

FUNKCIONALIZACE BAVLNĚNÝCH VLÁKEN CYKLODEXTRINY

Molinová Eleldrida

Sekce – PŘÍRODNÍ, HUMANITNÍ a SPOLEČENSKÉ VĚDY,
Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická, 3. ročník
Bakalářský studijní program – CHEMIE SE ZAMĚŘENÍM NA VZDĚLÁVÁNÍ

Abstrakt: Rychlé střídání módních trendů a fenomén rychlé módy (fast fashion) vedou k předčasnému vyřazování oděvů a nadměrné tvorbě textilního odpadu. S cílem prodloužit užitnou hodnotu textilií se tato vědecká práce zabývá funkcionalizací bavlněných vláken cyklodextrinovým polymerem. Cílem úpravy bylo vytvořit materiál schopný reverzibilně sorbovat přírodní organická barviva, což by umožnilo opakované přebarvování oděvů a obnovu jejich pocitu novosti. Modifikace bavlny proběhla zesíťováním cyklodextrinu pomocí epichlorhydrinu v alkalickém prostředí. Sorpční schopnost funkcionalizované bavlny vůči zvoleným barvivům (β -karoten, chlorofyl) byla hodnocena pomocí kolorimetrického systému CIE $L^*a^*b^*$ a odchylek barevnosti ΔE^*_{00} . Modifikovaná bavlna vykazovala oproti nativní výrazně vyšší sorpci i desorpci barviv v důsledku tvorby reverzibilních inkluzních komplexů. Získané výsledky tak potvrzují potenciál cyklodextrinových polymerů při vývoji udržitelných a opakovaně modifikovatelných chytrých textilií.

Klíčová slova: β -cyklodextrin, epichlorhydrin, polymer, bavlna, chytré textilie, kolorimetrie

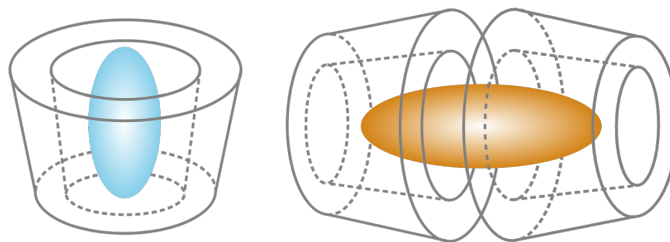
Úvod

Fenomén rychlé módy (fast fashion) a s ním spojená nadprodukce textilu představují enormní zátěž pro životní prostředí. Od roku 2000 došlo až k dvojnásobnému zvýšení produkce textilií na 132 milionů tun [1]. Nízká cena a rychlá obměna trendů vedou k tomu, že spotřebitelé vyřazují oděvy dávno před koncem jejich technické životnosti. Děje se tak často pouze kvůli ztrátě pocitu novosti, čímž vzniká obrovské množství zbytečného odpadu [2].

Situaci komplikuje i samotné materiálové složení oděvů. Většinu produkce dnes tvoří syntetické materiály v čele s polyesterem, které zanechávají výraznou uhlíkovou stopu a uvolňují mikroplasty [3]. Ani přírodní materiály, jako je bavlna, však nejsou bezproblémové; jejich kultivace vyžaduje extrémní množství vody, hnojiv a pesticidů [4]. Textilní průmysl proto nutně potřebuje inovativní technologické postupy, které prodlouží užitnou hodnotu oděvů a sníží nutnost neustálé produkce nových kusů.

Právě s cílem prodloužit životnost oděvu a zachovat jeho vizuální atraktivitu se tato vědecké práce zaměřuje na povrchovou modifikaci textilií pomocí cyklodextrinových polymerů. Modifikace cyklodextrinovými polymery propůjčuje textiliím duální přidanou hodnotu.

Cyklodextriny (CD) jsou cyklické oligosacharidy složené z D-glukopyranózových jednotek, které jsou mezi sebou spojeny $\alpha(1,4)$ -glykosidickou vazbou. Nejčastěji se využívají α -, β - a γ -cyklodextriny, které mají respektive 6, 7, 8 D-glukopyranózových jednotek. Tyto cyklodextriny mají tvar dutého komolého kužele, jehož okraje jsou tvořeny polárními hydroxylovými skupinami. V polohách 2 a 3 tvoří –OH skupiny sekundární okraj s větším průměrem a v polohách 6 primární okraj s menším průměrem. Do vnitřního prostoru, neboli kavity cyklodextrinu, směřují nepolární vazby C–H [5].



