

PŘÍPRAVA A CHARAKTERIZACE ORGANOSILANOVÝCH VLÁKEN SE ZAČLENĚNÝMI HETEROCYKlickými LINKERY

Birkner Vojtěch

Sekce – MECHATRONIKA

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 3. ročník

Bakalářský studijní program – NANOTECHNOLOGIE

Abstrakt: Chemie organosilanů slouží jako základní rámec pro inženýrství hybridních nanomateriálů, neboť efektivně kombinuje mechanickou odolnost anorganických siloxanů se specifickými funkcemi organických funkčních skupin. Tato bakalářská práce se zabývá syntézou, přípravou a komplexní charakterizací submikronových organosilanových vláken obsahujících zabudované heterocyklické pyridinové spojky. Experimentální část je zaměřena na přípravu dvou odlišných prekursorů: *N,N'*-bis(3-(triethoxysilyl)propyl)pyridin-2,6-dikarboxyamidu (BiTSAP) a *N,N'*-bis(3-(diethoxymethylsilyl)propyl)pyridin-2,6-dikarboxyamidu (BiDSAP). K usnadnění polykondenzace při teplotách dostatečně nízkých na to, aby byla zachována strukturální integrita heterocyklických složek, je využita metoda „bottom-up“ sol-gel. Výzkum objasňuje, jak rozdílný stupeň potenciální hydrolyzy u obou prekursorů ovlivňuje hustotu síťování a reologické vlastnosti zvlákněvaného solu. Tyto faktory jsou klíčové pro dosažení vysokého poměru povrchu k objemu, který je vyžadován pro aplikace v heterogenní katalýze, čištění odpadních vod a tkáňovém inženýrství. Výsledná vlákna demonstrují potenciál cíleně navržených molekulárních architektur při vývoji pokročilých funkčních nosičů pro nanotechnologie.

Klíčová slova: organosilanová vlákna, metoda sol-gel, syntéza, pyridinové linkery, nanotechnologie, hybridní materiály, 3-aminopropyltriethoxysilan, 3-aminopropyldiethoxymethylsilan, Nanospider, elektrospinning.

1 Úvod

Oblast chemie organosilanů zaujímá jedinečné postavení na pomezí organické a anorganické chemie, protože se zaměřuje na sloučeniny obsahující alespoň jednu přímou vazbu křemík-uhlík (Si-C). Tyto materiály efektivně propojují tepelnou a mechanickou odolnost anorganického siloxanového skeletu s chemickou variabilitou organických funkčních skupin. Organosilany tak slouží jako vysoce robustní stavební bloky pro výrobu pokročilých funkčních nanomateriálů [1]. Mezi těmito strukturami si značnou pozornost získala submikronová a nanometrová vlákna. Díky svému obrovskému specifickému povrchu (poměru povrchu k objemu) jsou vysoce žádaná pro rozmanité aplikace, od nosičů v heterogenní katalýze přes environmentální senzory až po tkáňové inženýrství a cílené dodávání léčiv [2].

Základní výzvou při vývoji těchto funkčních materiálů však zůstává absolutně přesná kontrola jejich molekulární architektury. Anorganický siloxanový skelet poskytuje vláknu strukturální integritu, zatímco organické funkční skupiny na něj navázané zavádějí specifické funkce. Tato práce se detailně zaměřuje na přípravu a charakterizaci organosilanových vláken, do nichž jsou kovalentně zabudovány heterocyklické pyridinové linkery. Pyridinový kruh, primárně díky volnému elektronovému páru na atomu dusíku, propůjčuje výslednému materiálu schopnost koordinačních interakcí, což je stěžejní například pro záchyt iontů přechodných kovů v katalýze [3].

Pro splnění tohoto cíle byly v rámci experimentální práce nadesignovány a syntetizovány dva odlišné monomerní prekurzory (BiTSAP a BiDSAP), u kterých byl systematicky zkoumán vliv jejich odlišné funkcionality (stupeň hydrolyzy a kondenzace) na reologické vlastnosti zvláknovaného solu a finální morfologii vláken. Samotná výroba vláken je realizována prostřednictvím dvoufázového procesu: metody sol-gel, jež umožňuje polykondenzaci alkoxidů křemíku při nízkých teplotách, a následného stejnosměrného (DC) elektrického zvláknování.

