

KOBALTO-FERITOVÉ (NANO)ČÁSTICE FUNKCIONALIZOVANÉ CYKLODEXTRINŮ

Maška Ondřej

Sekce – MECHATRONIKA

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 3. ročník

Bakalářský studijní program – NANOTECHNOLOGIE

Abstrakt: Tato práce se zabývá přípravou a charakterizací magnetických kobalto-feritových (nano)částic funkcionalizovaných β -cyklodextrinem a jeho polymerem. Stěžejní částí je jednonádobová (one-pot) hydrotermální syntéza, která umožňuje vznik funkcionalizovaných částic s magnetickým jádrem. K potvrzení vzniku byly využity metody Ramanova spektroskopie, FTIR, TGA, elektronová mikroskopie (SEM/STEM-EDX) a magnetometrie (SQUID). Získané výsledky u kobalto-feritových částic potvrdily vznik inverzní spinelové struktury, jejich velikost spadající do nanorozměrů a magnetické vlastnosti. Dále na jejich povrchu byla potvrzena přítomnost cyklodextrinů a jeho polymeru použitých k modifikaci.

Klíčová slova: kobalto-feritové částice, hydrotermální syntéza, funkcionalizace, cyklodextrin, metody charakterizace

1 Úvod

Rozvoj nanotechnologií a studium materiálů v nanometrové škále představuje mimořádně dynamický směr výzkumu. Materiály na této úrovni vykazují zcela unikátní fyzikálně-chemické vlastnosti, a to především díky obrovskému poměru povrchu vůči objemu a specifickým kvantovým jevům. Zvláštní pozornost je v posledním desetiletí věnována magnetickým nanočásticím. Ty nacházejí uplatnění jako progresivní adsorbenty a fotokatalyzátory v environmentálních technologiích (např. cílená separace perzistentních polutantů, barviv či zbytků léčiv z odpadních vod) [1], i v pokročilé biomedicině jako cílené nosiče léčiv (*drug delivery*), kontrastní látky pro magnetickou rezonanci či mediátory pro lokální magnetickou hypertermii nádorů [2, 3].

Stěžejní roli v těchto aplikacích hrají spinelové ferity, zejména kobalto-ferit CoFe_2O_4 (dále CoFe). Tento materiál vyniká výbornou chemickou stabilitou, mechanickou odolností, vysokou magnetokrystalickou anizotropií a silnou magnetickou odezvou. Při zmenšení na kritickou velikost pod hranici 10–20 nm tyto částice navíc přecházejí z ferimagnetického do superparamagnetického stavu. Tento stav je pro aplikační využití klíčový – umožňuje totiž snadnou prostorovou ovladatelnost částic v kapalině pomocí běžného magnetického pole, avšak bez zachování trvalé remanence (magnetizace) po jeho odstranění. Díky tomu je částicím bráněno v nevratné agregaci.

Značným problémem syntetických koloidů je vysoká povrchová energie nekrytých nanočástic, která ve vodném prostředí, umocněna dipól-dipólovými interakcemi, vede také ke spontánnímu shlukování. Tento nedostatek efektivně řeší povrchová funkcionalizace [4]. Velmi perspektivními molekulami pro tvorbu ochranných vrstev jsou β -cyklodextriny – cyklické oligosacharidy vyznačující se toroidní (prstencovou) strukturou s hydrofobní dutinou a hydrofilním vnějším pláštěm. Ty jsou schopny selektivně zachytávat hydrofobní molekuly tvorbou inkluzních komplexů typu „host-hostitel“ bez nutnosti vzniku pevných kovalentních vazeb.

Hlavním cílem práce bylo připravit kobalto-feritové (nano)částice hydrotermální metodou a provést jejich trvalou povrchovou funkcionalizaci při použití β -cyklodextrinu. Práce se soustředila na experimentální vývoj a ověření možnosti syntézy, u níž by docházelo k současnému vzniku magnetické částice (jádra) s obalem, tzv. core-shell struktura. Neméně důležitým cílem bylo potvrzení této skutečnosti pomocí charakterizace všech připravených typů částic pomocí dostupných analytických metod.

2 Teoretická východiska

2.1 Krystalová struktura a vlastnosti spinelových feritů

Obecný chemický vzorec spinelových feritů je MFe_2O_4 , kde M představuje dvojmocný atom kovu (např. Zn^{II} , Ni^{II} , Co^{II}). Z krystalografického hlediska se jedná o nejtěsnější plošně centrované kubické uspořádání atomů kyslíku (O^{II}), ve kterém se nacházejí dva typy intersticiálních dutin: tetraedrické (A-polohy, obklopené čtyřmi atomy kyslíku) a oktaedrické (B-polohy, obklopené šesti atomy kyslíku) [2]. Každá elementární buňka obsahuje 8 obsazených tetraedrických a 16 obsazených oktaedrických poloh a krystalizuje v prostorové grupě symetrie $Fd\bar{3}m$.

V případě kobalto-feritu ($CoFe_2O_4$) hovoříme o tzv. inverzním spinelu. Trojmocné atomy železa (Fe^{III}) se rovnoměrně rozdělí mezi tetraedrické A-polohy a oktaedrické B-polohy. Dvojmocné atomy kobaltu (Co^{II}) pak obsazují zbývající oktaedrické B-polohy. Ferimagnetismus těchto materiálů vzniká tím, že magnetické momenty kovů uvnitř jedné podmřížky jsou uspořádány paralelně, ale vůči druhé podmřížce antiparalelně. Protože je v B-pozicích dvakrát více atomů kovů než v A-pozicích, magnetické momenty se zcela nevyruší, což vede k silnému celkovému magnetickému momentu částic [5].

