88.
- [14] Sigma-Aldrich, Karta bezpečnostných údajov. Available online: <https://www.sigmaaldrich.com/SK/en/search/congored?focus=products&page=1&perPage=30&sort=relevance&term=Congo%20Red&type=product#>, 1998. [cit. 2021-13-09]
- [15] IQBAL, M. M. *et al.* 2021: Effective sequestration of Congo red dye with ZnO/cotton stalks biochar nanocomposite: MODELING, reusability and stability, *J. Saudi Chem. Soc.*, vol. 25, no. 2, p. 101176.
- [16] MIRZAEI, F., EKRAMIPOOYA, A., REZA, M. 2020: Selective separation of Congo Red from a mixture of anionic and cationic dyes using magnetic-MOF : Experimental and DFT study, *J. Mol. Liq.*, vol. 318, p. 114051.
- [17] Sigma-Aldrich, Karta bezpečnostných údajov - [on-line] Available online: <https://www.sigmaaldrich.com/SK/en/substance/rhodamineb4790181889>, [cit. 2021-13-09]
- [18] KUNKELY, H., VOGLER, A. 2003: Photolysis of Naphthol Green B in aqueous solution. Photoreduction of Fe(III) induced by ligand-to-metal charge transfer excitation, *Zeitschrift für Naturforsch. - Sect. B J. Chem. Sci.*, vol. 58, no. 9, pp. 922–924.
- [19] ALI, A. A., EL-SAYED, S. R., SHAMA, S. A., MOHAMED, T. Y., AMIN, A. S. 2020: Fabrication and characterization of cerium oxide nanoparticles for the removal of naphthol green b dye, *Desalin. Water Treat.*, vol. 204, pp. 124–135.
- [20] HARIANI, P. L., FAIZAL, M., RIDWAN, R., MARSI, M., SETIABUDIDAYA, D. 2013: Synthesis and Properties of Fe₃O₄ Nanoparticles by Co-precipitation Method to Removal Procion Dye, *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, vol. 4, no. 3, pp. 336–340.
- [21] TAO, Q. *et al.* 2021: Fabrication, application, optimization and working mechanism of Fe₂O₃ and its composites for contaminants elimination from wastewater, *Chemosphere*, vol. 263. Elsevier Ltd, p. 127889.
- [22] MONDAL, P., ANWESHAN, A., PURKAIT, M. K.. 2020: Green synthesis and environmental application of iron-based nanomaterials and nanocomposite: A review, *Chemosphere*, vol. 259, p. 127509.
- [23] NASSAR, N. N..2010: Rapid removal and recovery of Pb²⁺ from wastewater by magnetic nano-adsorbents,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 538–546.
- [24] LINLEY, S., THOMSON, N. R. 2021: Environmental Applications of Nanotechnology: Nano-enabled Remediation Processes in Water, Soil and Air Treatment, vol. 232, No. 2. Water, Air, & Soil Pollution.
- [25] DESHPANDE, B. D., AGRAWAL, P. S., YENKIE, M. K. N., DHOBLE, S. J. 2020: Prospective of nanotechnology in degradation of waste water: A new challenges, *Nano-Structures and Nano-Objects*, vol. 22. Elsevier B.V., p. 100442.
- [26] LOU Z. *et al.* 2015: Magnetized bentonite by Fe₃O₄ nanoparticles treated as adsorbent for methylene blue removal from aqueous solution: Synthesis, characterization, mechanism,



- kinetics and regeneration, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 49, s. 199–205.
- [27] SOETAREDJO, F. E., ISMADJI, S., FOE, K., YI-HSU, J. 2018: Recent advances in the application of polymer-based nanocomposites for removal of hazardous substances from water and wastewater, in *New Polymer Nanocomposites for Environmental Remediation*, Elsevier Inc., s. 499–540.
- [28] SAHA, B., DAS, S., SAIKIA, J., DAS, G. 2011: Preferential and enhanced adsorption of different dyes on iron oxide nanoparticles: A comparative study, *J. Phys. Chem. C*, vol. 115, No. 16, s. 8024–8033.
- [29] PANDA, S. K. *et al.*, Magnetite nanoparticles as sorbents for dye removal: a review, *Environ. Chem. Lett.*, no. 0123456789, s. 2487–2525, 2021, doi: 10.1007/s10311-020-01173-9.
- [30] KHODAKARAMI, M., BAGHERI, M. 2021: Recent advances in synthesis and application of polymer nanocomposites for water and wastewater treatment, *Journal of Cleaner Production*, vol. 296. Elsevier Ltd, s. 126404.
- [31] TURAN, N. B., ERKAN, H. S., ENGIN, G. O., BILGILI, M. S. 2019: Nanoparticles in the aquatic environment: Usage, properties, transformation and toxicity - A review, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 130, s. 238–249.
- [32] MERESHCHENKO, A. S. 2021: Synthesis, morphology, and properties of functional nanomaterials., A special issue of Materials (issue belongs to the section "Advanced Nanomaterials and Nanotechnology).
- [33] SHRIRAM BALASUBRAMANYAN, KANMANI S, 2014: Ozonation of Textile Dyeing Wastewater - A Review," *J. Institue Public Heal. Eng.*, vol. 2014–15, No. September, s. 2014.
- [34] ADELIN, M. A., GUNAWAN, G., NUR, M., HARIS, A., WIDODO, D. S., SUYATI, L. 2020: Ozonation of methylene blue and its fate study using LC-MS/MS, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1524, No. 1..
- [35] WANG, J., CHEN, H. 2020: Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective, *Sci. Total Environ.*, vol. 704, s. 135249
- [36] JAMKHANDE, M. G., GHULE, P. G., BAMER, N.H.W., KALASKAR, A.H. 2019: Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications, *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 53, s. 101174.
- [37] CHERIYAMUNDATH, S., VAVILALA, L. S. 2020: Nanotechnology - based wastewater treatment, *Water Environ. J.*, vol. 35, No. 1, s. 123–132.
- [38] YAQOUB, A. A., PARVEEN, T., UMAR, K., IBRAHIM, M. N. M. 2020: Role of nanomaterials in the treatment of wastewater: A review, *Water Treat. with New Nanomater.*, vol. 12, No. 2, s. 495.
- [39] CECCATO R. *et al.* 2021: Chemosphere Features and application of coupled cold plasma and photocatalysis processes for decontamination of water, vol. 262..
- [40] HASSAN, M. E., LIU, G., OMER, E. O. M., GOJA, A. M., ACHARYA, S. 2019: Silver embedded C-TiO₂ exhibits improved photocatalytic properties with potential application in waste water treatment, *Arab. J. Chem.*, vol. 12, No. 7, s. 1134–1140.
- [41] LIU R. *et al.* 2020: Recent advancements in g-C₃N₄-based photocatalysts for photocatalytic CO₂ reduction: a mini review, *RSC Adv.*, vol. 10, No. 49, s. 29408–29418.
- [42] IBRAHIM, R. K., HAYYAN, M., ALSAADI, M. A., HAYYAN, A., IBRAHIM, S. 2015: Environmental application of nanotechnology: air, soil, and water," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 23, No. 14, s. 13754–13788..
- [43] AHMAD, A., MOHD-SETAPAR, S.H. *et al.* 2015: Recent Advances in New Generation Dye Removal Technologies: Novel Search of Approaches to Reprocess Waste Water," *RSC Adv.*, vol. 5, s. 30801–30818.