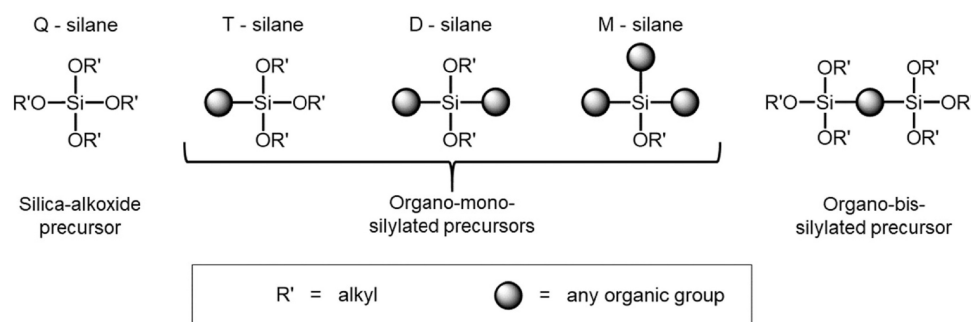
2 Teorie

2.1 Základní chemie organosilanů a jejich klasifikace

Odlišné fyzikální a chemické vlastnosti organosilanových materiálů jsou primárně odvozeny od elektronové povahy atomu křemíku. Ačkoliv křemík a uhlík leží ve stejné skupině periodické tabulky, křemík má výrazně nižší elektronegativitu. To vede k tomu, že vazba Si-C, i když je kovalentní, vykazuje značný parciálně iontový charakter. Tato polarizace činí molekulu vysoce náchylnou k nukleofilním a elektrofilním atakům, což usnadňuje následné síťovací reakce [1].

V polymerní a materiálové chemii se organosilanové stavební bloky kategorizují pomocí zavedené notace M, D, T a Q, která reprezentuje mono-, di-, tri- a tetra-funkční siloxanové jednotky. Tato funkcionality přímo determinuje dimenzionalitu výsledné polymerní sítě. Monofunkční (M) jednotky slouží pouze jako terminátory růstu řetězce. Difunkční (D) jednotky, tvořené například dialkoxysilany, umožňují tvorbu čistě lineárních polymerních řetězců s vysokou flexibilitou. V kontextu fabrikace nanovláken jsou však zcela zásadní trifunkční (T) jednotky. Ty umožňují tvorbu vysoce rozvětvených, trojrozměrných prekurzorů (známých jako silsesquioxany), jež poskytují vznikajícímu solu dostatečnou viskoelasticitu a vláknům potřebnou mechanickou integritu po odpaření solventu [2].

Fyzikální vlastnosti siloxanové vazby (Si-O-Si) propůjčují materiálům výjimečné charakteristiky. Dlouhá délka vazby a široké vazebné úhly způsobují, že siloxanový skelet má zanedbatelnou bariéru rotace. Výsledkem jsou polymery s extrémně nízkou teplotou skelného přechodu (T_g) a vysokou konformační flexibilitou.



Obrázek 1: Strukturální typy organosilanových sloučenin (jednotky M, D, T, Q) a jejich zapojení do polymerní sítě.[2]

2.2 Využití heterocyklických linkerů v hybridních materiálech

Začlenění heterocyklických sloučenin, jako je pyridin, do siloxanové sítě neznamená pouhé vytvoření fyzické "výplně" uvnitř materiálu. Heterocykly vnášejí do struktury významnou elektronovou asymetrii. Pyridin je šestičlenný aromatický kruh obsahující atom dusíku s volným

elektronovým párem, který není delokalizován do aromatického π -systému. Tento volný pár může fungovat jako vynikající Lewisova báze.