2.2 Hydrotermální syntéza

Hydrotermální syntéza je pokročilá metoda založená na krystalizaci anorganických látek z vodných roztoků za podmínek vysoké teploty (120–250 °C) a tlaku v uzavřených ocelových reaktorech. Za blízko-ktitických nebo superkritických podmínek dochází k výraznému poklesu dielektrické konstanty a naopak ke zvýšení iontového součinu vody [6]. Voda se stává méně polární, což funguje jako hlavní hnací síla pro přesycení roztoku rozpuštěnými anorganickými prekurzory a vede k rychlému srážení. Navíc superkritické tekutiny ztrácejí povrchové napětí a mají vynikající viskozitu, což enormně usnadňuje transport látek a nukleaci. Nižší dielektrická konstanta rovněž způsobuje, že prekurzory mohou snadněji hydrolyzovat i bez nutnosti velkých dávek silných zásad [7].

Jednou z největších předností hydrotermální syntézy je, že produkuje nanočástice s vysokým stupněm krystalinity přímo z roztoku, čímž se zcela eliminuje nutnost následného vysokoteplotního žíhání (kalcinace) [2]. To má za následek, že částice neaglomerují do tvrdých hrudek, zachovávají si úzkou distribuci velikostí a lze je mnohem snadněji dispergovat do stabilních koloidních roztoků. Výraznou předností je také možnost syntézy čisté krystalické fáze bez nečistot a zachování úzké velikostní distribuce zrn [8].

2.3 Mechanismus síťování β -cyklodextrinu

K trvalému ukotvení β -cyklodextrinu (dále β -CD) na povrchu částic a tvorbě stabilního kompozitu se využívá polymerace, jejímž běžným iniciátorem je epichlorhydrin. Reakce probíhá v silně alkalickém prostředí (pH 10–12). Alkalické prostředí je klíčové, neboť způsobuje deprotonaci

hydroxylových skupin β -CD (primárně na atomech uhlíku C-2 a C-3 glukopyranosových jednotek). Vzniklé silně nukleofilní alkoxidové ionty atakují epoxidový kruh epichlorhydrinu [4]. Tím dochází k otevírání kruhu a k následné tvorbě kovalentních etherových vazeb, které zesílují molekuly β -CD do podoby nerozpustné 3D makromolekulární sítě tvořící obal nanočástice.

3 Syntéza a příprava materiálů

3.1 Koncepce jednonádobové (one-pot) syntézy

Pro maximalizaci efektivity a zaručení dokonalého pokrytí nanočástic byla navržena jednonádobová syntéza. Základem její úspěšnosti je synergická kompatibilita reakčních podmínek pro oba dílčí děje. Jak hydrotermální koprecipitace anorganického krystalického jádra CoFe_2O_4 z roztoků prekurzorů (Co^{II} a Fe^{III}), tak i polymerační a síťovací reakce β -CD s epichlorhydrinem vyžadují silně alkalické prostředí. Přidaný hydroxid (NaOH) tak slouží jako srážecí činidlo pro vznik směsných hydroxidů i jako bazický iniciátor otevírání epoxidového kruhu při polymeraci. Reakce byly prováděny ve speciálním hydrotermálním reaktorovém systému Berghoff BR-100 vybaveném teflonovým linerem.

Před samotnými syntézami byly z krystalických hydrátů chloridů připraveny zásobní roztoky. Jejich přesná koncentrace byla analyticky zkontrolována pomocí ICP-OES. Prekurzory byly následně smíchány do pracovního roztoku tak, aby co nejpřesněji refletovaly teoretický stechiometrický poměr kobalto-feritu Co:Fe 1:2.

3.2 Syntéza nemodifikovaného kobalto-feritu (CoFe)

Jako referenční materiál byly nejprve připraveny nemodifikované nanočástice. Do teflonového lineru bylo odměřeno 52 ml demineralizované vody a 20 ml srážecího roztoku NaOH. Tím bylo dosaženo silně alkalického prostředí s cílovou hodnotou pH 11–12. Za stálého a intenzivního míchání byly do tohoto média postupně přikapávány 1ml dávky směsného prekurzoru kovů (celkem 3 ml). Okamžitě vzniklá tmavá suspenze směsných hydroxidů byla hermeticky uzavřena v autoklávu a podrobena hydrotermálnímu ohřevu. Reaktor byl zahříván na teplotu přesahující 190 °C a při dosažení pracovního tlaku udržován v tomto stavu po dobu 60 minut. Po uplynutí reakční doby a samovolném zchladnutí byly vzniklé krystalické částice magneticky dekantovány, opakovaně promývány demineralizovanou vodou do neutrální reakce a následně lyofilizovány na suchý prášek.

3.3 Funkcionalizace β -cyklodextrinem (CoFeCD)

Příprava částic funkcionalizovaných cyklodextrinem probíhala za téměř identických podmínek. Hlavním rozdílem bylo přidání diferenčně odváženého β -CD (500,6 mg) přímo do srážecího roztoku NaOH a demineralizované vody ještě před samotným přidavkem směsného prekurzoru kovů. Přítomnost cyklodextrinu během srážení způsobila vznik opticky světlejšího a texturně jemnějšího koprecipitátu. Směs byla podrobena stejnému hydrotermálnímu procesu (>190 °C, 60 min), po kterém následovalo standardní promytí a lyofilizace.