Obrázek 1: Inkluzní komplex 1:1 (vlevo) a 2:1 (vpravo)

Klíčovou vlastností cyklodextrinů je přítomnost nepolární kavity, která jim umožňuje tvorbu takzvaných inkluzních komplexů. Při tomto ději vystupuje cyklodextrin jako „hostitel“ a molekula inkludovaná v kavitě jako „host“ [6]. Schéma inkluzního komplexu je znázorněno na obrázku 1.

Jejich schopnost tvořit inkluzní komplexy umožňuje na jedné straně efektivně vázat molekuly způsobující zápach, a na straně druhé otevírá cestu k reverzibilnímu zachytávání určitých typů barviv [7]. Tyto vazby lze následně cíleně narušit a barvivo desorbovat, což umožňuje opakované přebarvování oděvu. Tento přístup efektivně obnovuje vizuální charakter produktu, čímž lze udržet zájem spotřebitele a zásadně podpořit dlouhodobou udržitelnost šatníku. Cílem této vědecké práce je vytvořit cyklodextrinem funkcionalizovanou bavlněnou textilií pomocí zesíťování a následně charakterizovat vzniklou strukturu a její schopnost sorpce zvolených organických látek v porovnání s nativní bavlnou.

1 Výsledky a diskuze

Cílem této vědecké práce bylo připravit bavlnu funkcionalizovanou β -cyklodextrinem, charakterizovat její vlastnosti a následně je porovnat s vlastnostmi nativní bavlny. Modifikovaná tkanina měla díky své schopnosti tvořit inkluzní komplexy vykazovat odlišnou afinitu k testovaným látkám. Následující podkapitoly se věnují prezentaci a interpretaci výsledků získaných experimentální částí práce.

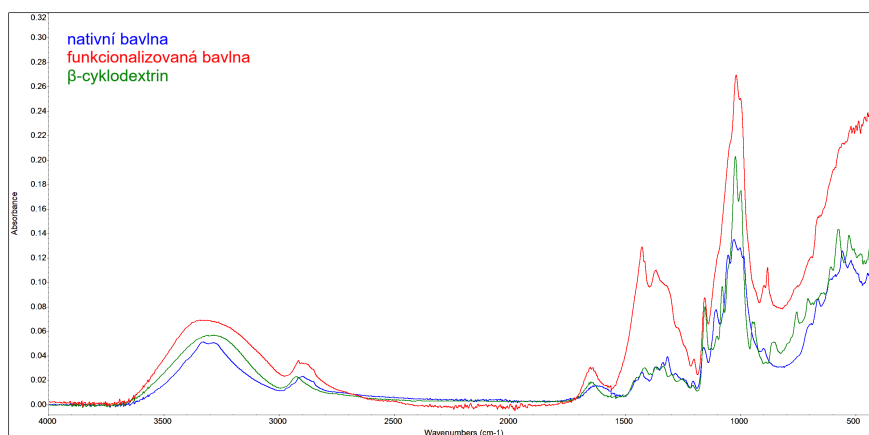
1. Příprava funkcionalizované bavlny

Pro optimalizaci přípravy modifikované bavlny bylo testováno několik různých objemů epichlorhydrinu (EPI) jakožto síťovacího činidla, a to při navážce 250 mg cyklodextrinu a konstantním objemu 3 ml roztoku NaOH. Zjištěné hodnoty hmotnostního přírůstku na zkušebních vzorcích o rozměrech 2×2 cm se pohybovaly v rozmezí 6–15 %. Obecně byl pozorován trend, kdy větší množství EPI vedlo k větší změně hmotnosti tkaniny po fixaci. Při dotykovém a vizuálním hodnocení vzorků se však ukázalo, že použití vyšších koncentrací vede ke znatelnému zhoršení vlastností textilie. Vzorky vykazovaly tužší omak a výraznější žloutnutí. Aby byla zachována dostatečná flexibilita a přirozený vzhled bavlněných vláken, byl pro finální reakci na zásobní tkanině o rozměrech 8×8 cm jako optimální zvolen objem 0,6 ml EPI. Následně byly připraveny dvě zásobní tkaniny.