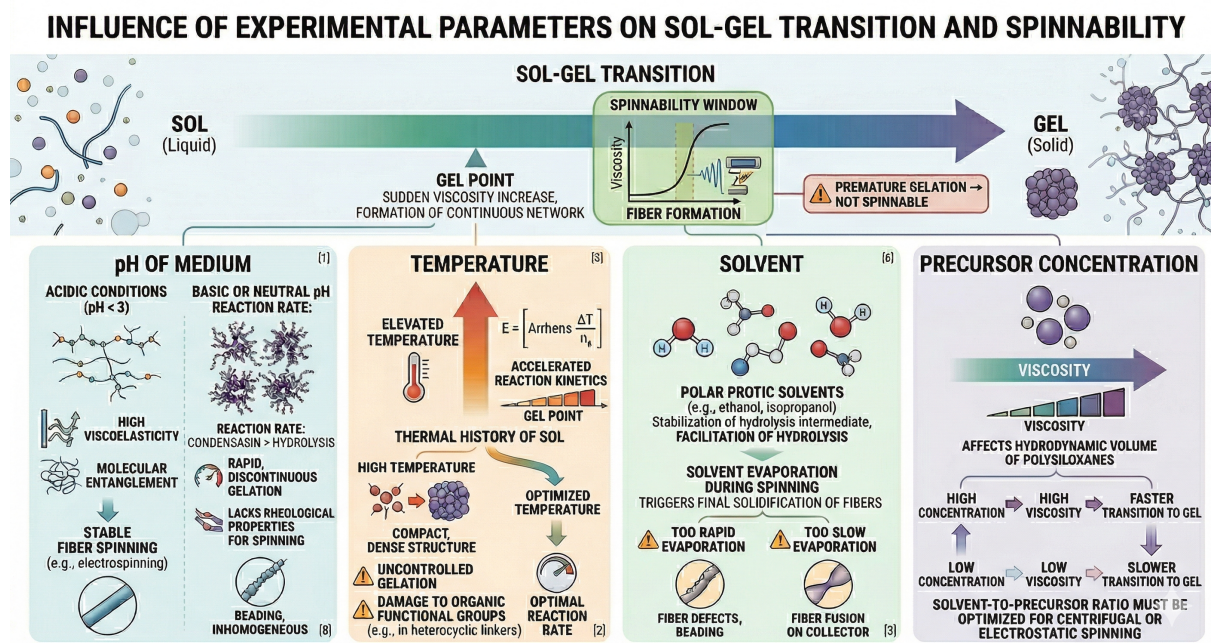
Když je pyridin inkorporován do silanového vlákna, tyto linkery fungují jako silná kotvící místa pro ionty kovů. To umožňuje vývoj vláken pro záchyt environmentálních polutantů nebo pro fixaci nanočástic palladia či platiny pro heterogenní katalýzu uhlík-uhlík coupling reakcí (např. Heckova reakce). Kromě toho $\pi - \pi$ stacking (skládání) aromatických kruhů poskytuje materiálu dodatečné fyzikální síťování, čímž se zvyšuje termální stabilita vlákna a jeho odolnost vůči oxidativní degradaci [3].

2.3 Kinetika a mechanismus procesu Sol-Gel

Klíčovým krokem před samotným zvlákněním je proces sol-gel, což je univerzální "bottom-up" metoda pro syntézu anorganických a hybridních sítí z roztoku. V případě organosilanů tento proces umožňuje přesnou integraci organických skupin při teplotách hluboko pod bodem tepelného rozkladu heterocyklů [4].

Mechanismus zahrnuje dvě hlavní fáze: hydrolýzu a polykondenzaci. Hydrolýza je iniciována, když je alkoxidová skupina (-OR) nahrazena hydroxylovou skupinou (-OH) z vody za vzniku silanolu. Kinetika této S_N2 nukleofilní substituce je extrémně závislá na pH prostředí. V silně kyselých podmínkách ($pH < 3$), které byly v této práci použity, dochází k rychlé protonaci kyslíkového atomu alkoxy skupiny. Kyselá katalýza upřednostňuje sekvenční růst lineárních a mírně větvených řetězců na úkor sférických klastrů.

Následná kondenzace probíhá spojováním silanolových skupin za odštěpení vody (oxolace) nebo alkoholu (alkoxolace) za vzniku siloxanových můstků (Si-O-Si). Pro úspěšné zvláknění nesmí proces dojít až do stádia pevného gelu. Reakce musí být přerušena v tzv. „okně zvláknovatelnosti“ (spinnability window), kde má polymerní sol ideální molekulovou hmotnost a dynamickou viskozitu [2, 5].



Obrázek 2: Schéma reakčního mechanismu sol-gel a vliv experimentálních parametrů na přechod ze solu do gelu.

2.4 Elektrospinning a formování submikronových vláken

Elektrospinning je elektrohydrodynamický proces, který pro tažení vláken využívá vysoké napětí namísto mechanických sil. Když je na kapiláru s viskózním solem aplikováno napětí, na povrchu kapky se hromadí elektrostatický náboj. Jakmile odpudivé Coulombické síly překonají povrchové napětí kapaliny, deformuje se kapka do tzv. Taylorova kužele a následně je z jejího vrcholu vymršťen tenký paprsek roztoku [6].