3.4 Tvorba kompozitu *core-shell* s polymerní sítí (CoFePCD)

Příprava plnohodnotného kompozitu typu *core-shell* probíhala ve dvou na sebe navazujících fázích přímo v reakční nádobě. První krok (hydrotermální nukleace a růst jader) byl zcela iden-

tický s přípravou CoFeCD. Po uplynutí 60 minut hydrotermálního ohřevu však nebyl reaktor ponechán zchladnout na laboratorní teplotu, nýbrž pouze na 70 °C. V tento moment byl autokláv otevřen a za stálého mechanického míchání (400 rpm) byl do směsi během 45 minut po kapkách přidán epichlorhydrin. Množství ECH bylo zvoleno tak, aby odpovídalo 40násobnému molárnímu ekvivalentu přítomného β -CD. Polymerace a obalování nanočástic následně probíhalo při udržované teplotě 50 °C po dobu 24 hodin. Výsledný materiál byl magneticky separován a důkladně promyt od nezreagovaných monomerů a lyofilizován.

4 Výsledky a diskuse

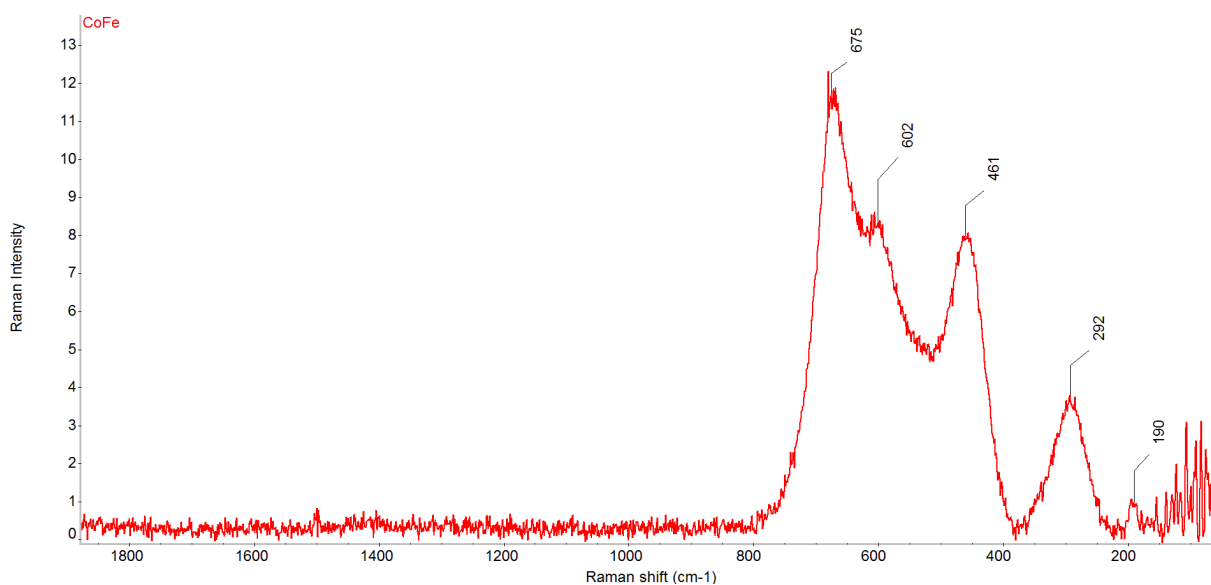
4.1 Krystalová struktura a vibrační spektroskopie

4.1.1 Ramanova spektroskopie

Ramanova spektroskopie je nedestruktivní metoda citlivá na polarizovatelnost molekul, ideální pro potvrzení spinelové mřížky. Podle teorie grup by materiál krystalizující v grupě $Fd3m$ měl vykazovat pět aktivních Ramanových módů: A_{1g} , E_g a tři módy T_{2g} [9].

Na naměřeném spektru čistého CoFe (Obrázek 1) je nejvýraznějším prvkem štěpení módu A_{1g} , který reprezentuje symetrické valenční vibrace vazeb kov-kyslík v tetraedrických pozicích (A-místech). U inverzního spinelu dochází k jeho štěpení na dvě samostatné komponenty $A_{1g}(1)$ a $A_{1g}(2)$, což je přímý důsledek redistribuce atomů kobaltu. Tyto komponenty byly pozorovány při vlnočtech 675 cm^{-1} a 602 cm^{-1} . Další identifikovaný pás při 461 cm^{-1} náleží vibračnímu módu $T_{2g}(2)$ (deformační vibrace Fe-O) a pásy 292 a 190 cm^{-1} odpovídají módu E_g (mřížkové vibrace a vibrace v oktaedrických pozicích).

Oproti hodnotám pro objemové (*bulk*) materiály z literatury (kde se $A_{1g}(1)$ nachází typicky kolem 680–691 cm^{-1}) jsou naměřené polohy absorpčních pásů posunuty k mírně nižším vlnočtům. Tento jev je v literatuře plně vysvětlován tzv. velikostním efektem, charakteristickým právě pro krystalické struktury v nanorozměrech [9].