Při přechodu na větší formát textilie nebyl objem epichlorhydrinu lineárně navýšen. Objem 0,6 ml byl na základě předchozích optimalizací vyhodnocen jako dostatečný pro úspěšné navázání cyklodextrinu. Záměrné nenavýšení množství tohoto síťovacího činidla sloužilo především k prevenci nadměrného zesíťování, které vedlo k nežádoucímu ztuhnutí tkaniny, ztrátě její ohebnosti a zhoršení jejich užitných vlastností. Úprava se tak týkala pouze objemu roztoku NaOH, jehož navýšení bylo nutné k zajištění rovnoměrného smáčení větší plochy vzorku, a odpovídajícího množství cyklodextrinu. Pro zásobní vzorky bylo pro reakci plátna o rozměrech 8×8 cm použito 0,6 ml EPI, 1 g β -cyklodextrinu a 30 ml NaOH.

2. Charakterizace funkcionalizované bavlny

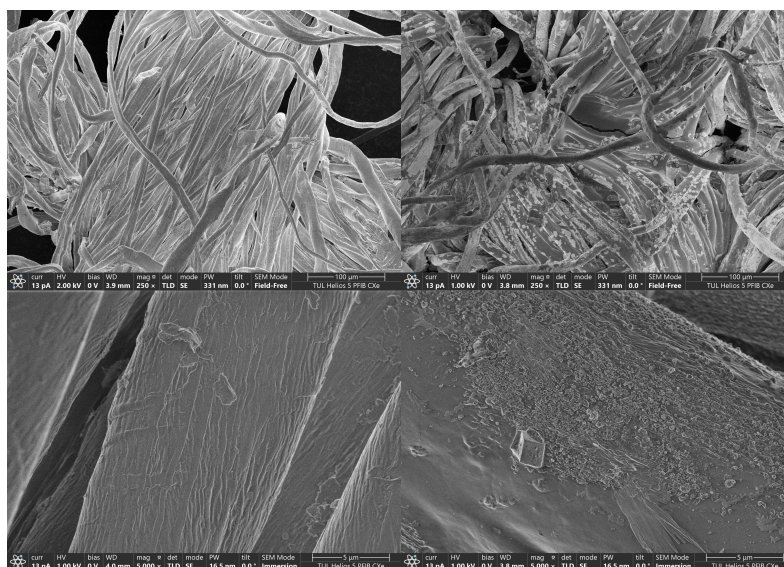
Pro ověření přítomnosti charakteristických funkčních skupin zesíťovaného cyklo dextrinu na bavlně byly vzorky analyzovány pomocí FTIR spektroskopie. Výsledné spektrum je vyobrazeno na obrázku 2 spolu se spektrem nativní bavlny a samotného β -cyklodextrinu.



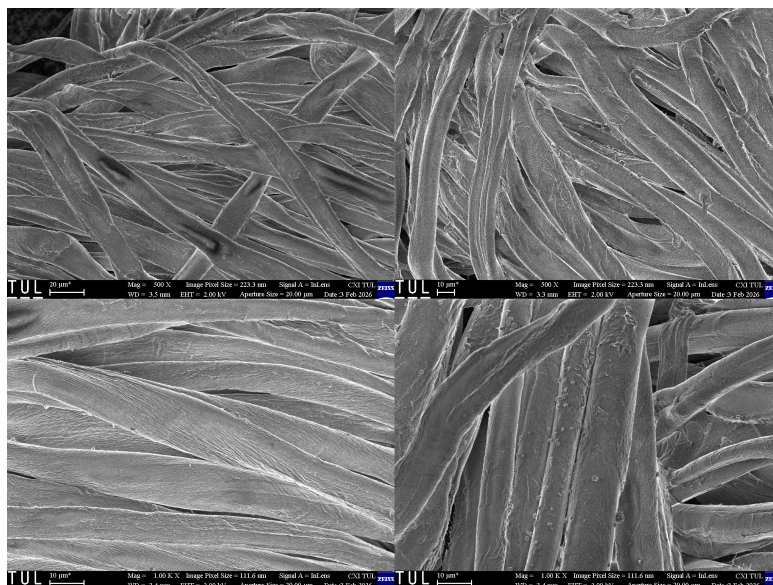
Obrázek 2: FTIR spektrum β -CD (zelená), nativní bavlny (modrá), funkcionalizované bavlny (červená)

Pro vizuální potvrzení chemické modifikace povrchu byly pořízeny SEM snímky. Již při menším zvětšení ($250\times$) na obrázku 3 je patrný rozdíl ve struktuře a vzhledu vláken. Funkcionalizovaná bavlna je pokrytá vrstvou polymeru a vlivem reakční lázně došlo k celkové změně její morfologie. V důsledku mercerace působením NaOH bavlněná vlákna nabobtnala a ztratila svůj původní stužkovitý tvar [8]. Vliv této mercerace je patrný také viditelným zmenšením volného prostoru (mezivlákněným pórů) mezi jednotlivými vlákny.