Během cesty k uzemněnému kolektoru podléhá paprsek tzv. bičové (whipping/bending) instabilitě. Tento jev způsobuje enormní prodloužení dráhy letu, což vede k masivnímu ztenčování paprsku a rychlému odpařování rozpouštědla. Na kolektor tak dopadají suchá vlákna submikronových průměrů tvořící netkanou textilii. Klíčovými parametry, které rozhodují o hladkosti vláken, jsou viskozita solu (zajištěná mírou polykondenzace a propletením řetězců – entanglements), aplikované napětí, vzdálenost elektrod a okolní vlhkost, která nadále ovlivňuje síťování silanolů během letu [2].

3 Experimentální část

3.1 Použité chemikálie a instrumentace

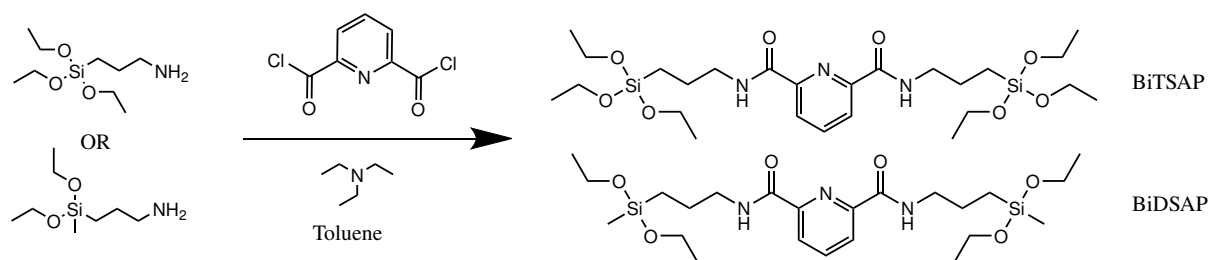
Pro syntézu byly využity výhradně komerčně dostupné chemikálie, použité bez další purifikace (s výjimkou toluenu sušeného přes molekulová síta). Jednalo se o: 3-aminopropyltriethoxysilan (APTES, 99 %), 3-aminopropyldiethoxymethylsilan (APDES, 97 %), pyridin-2,6-dikarbonyl dichlorid (PDC, 97 %), triethylamin (TEA) a absolutní ethanol. Jako hydrolyzační katalyzátor sloužila kyselina chlorovodíková (HCl, 35 %).

K hodnocení struktury byla využita kapalinová i pevnolátková (SS) nukleární magnetická rezonance na spektrometru JNM-ECZ400R/M1 (JEOL), infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) na přístroji Nicolet iS50 a hmotnostní spektrometrie (MS) pomocí systému Sciex X500R QTOF. Zvláknění probíhalo na zařízení Nanospider NS 1W500U a morfologie vláken byla sledována na rastrovacím elektronovém mikroskopu UHR FE-SEM Carl Zeiss ULTRA Plus.

3.2 Syntéza organosilanových monomerů BiTSAP a BiDSAP

Reakční aparatura (500ml kulatá baňka) byla přes noc vysušena při 95 °C a následně inertizována na třech cyklech vakuum/argon. Do baňky bylo vneseno 250 ml suchého toluenu a 30 mmol PDC. Po úplném rozpuštění PDC byl přidán triethylamin (TEA, 151 mmol), který v reakci sloužil k neutralizaci vznikajícího chlorovodíku. Baňka byla umístěna na ledovou lázeň a za stálého míchání byl po kapkách přidáván aminosilan: v prvním případě 60 mmol APTES (pro vznik trifunkčního BiTSAP), ve druhém případě 67 mmol APDES (pro vznik difunkčního BiDSAP).

Reakční směs byla míchána 3 hodiny při pokojové teplotě (450 ot/min). Po ukončení reakce byla organická fáze přelita do dělicí nálevky, třikrát promyta demineralizovanou vodou a vysušena bezvodým síranem hořečnatým. Toluén byl odstraněn na rotační vakuové odparce. Produkt byl znovu rozpuštěn, centrifugován (10 000 RCF / 15 min) pro sedimentaci solí, přefiltrován přes 45 μ m stříkačkový filtr a lyofilizován při tlaku 0 mbar a teplotě -75 °C po dobu 24 hodin. Čisté produkty dosahovaly výtěžků cca 72 % pro BiTSAP a 70 % pro BiDSAP a byly skladovány pod argonem po bleskovém zmrazení kapalným dusíkem.