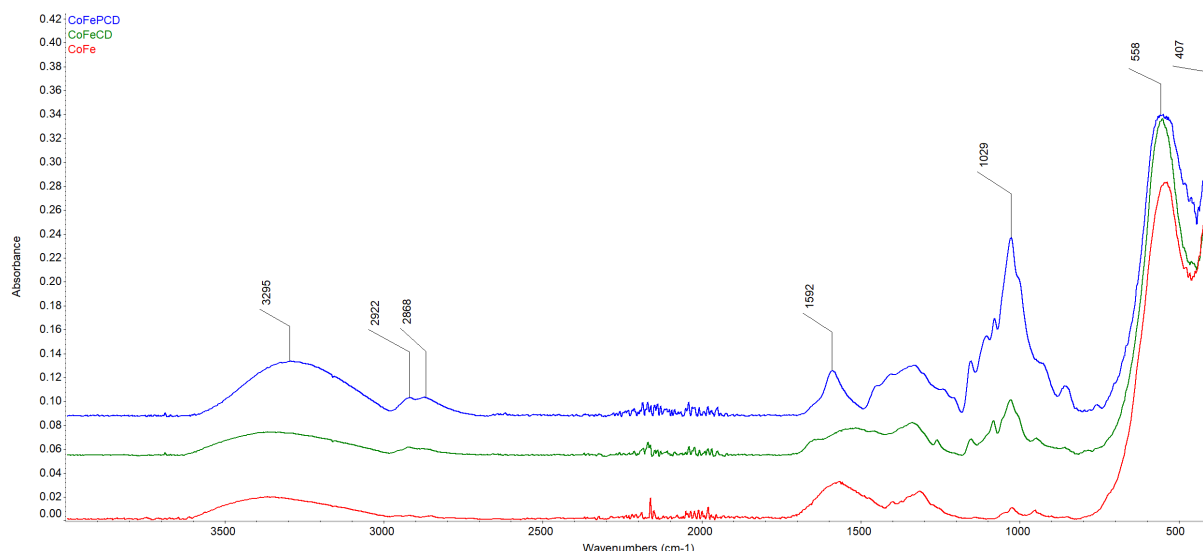
Obrázek 1: Ramanovo spektrum připravených částic CoFe

4.1.2 FTIR spektroskopie

Přítomnost organické modifikační vrstvy na magnetickém jádře byla prokázána pomocí FTIR spektroskopie (Obrázek 2). Infračervené spektrum čistého CoFe vykazovalo dva hlavní absorpční pásy při 558 cm^{-1} (tetraedrické pozice) a 407 cm^{-1} (oktaedrické pozice), náležející valenčním vibračním vazeb kov-kyslík. [8]

Při porovnání spekter lze u funkcionalizovaných částic CoFeCD spolehlivě identifikovat absorpční pásy charakteristické pro β -CD: široký pás při 3360 cm^{-1} (valenční vibrace O–H vazeb) a specifický pás 1030 cm^{-1} , který je charakteristický pro vibrace glykosidických vazeb C–O–C a valenční vibrace C–O/C–C ve skeletu cyklodextrinu. [10]

U částic s polymerním obalem (CoFePCD) došlo po reakci s epichlorhydrinem ke znatelným změnám. Nejvýraznějším rozdílem je masivní zintenzivnění pásu při 1029 cm^{-1} . V polymeru tento signál odráží kromě vnitřních glykosidických vazeb samotného β -CD i přítomnost nově vzniklých etherových vazeb (C–O–C), jimiž ECH spojuje cyklodextrin do prostorové sítě. Zároveň došlo k nárůstu intenzity vibrací alifatických C–H vazeb (2922 a 2868 cm^{-1}) tvořících flexibilní spojovací můstky nového polymeru. Spektra tak jasně prokazují úspěšnou funkcionalizaci. [3]