Při porovnání nativní bavlny s vypranou modifikovanou bavlnou (obrázek 4) je zřejmé, že cyklodextrinový polymer zůstal na povrchu vláken i po procesu praní. Rýhovaná struktura bavlny je stále vyplněna hladkým filmem a místy jsou stále přítomny polymerní aglomeráty a hrbolky. Avšak v porovnání s nevypranou modifikovanou bavlnou lze konstatovat, že část polymeru (pravděpodobně slabě vázaného nebo nezreagovaného) se vlivem mechanické agitace a praní z povrchu odstranila.



Obrázek 3: SEM snímky nativní bavlny (vlevo) a funkcionalizované bavlny (vpravo) při zvětšení $250\times$ (nahore) a $5000\times$ (dole)

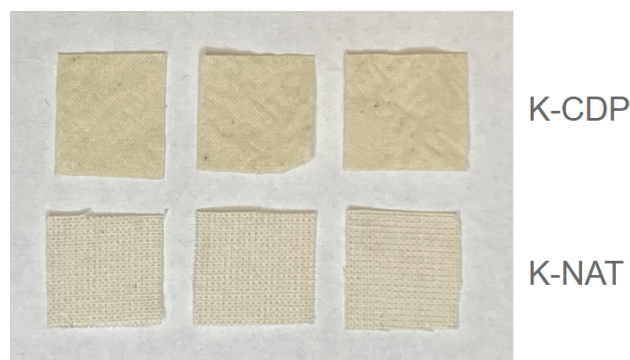


Obrázek 4: SEM snímky vyprané nativní bavlny (vlevo) a vyprané funkcionalizované bavlny (vpravo) při zvětšení 500× (nahore) a 1000× (dole)

3. Vizuální interpretace a souřadnice barevnosti připravených vzorků

Pro barvení oranžových vzorků byl použit roztok extraktu z β -karotenových kapslí v acetonu o přibližné koncentraci 6 mg β -karotenu / ml. V případě zelených vzorků byl aplikován roztok extraktu ze zeleně v ethanolu o koncentraci 20 mg extraktu / ml. Při volbě rozpouštědel byl primárně zohledněn aspekt ekologické šetrnosti, tudíž byl jako první volba testován ethanol. Ten se ukázal jako vhodné médium pro roztok extraktu ze zeleně, neboť v něm obsažený chlorofyl vykazuje v ethanolu dobrou rozpustnost [9]. Naopak lipofilní β -karoten se v ethanolu rozpouští velmi omezeně [10]. Z tohoto důvodu byl pro přípravu β -karotenového extraktu zvolen aceton, ve kterém se β -karoten rozpouští lépe [11]. Prací lázeň tvořil roztok komerčního čistícího prostředku (Jar) v destilované vodě o koncentraci 0,1 ml prostředku na 10 ml lázně.

Pro zřehlednění následného popisu a diskuze výsledků bylo zavedeno jednotné značení zkoumaných textilií. Zkoumáno bylo celkem osm různých skupin vzorků, které se lišily barevným odstínem (oranžová, zelená), povrchovou úpravou (nativní, modifikované CD polymerem) a procesem praní (nevyprané, vyprané). Z každé skupiny byly testovány tři vzorky. Kompletní přehled zkoumaných skupin a jejich použitých zkratk shrnuje tabulka 1. Fotodokumentaci kontrolních vzorků představuje obrázek 5.



Obrázek 5: Fotodokumentace vzorků ze skupin K-CDP a K-NAT

Tabulka 1: Přehled zkoumaných skupin vzorků a jejich zkratky

Popis skupiny vzorků	Zkratka
oranžové s CD polymerem	O-CDP
oranžové nativní	O-NAT
oranžové s CD polymerem vyprané	O-CDP-V
oranžové nativní vyprané	O-NAT-V
zelené s CD polymerem	Z-CDP
zelené nativní	Z-NAT
zelené s CD polymerem vyprané	Z-CDP-V
zelené nativní vyprané	Z-NAT-V
kontrolní s CD polymerem	K-CDP
kontrolní nativní	K-NAT

3.1 Souřadnice barevnosti CIE $L^*a^*b^*$ a odchylka barevnosti ΔE^*_{00}

Barvením a praním bylo celkem připraveno 24 vzorků. Pomocí UV-Vis spektrometru byly změřeny souřadnice barevnosti v prostoru CIE $L^*a^*b^*$ každého ze vzorků, společně s kontrolními vzorky neobarvené bavlny funkcionalizované CD polymerem a neobarvené nativní bavlny. Vzorky byly následně fotograficky zdokumentovány pro vizuální porovnání s naměřenými hodnotami. Souřadnice L^* definovaná v rozmezí 0–100 udává celkovou světlost vzorku, přičemž hodnoty blízké se k nule reprezentují tmavé odstíny a hodnoty blízké se k 100 odstíny velmi světlé. Chromatické souřadnice a^* a b^* definují barevnost a nabývají hodnot v intervalu od –128 do 127. Kladné hodnoty a^* indikují posun k červenému tónu, zatímco záporné k zelenému. Obdobně kladné hodnoty na ose b^* značí posun ke žluté barvě a záporné hodnoty k barvě modré [12].

Dále byly pro odpovídající si dvojice skupin (tedy vzorky CDP + NAT, CDP-V + NAT-V, atd.) stanoveny celkové barevné odchylky CIEDE2000 (ΔE^*_{00}) pomocí metodiky, kterou navrhli Luo et al. (2001) [13]. K samotným výpočtům byl využit výpočetní nástroj pro Microsoft Excel od autorů Sharma et al. (2005) [14], jehož algoritmus je detailně popsán v jejich publikaci [15]. Tabulka 2 přehledně shrnuje klasifikaci hodnot celkové barevné odchylky ΔE^*_{00} v kontextu lidského vizuálního vnímání.

Tabulka 2: Interpretace hodnot barevné odchylky ΔE^*_{00} z hlediska lidského vnímání [16]

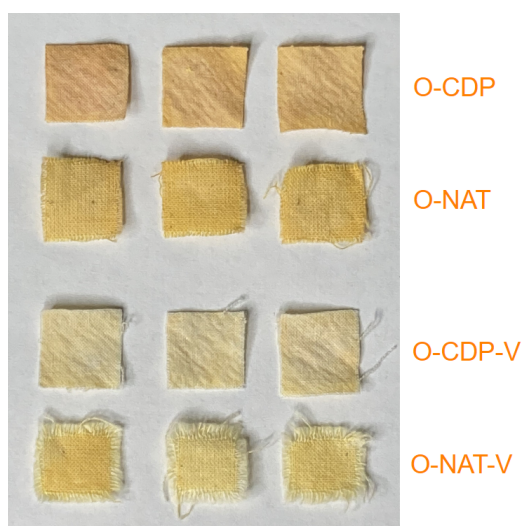
ΔE^*_{00}	Vizuální vnímání
< 1,0	nepostřehnutelný rozdíl
1,0–2,0	postřehnutelné při detailním zkoumání
2,0–3,5	zřetelný rozdíl na první pohled
3,6–5,0	výrazný rozdíl
> 5,0	zcela odlišný odstín

3.2 Vzorky obarvené extraktem β -karotenu

Vizuální porovnání vzorků obarvených extraktem β -karotenu je zachyceno na obrázku 6. Odpovídající průměrné hodnoty naměřených souřadnic barevnosti shrnuje tabulka 3 a vypočítané barevné odchylky ΔE^*_{00} shrnuje tabulka 4.

Tabulka 3: Průměrné hodnoty barevných souřadnic $L^* a^* b^*$ oranžových skupin vzorků

Skupina	L^*	a^*	b^*
O-CDP	82,624	9,351	26,796
O-NAT	84,062	7,496	32,115
O-CDP-V	89,045	2,576	24,422
O-NAT-V	88,809	3,833	30,927
K-CDP	90,667	0,032	13,878
K-NAT	93,158	-0,090	10,627



Obrázek 6: Fotodokumentace vzorků ze skupin O-CDP, O-NAT, O-CDP-V, O-NAT-V

Tabulka 4: Hodnoty barevných odchylek ΔE^*_{00} oranžové skupiny vzorků

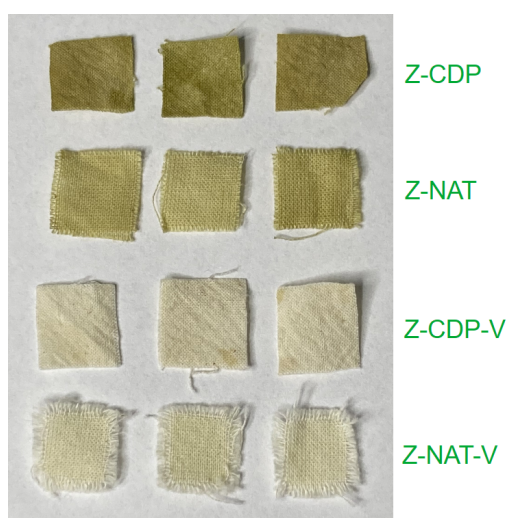
Skupina	ΔE^*_{00}	Vyprané skupiny v porovnání s kontrolními skupinami	ΔE^*_{00}
oranžové	3,4256	O-CDP-V + K-CDP	6,2352
oranžové vyprané	2,9740	O-NAT-V + K-NAT	11,2686