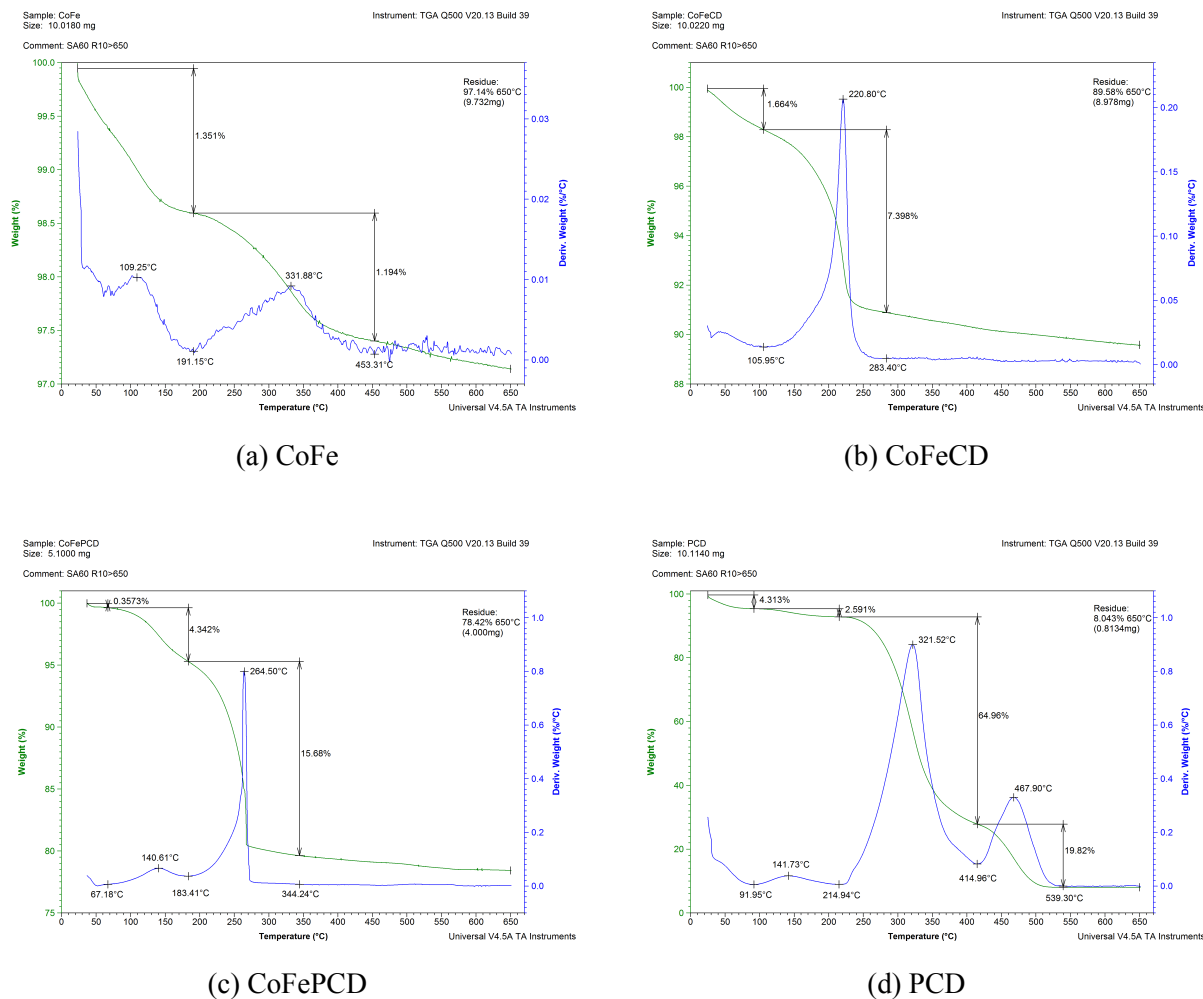


Obrázek 2: Porovnání FTIR spekter nemodifikovaných částic CoFe (červená), funkcionalizovaných CoFeCD (zelená) a polymerem funkcionalizovaných CoFePCD (modrá).

4.2 Termogravimetrická analýza a katalytický efekt

Účinnost fixace organické vrstvy a její termická odolnost byla zkoumána metodou TGA od laboratorní teploty do 650 °C . Čisté anorganické částice CoFe prokázaly vysokou termickou stabilitu s minimálním celkovým hmotnostním úbytkem pod 3 %, odpovídajícím převážně odpaření fyzikálně adsorbované povrchové vlhkosti a dehydroxylaci (Obrázek 3).

Z termogravimetrické křivky kompozitu CoFeCD byl zjištěn úbytek hmotnosti korespondující s rozkladem β -CD v rozsahu $105\text{--}283\text{ °C}$, který dosáhl 7,4 %. U polymerního kompozitu CoFePCD byl pozorován mnohem větší hlavní rozkladný krok ($183\text{--}344\text{ °C}$) představující úbytek 15,7 %. Výsledky dokládají, že zavedením polymeračního kroku a prostorového síťování bylo dosaženo navázání zhruba dvojnásobného množství organické fáze ve srovnání s funkcionalizací samotným β -CD.



Obrázek 3: Termogravimetrické křivky ilustrující hmotnostní úbytek organické složky u jednotlivých typů částic.

Mimořádně zajímavým zjištěním byl rozdílný průběh termické degradace u funkcionalizovaných kompozitů ve srovnání s čistým polymerem (PCD). U čistého PCD docházelo k degradaci s maximální rychlostí (derivace TGA) při teplotě 322 °C. V přítomnosti nanočástic se však tato kritická teplota posunula výrazně níže – na 265 °C pro CoFePCD a dokonce na 221 °C u CoFeCD.

Tento rozdíl (60 až 100 °C) lze přisoudit katalytickému efektu kobalto-feritového jádra. Krystalická mřížka bohatá na atomy přechodných kovů (Co, Fe) s různými oxidačními stavy je známa schopností zprostředkovat efektivní transport elektronů, čímž lokálně snižuje aktivací energii nutnou pro termické štěpení organických vazeb [11].

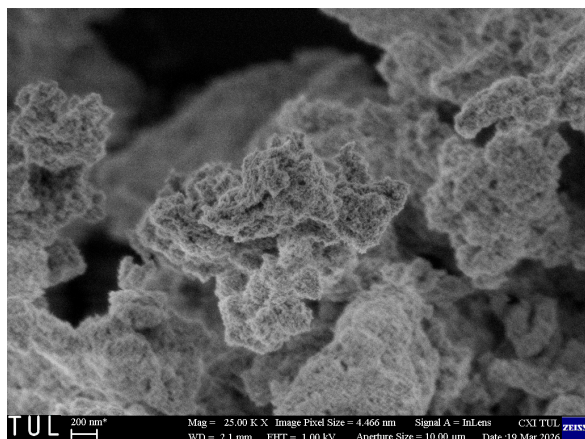
4.3 Povrchová morfologie a architektura *core-shell*

Morfologie získaných materiálů byla detailně hodnocena pomocí skenovací (SEM) a skenovací transmisní (STEM) elektronové mikroskopie.