Modifikované vzorky bavlny (O-CDP) barvené β -karotenovým extraktem vykazovaly nižší vizuální sytost a tlumenější, oranžovo-hnědý tón než obarvená nativní bavlna (O-NAT). Tento posun k červené barvě (osa a^*) a úbytek žluté (osa b^*) souvisí s bathochromním posunem absorpčního maxima v důsledku enkapsulace chromoforu v kavitě cyklodextrinu [17]. Po pracím cyklu došlo u obou textilií k úbytku barviva, avšak vypraná nativní bavlna (O-NAT-V) si uchovala výrazně žlutější odstín ($b^* = 30,927$) než modifikovaný vzorek (O-CDP-V, $b^* = 24,422$). U nativní bavlny totiž molekuly β -karotenu ve vodném prostředí agregují [18] a mechanicky se zaklíňují v amfifilní struktuře celulózy [19], což ztěžuje jejich odstranění. Naopak u modifikovaných vzorků brání cyklodextrinový polymer tvorbě

rozsáhlých shluků a barvivo váže ve formě inkluzních komplexů, k nimž mají tenzidy snazší přístup. Tyto mechanismy potvrzují i vypočítané barevné odchylky. Podle tabulky 2 mezi nepranými vzorky O-CDP a O-NAT byl zaznamenán zřetelný rozdíl ($\Delta E_{00}^* = 3,4256$), který přetrvával i po vyprání ($\Delta E_{00}^* = 2,9740$). Srovnání s neobarvenou kontrolou ukázalo, že odchylka vypraného modifikovaného vzorku od původního stavu ($\Delta E_{00}^* = 6,2352$) je výrazně nižší než u vzorku nativního ($\Delta E_{00}^* = 11,2686$). Cyklodextrinová modifikace bavlny tedy prokazatelně mění optické vlastnosti navázaného barviva a umožňuje jeho efektivnější desorpci během praní.

3.3 Vzorky obarvené extraktem ze zeleně

Fotodokumentace pro vizuální porovnání vzorků obarvených extraktem ze zeleně (chlorofylem) je zachycena na obrázku 7. Odpovídající průměrné hodnoty naměřených souřadnic barevnosti zelených vzorků shrnuje tabulka 5 a vypočítané barevné odchylky ΔE_{00}^* shrnuje tabulka 6.



Obrázek 7: Fotodokumentace vzorků ze skupin Z-CDP, Z-NAT, Z-CDP-V, Z-NAT-V

Tabulka 5: Průměrné hodnoty barevných souřadnic $L^*a^*b^*$ zelených skupin vzorků

Skupina	L^*	a^*	b^*
Z-CDP	68,374	-2,340	17,682
Z-NAT	81,437	-3,158	19,073
Z-CDP-V	87,829	-1,076	15,392
Z-NAT-V	90,777	-2,628	13,642
K-CDP	90,667	0,032	13,878
K-NAT	93,158	-0,090	10,627

Tabulka 6: Hodnoty barevných odchylek ΔE_{00}^* zelené skupiny vzorků

Skupina	ΔE_{00}^*	Vyprané skupiny v porovnání s kontrolními skupinami	ΔE_{00}^*
zelené	9,6120	Z-CDP-V + K-CDP	2,4197
zelené vyprané	2,9452	Z-NAT-V + K-NAT	3,9175

U zelené sady vzorků barvené chlorofylem byl mezi modifikovanou (Z-CDP) a nativní (Z-NAT) bavlnou pozorován odlišný mechanismus než u β -karotenu. Vzorky Z-CDP dosáhly výrazně hlubšího zbarvení, což potvrzuje mnohem nižší hodnota světlosti ($L^* = 68,374$) oproti nativní bavlně ($L^* = 81,437$). Chromatické souřadnice a^* a b^* se však téměř nezměnily. Z toho vyplývá, že cyklodextrin sice radikálně zvyšuje sorpční kapacitu pro toto barvivo, ale neovlivňuje jeho chromatičnost. Inkluzní komplex totiž tvoří pouze hydrofobní fytolová část chlorofylu, zatímco chromofor (porfyrinový kruh [20]) zůstává mimo kavitu. Během praní došlo u obou typů vzorků k velmi podobné a vysoké míře desorpce barviva. Kvůli sterickým zábránám a amfifilní povaze molekuly chlorofylu [21] nedochází k jeho hlubší penetraci do vlákna ani kavit, takže zůstává vázán pouze slabě. Polární skupiny porfyrinového kruhu navíc usnadňují interakci s tenzidy, proto je chlorofyl z textilie odstraňován výrazně snáze než hydrofobní β -karoten. Objektívni měření tyto závěry potvrzují: markantní barevná odchylka nevypraných vzorků ($\Delta E_{00}^* = 9,6120$) jednoznačně dokládá vyšší sorpci modifikované bavlny. U vypraných vzorků v porovnání s neobarvenými kontrolami jsou pak odchylky značně nižší než u oranžové sady (pro modifikovanou bavlnu $\Delta E_{00}^* = 2,4197$, pro nativní $\Delta E_{00}^* = 3,9175$). I přes zřetelný zbytkový nazelenalý odstín (tabulka 2) tak došlo k velmi efektivnímu vyprání chlorofylu, které bylo u modifikované bavlny opět o něco úspěšnější.

Závěr

Tato vědecká práce se zabývala funkcionalizací bavlněných vláken cyklodextrinem za účelem zvýšení sorpční a desorpční schopnosti materiálu pro barevné organické molekuly. Prostřednictvím zesíťovací reakce cyklodextrinu s epichlorhydrinem v přítomnosti bavlněného plátna byla úspěšně připravena vlákna modifikovaná cyklodextrinovým polymerem. Jeho přítomnost na vláknech byla následně potvrzena pomocí FTIR spektroskopie. Analýza SEM prokázala vznik hladšího povrchu bavlněných vláken, což indikovalo úspěšné vytvoření rovnoměrného polymerního filmu.

Během barvení modifikovaných vzorků byla ověřena předpokládaná schopnost cyklodextrinů efektivně sorbovat a následně desorbovat zvolená přírodní barviva, konkrétně β -karoten a chlorofyl. V případě barvení β -karotenem byla zaznamenána efektivnější desorpce barviva z funkcionalizovaných vzorků ve srovnání s nativními, přičemž sorbované množství barviva bylo vizuálně srovnatelné. U chlorofylu naopak došlo k výrazně efektivnější sorpci na modifikované vzorky, avšak následná desorpce se vizuálně od nativních vzorků nelišila. Celkově však experimenty potvrdily funkčnost navrhovaného konceptu, který otevírá cestu k tvorbě funkčních textilií s možností opakovaného barvení. Pro dosažení ještě efektivnější desorpce by bylo v budoucnu vhodné optimalizovat podmínky pracovního procesu, například zvýšením teploty prací lázně, intenzity mechanické agitace nebo koncentrace tenzidu.

V rámci budoucího výzkumu by bylo přínosné rozšířit testování sorpčních schopností modifikované bavlny na širší spektrum přírodních barviv. Pozornost by měla být věnována také dlouhodobé stabilitě polymerní vrstvy a její odolnosti vůči opakovaným pracím cyklům. S ohledem na ekologické aspekty a principy zelené chemie by bylo rovněž žádoucí nahradit epichlorhydrin, jenž se vyznačuje vysokou toxicitou, environmentálně šetrnějšími alternativami síťovacích činidel.

Literatura

- [1] TEXTILE EXCHANGE. *Materials Market Report 2025*. online. Burbank, California: Textile Exchange. 2025. Dostupné z: <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2025/>.