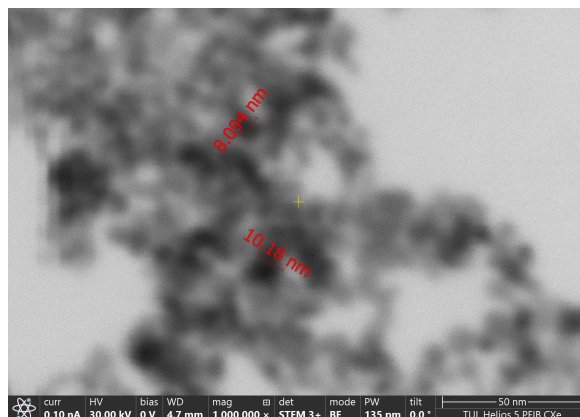
U nemodifikovaného kobalto-feritu (CoFe) ukázaly SEM snímky nepravidelné shluky ohraničených zrnitých aglomerátů. Tendence k tvorbě větších, nepravidelných shluků je charakteristická pro magnetické nanočástice vlivem vysoké povrchové energie a neustálého vzájemného magnetického přitahování. Zavedením β -CD se celková textura změnila. U obou modifikova-

ných typů částic (CoFeCD i CoFePCD) povrch získal kompaktnější, houbovitý až spojený charakter. Polymerní síť zjevně působila jako pojivo překlenující mezery mezi primárními zrny, čímž vizuálně sjednotila strukturu materiálu.

Rozhodující důkaz o skutečné architektuře poskytla transmisní analýza (STEM) kompozitu CoFePCD při zvětšení (1 000 000x). Na Obrázku 4b jsou zřetelně patrná tmavá krystalická zrna feritu s velikostní distribucí velmi těsně ohraničenou na 8 až 11 nm. Každé krystalické jádro je jasně obklopeno světlejším polopropustným halem. Tento kontrast na základě rozdílné elektronové hustoty prvků (anorganické jádro vs. uhlíkový řetězec) potvrzuje vytvoření kompozitu se strukturou *core-shell*, kde je částice imobilizována v organické polymerní matici.



(a) SEM



(b) STEM

Obrázek 4: SEM morfologie CoFePCD vykazující kompaktní houbovitou strukturu (vlevo), STEM detail potvrzující obklopení nanokrystalitů polymerním halem (vpravo)

Chemická čistota a kvantitativní prvkové složení bylo potvrzeno pomocí energiově disperzní rentgenové spektroskopie (EDX) [12]. Analýza potvrdila zastoupení obou kovů bez přítomnosti rušivých nečistot. Atomární poměr Co:Fe se u CoFe a CoFeCD pohyboval velmi blízko k teoretické stechiometrii spinelu, což shrnuje Tabulka 1. U CoFePCD je tento poměr mírně odlišný, což může ovlivňovat polymerní vrstva a výběr konkrétní měřicí plochy.

Tabulka 1: EDX analýza vzorků

vzorek	Atomární zastoupení prvků (v at. %)		poměr
	Co	Fe	Co : Fe
CoFe	8,94	18,05	1,00 : 2,02
CoFeCD	6,13	13,05	1,00 : 2,13
CoFePCD	10,25	18,1	1,00 : 1,76

4.4 Magnetické vlastnosti (SQUID)

Jelikož je zachování a ovlivnění magnetické odezvy kompozitu pro aplikační využití kritické, byla provedena magnetometrie SQUID při laboratorní teplotě (298 K) ve vnějším magnetickém poli s intenzitou až ± 50000 Oe. Tvar naměřených hysterezních křivek i vyhodnocené parametry (saturační magnetizace (M_S), koercivita (H_C) a remanentní magnetizace (M_R)) shrnuté v Tabulce 2 ilustrují výrazný dopad povrchové funkcionalizace.

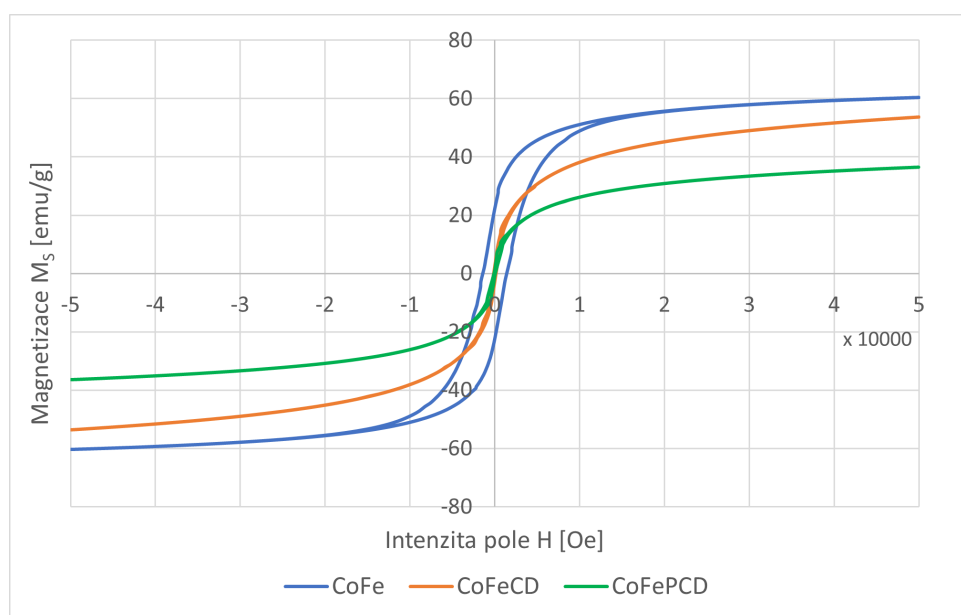
Tabulka 2: Magnetické charakteristiky vzorků při teplotě 298 K

Vzorek	M_{S+} [emu/g]	M_{S-} [emu/g]	H_{C+} [Oe]	H_{C-} [Oe]	M_{R+} [emu/g]	M_{R-} [emu/g]	$\frac{M_R}{M_S}$
CoFePCD	36,49	-36,48	72,58	-76,93	1,1177	-1,1654	0,03
CoFeCD	53,66	-53,65	128,99	-126,91	11,57	-2,5199	0,05
CoFe	60,45	-60,42	1403,42	-1417,34	22,32	-22,36	0,37

Ze vzájemného porovnání je evidentní postupný úbytek saturační magnetizace (M_S). Nejvyšší hodnota byla naměřena pro nefunkcionalizovaný anorganický materiál CoFe (60,45 emu/g). U modifikovaného CoFeCD došlo k poklesu na 53,66 emu/g a u polymerně stíněného CoFePCD až na 36,49 emu/g. Tento jev není anomálií, nýbrž standardním fyzikálním projevem navýšení hmotnostního zlomku diamagnetické (organické) složky ve vzorku (tzv. „mrtvá vrstva“), což perfektně koreluje s hmotnostními úbytky zjištěnými při TGA.

Zásadní informační hodnotu má dramatický pokles koercivity (H_C). Zatímco čistý CoFe vykazuje značnou koercivitu (1403 Oe), což odpovídá chování magneticky tvrdšího materiálu náchylného k permanentní remanenci a tvorbě agregátů, u modifikovaných vzorků došlo ke skokovému snížení této hodnoty. Polymerně modifikovaný vzorek CoFePCD vykazoval zanedbatelnou koercivitu pouhých 72,58 Oe [5].

Fyzikální vysvětlení tkví v tvorbě obalové polymerní vrstvy, která částice stericky izoluje. Tím dojde k redukci magnetostatických interakcí a výměnné anizotropie mezi sousedními povrchy nanočástic. Tento jev spolu s poklesem poměru čtvercovitosti hysterezní smyčky (M_R/M_S) z hodnoty 0,37 na zcela minimálních 0,03 dokazuje, že se magnetické chování polymerně chráněných částic CoFePCD při teplotě 298 K posunulo na samou hranici superparamagnetismu. Z aplikačního hlediska je tento stav vysoce žádoucí pro využití v biomedicíně nebo při čištění vod; nízká remanence zaručuje, že se částice po odstranění vnějšího pole opět snadno rozptýlí (redispersovatelnost), zatímco stále dostatečná saturační magnetizace umožňuje jejich rychlou separaci pomocí vnějšího magnetického pole. [13].



Obrázek 5: Hysterezní smyčky naměřené při teplotě 298 K

5 Závěr

V rámci předkládané práce byla pozornost zaměřena na syntézu, povrchovou funkcionalizaci a charakterizaci magnetických (nano)částic kobalto-feritu. Pozornost byla věnována nejen přípravě nemodifikovaných anorganických částic, ale také jejich cílené modifikaci pomocí β -cyklodextrinu a jeho epichlorhydrinem zesíťovaného polymeru. Významným experimentálním přínosem byla úspěšná optimalizace hydrotermálně asistované jednonádobové (one-pot) syntézy v silně alkalickém prostředí. Tento přístup umožnil propojit proces přípravy **kobalto-feritových částic o velikosti v rozmezí 8-11 nm** s jejich následnou polymerací β -cyklodextrinem.

Analytická charakterizace potvrdila vznik **nanokompozitů**. Ramanova spektroskopie prokázala vznik čistě **inverzní spinelové struktury**. Důkaz o tvorbě struktury typu **jádro-obal** (core-shell) a správném atomárním zastoupení kovů následně poskytla elektronová mikroskopie (SEM a STEM) doplněná o EDX mikroanalýzu. Na pořízených snímcích byly zachyceny elektronově vysoce kontrastní nanočástice (jádra), které jsou viditelně obklopeny světlejší, polopropustnou okrajovou zónou (halem), což potvrzuje těsné obklopení částic polymerem.

Za pomoci FTIR byla identifikována přítomnost β -cyklodextrinových skupin i nově vzniklých etherových můstků tvořících polymerní obal. Termogravimetrická analýza (TGA) potvrdila, že v případě polymerem modifikovaných částic jsou anorganické částice obklopeny efektivněji a ve větším množství, než při použití modifikace samotným β -cyklodextrinem. Dále TGA odhalila výrazný posun maximální rychlosti degradace organické části CoFePCD oproti polymeru směrem k nižším teplotám. Tento jev poukazuje na pravděpodobný **katalytický efekt** kobalto-feritových částic na degradaci organické složky, což otevírá další aplikační možnosti v oblasti heterogenní environmentální katalýzy. Vyhodnocení magnetických vlastností ukázalo, že modifikované částice se blíží **superparamagnetickému chování**. Zejména polymerem stíněné částice by díky nejnižší koercivitě i remanenci byly velmi vhodné pro použití v takových systémech, kde je třeba cíleného transportu a separace (např. léčiv, polutantů z vod).