- [2] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. online. 2017. Dostupné z: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/6d5071bb8a5f05a2/original/A-New-Textiles-Economy-Redesigning-fashions-future.pdf>.
- [3] WILLIAMS, Emma. Appalling or Advantageous? Exploring the Impacts of Fast Fashion From Environmental, Social, and Economic Perspectives. online. *Journal for Global Business and Community*, roč. 13 (2022), č. 1. Dostupné z: <https://doi.org/10.56020/001c.36873>.
- [4] WRAP. Valuing our clothes: The cost of UK fashion. online. 2017. In: *WRAP - The Waste and Resources Action Programme*. Dostupné z: <https://www.wrap.ngo/resources/report/valuing-our-clothes-cost-uk-fashion>. [citováno 2026-04-17].
- [5] SZEJTLI, József. Introduction and General Overview of Cyclodextrin Chemistry. online. *Chemical reviews*, roč. 98 (1998), s. 1743–1754. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/cr970022c>.
- [6] DEL VALLE, E. M. Martin. Cyclodextrins and their uses: a review. online. *Process Biochemistry*, roč. 39 (2004), č. 9, s. 1033–1046. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00258-9](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00258-9).
- [7] SZEJTLI, József. Cyclodextrins in the Textile Industry. online. *Starch - Stärke*, roč. 55 (2003), s. 191–196. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/star.200390050>.
- [8] ROY CHOUDHURY, Asim Kumar. Pre-treatment and preparation of textile materials prior to dyeing. online. In: Anonym. *Handbook of Textile and Industrial Dyeing*, s. 64–149. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857093974.1.64>. DOI: 10.1533/9780857093974.1.64.
- [9] BERHE, Muez; Jun YOU; Komivi DOSSA; Donghua LI; Rong ZHOU et al. Examining Chlorophyll Extraction Methods in Sesame Genotypes: Uncovering Leaf Coloration Effects and Anatomy Variations. online. *Plants*, roč. 13 (2024), č. 12, s. 1589. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/plants13121589>.
- [10] CHEN, Dong; Chun-Xia ZHAO; Camille LAGOIN; Mingtan HAI; Laura R. ARRIAGA et al. Dispersing hydrophobic natural colourant β -carotene in shellac particles for enhanced stability and tunable colour. online. *Royal Society Open Science*, roč. 4 (2017), č. 12, s. 170919. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsos.170919>.
- [11] RIFQI, Muhammad; Muhammad LUTHFAN; Praboyo ARDIN; Hari HARIADI; Dandy YUSUF et al. Use of Beta-Carotene Pigment to Improve Food Product Chemical and Sensory Qualities: A Review. online. *Journal of Functional Food and Nutraceutical*, roč. 4 (2023), s. 67–78. Dostupné z: <https://doi.org/10.33555/jffn.v4i2.92>.
- [12] HUNTERLAB. What Is CIELAB Color Space? online. 2022. In: *HunterLab*. Dostupné z: <https://www.hunterlab.com/blog/what-is-cielab-color-space/>. [citováno 2026-04-15].
- [13] LUO, Ming; Guihua CUI a B. RIGG. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. online. *Color Research & Application*, roč. 26 (2001), s. 340–350. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/col.1049>.

- [14] SHARMA, Gaurav; Wencheng WU a Edul N. DALAL. *Excel spreadsheet implementation of the CIEDE2000 color-difference formula (including test data)*. Program. 2005. Dostupné z: <https://hajim.rochester.edu/ece/sites/gsharma/ciede2000/dataNprograms/CIEDE2000.xls>.
- [15] SHARMA, Gaurav; Wencheng WU a Edul N. DALAL. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. online. *Color Research & Application*, roč. 30 (2005), č. 1, s. 21–30. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/col.20070>.
- [16] MOKRZYCKI, Wojciech a Maciej TATOL. Color difference Delta E - A survey. *Machine Graphics and Vision*, roč. 20 (2011), s. 383–411.
- [17] RUDOMETOVA, Natalia V.; Kseniia E. KULISHOVA a Irina S. KIM. The influence of cyclodextrin and modified starches on the beta-carotene lightfastness in inclusion complexes. online. *Processes and Food Production Equipment*. 2018. s. 3–11. Dostupné z: <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2018-11-3-3-11>.
- [18] BRITTON, George. Structure and properties of carotenoids in relation to function. online. *The FASEB Journal*, roč. 9 (1995), č. 15, s. 1551–1558. Dostupné z: <https://doi.org/10.1096/fasebj.9.15.8529834>.
- [19] MEDRONHO, Bruno a Björn LINDMAN. Brief overview on cellulose dissolution/regeneration interactions and mechanisms. online. *Advances in Colloid and Interface Science*, roč. 222 (2015), s. 502–508. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.05.004>.
- [20] BRAGA, Gilberto Ú. L.; Geraldo J. SILVA-JUNIOR; Guilherme T. P. BRANCINI; John E. HALLSWORTH a Mark WAINWRIGHT. Photoantimicrobials in agriculture. online. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, roč. 235 (2022), s. 112548. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112548>.
- [21] QIU, Nianwei; D.c JIANG; X.s WANG; B.s WANG a F. ZHOU. Advances in the members and biosynthesis of chlorophyll family. online. *Photosynthetica*, roč. 57 (2019), s. 974–984. Dostupné z: <https://doi.org/10.32615/ps.2019.116>.