Literatura

- [1] XU, Jiabin et al. β -Cyclodextrin functionalized magnetic nanoparticles for the removal of pharmaceutical residues in drinking water. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2022, roč. 109, s. 461–474 [cit. 2025-09-29]. ISSN 1226-086X. Dostupné z DOI: [10.1016/j.jiec.2022.02.032](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.02.032).
- [2] MATAEV, Mukhametkali et al. Structure Property–Application Relationships of Spinel Ferrite Nanoparticles: From Synthesis to Functional Systems. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 2026, roč. 27, č. 5, s. 2096 [cit. 2026-04-07]. ISSN 1422-0067. Dostupné z DOI: [10.3390/ijms27052096](https://doi.org/10.3390/ijms27052096).
- [3] MIRZAEI, Sharareh, Abolfazl BAYRAMI a Zeinab MIRZAEI. Experimental and theoretical investigation of sugar-coated cobalt ferrite nanoparticles. *Journal of the Australian Ceramic Society* [online]. 2020, roč. 56, č. 3, s. 1021–1028 [cit. 2026-04-07]. ISSN 2510-1579. Dostupné z DOI: [10.1007/s41779-019-00407-6](https://doi.org/10.1007/s41779-019-00407-6).
- [4] MORIN-CRINI, Nadia et al. Water-insoluble β -cyclodextrin–epichlorohydrin polymers for removal of pollutants from aqueous solutions by sorption processes using batch studies: A review of inclusion mechanisms. *Progress in Polymer Science* [online]. 2018, roč. 78, s. 1–23 [cit. 2026-04-07]. ISSN 0079-6700. Dostupné z DOI: [10.1016/j.progpolymsci.2017.07.004](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.07.004).

- [5] GARCÍA-HERNÁNDEZ, Luis Abraham, Cuauhtemoc Benixoo GUZMÁN-HERNÁNDEZ a Goldie OZA. Magnetic properties of CoFe₂O₄ nanoparticles: experimental characterization and numerical analysis using the Ising model. *Journal of Nanoparticle Research* [online]. 2025, roč. 27, č. 11, s. 281 [cit. 2026-04-07]. ISSN 1572-896X. Dostupné z DOI: [10.1007/s11051-025-06476-y](https://doi.org/10.1007/s11051-025-06476-y).
- [6] CUSHING, Brian L., Vladimir L. KOLESNICHENKO a Charles J. O'CONNOR. Recent Advances in the Liquid-Phase Syntheses of Inorganic Nanoparticles. *Chemical Reviews* [online]. 2004, roč. 104, č. 9, s. 3893–3946 [cit. 2026-04-07]. ISSN 0009-2665. Dostupné z DOI: [10.1021/cr030027b](https://doi.org/10.1021/cr030027b).
- [7] CABAÑAS, Albertina a Martyn POLIAKOFF. The Continuous Hydrothermal Synthesis of Nano-Particulate Ferrites in Near Critical and Supercritical Water. *J. Mater. Chem.* 2001, roč. 11. Dostupné z DOI: [10.1039/B009428P](https://doi.org/10.1039/B009428P).
- [8] ALZOUBI, Gassem M. et al. Influence of High-Temperature Annealing on Structural and Magnetic Properties of Crystalline Cobalt Ferrite Nanoparticles in the Single-Domain Regime. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* [online]. 2020, roč. 33, č. 10, s. 3179–3188 [cit. 2026-04-07]. ISSN 1557-1947. Dostupné z DOI: [10.1007/s10948-020-05551-w](https://doi.org/10.1007/s10948-020-05551-w).
- [9] FLORES, Aaron et al. Synthesis and Characterization of Cobalt Ferrite Co_xFe_{3-x}O₄ Nanoparticles by Raman Spectroscopy and X-Ray Diffraction. *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*. 2020, roč. 5. Dostupné z DOI: [10.35840/2631-5076/9247](https://doi.org/10.35840/2631-5076/9247).
- [10] HUTAMANINGTYAS, E. et al. FTIR and structural properties of co-precipitated cobalt ferrite nano particles. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2016, roč. 776, č. 1, s. 012023 [cit. 2026-04-08]. ISSN 1742-6596. Dostupné z DOI: [10.1088/1742-6596/776/1/012023](https://doi.org/10.1088/1742-6596/776/1/012023).
- [11] TROTTA, Francesco, Marco ZANETTI a Giovanni CAMINO. Thermal Degradation of Cyclodextrins. *Polymer Degradation and Stability*. 2000, roč. 69, s. 373–379. ISSN 978-94-010-5971-8. Dostupné z DOI: [10.1016/S0141-3910\(00\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00084-7).
- [12] BRUNDLE, C.R et al. *Encyclopedia of materials characterization. surfaces, interfaces, thin films*. Greenwich, CT: Manning, 1992. ISBN 0-7506-9168-9.
- [13] Quantum Technologies Based of Magnetism, Electron and Nuclear Spin, and Superconductivity. In: *Nanophysics and Nanotechnology* [online]. John Wiley & Sons, Ltd, 2006, s. 173–206 [cit. 2026-04-07]. ISBN 978-3-527-61897-2. Dostupné z DOI: [10.1002/9783527618972.ch8](https://doi.org/10.1002/9783527618972.ch8).