Obrázek 3: Reakční schéma syntézy prekurzorů BiTSAP a BiDSAP.

3.3 Příprava solu (Metoda Sol-Gel)

K přípravě zvláknovatelného solu byl purifikovaný prekurzor zvážen do vysušené baňky (5,696 g pro BiTSAP; 6,066 g pro BiDSAP) a rozpuštěn v ethanolu (28 ml, resp. 35 ml) pod zpětným chladičem. Po úplném rozpuštění byla do systému zavedena kyselá katalyzační směs skládající se z demineralizované vody a HCl.

Směs byla míchána rychlostí 350 ot/min a zahřívána na 73 °C po přesně stanovenou dobu 4 hodin. Během této fáze maturace (zrání) docházelo k dynamické rovnováze mezi hydrolyzou alkoxy skupin a kondenzací vzniklých silanolů na poly-siloxanovou síť. Reakce byla následně ostře přerušena oddestilováním části rozpouštědla, čímž byla viskozita systému zafixována na hodnotě optimální pro elektrospinning.

3.4 Stejnoseměrné (DC) elektrospinningové zvláknování

Zahuštěný sol byl bezprostředně po destilaci nanesen do cartridge zařízení Nanospider. Pro zajištění vědecké porovnatelnosti vlivu prekurzorů na proces formování vlákna byly provozní parametry udržovány totožné pro oba materiály:

- Vzdálenost mezi stříkací elektrodou a uzemněným kolektorem: 180 mm.
- Kladné napětí na elektrodě: +61,5 kV.
- Záporné napětí na kolektoru: -10,7 kV.
- Rychlost pojezdu cartridge: 109 mm/s.
- Klimatické podmínky: Pokojová teplota (~ 23 °C) a kontrolovaná nízká relativní vlhkost (18,4 % pro BiTSAP, 20,4 % pro BiDSAP).

4 Výsledky a diskuze

4.1 Strukturní hodnocení a purita molekulárních prekurzorů

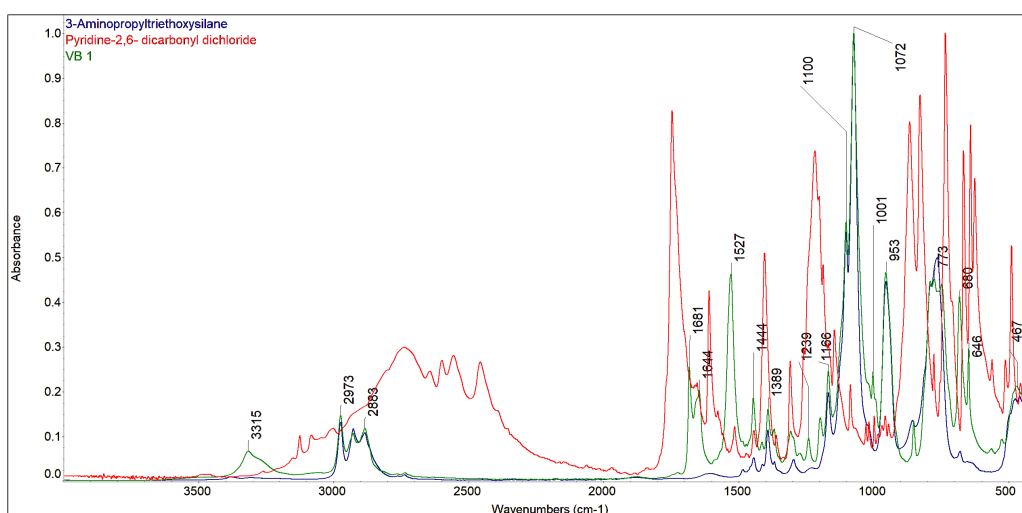
Úspěšná inkorporace pyridinového jádra a absolutní čistota obou monomerů byla jednoznačně potvrzena kombinací NMR, FTIR a MS analýz.

Kapalinová ^1H a ^{13}C NMR spektroskopie neprokázala žádné cizorodé signály. V protonovém spektru byly zřetelně identifikovány multiplety odpovídající aromatickému pyridinovému kruhu, signály methylenových skupin propylaminového řetězce i kvartety a triplety ethoxy skupin vázaných na křemík. Uhlíkové spektrum tyto závěry plně potvrdilo absencí píků náležejících toluenu či nezreagovaným aminům.

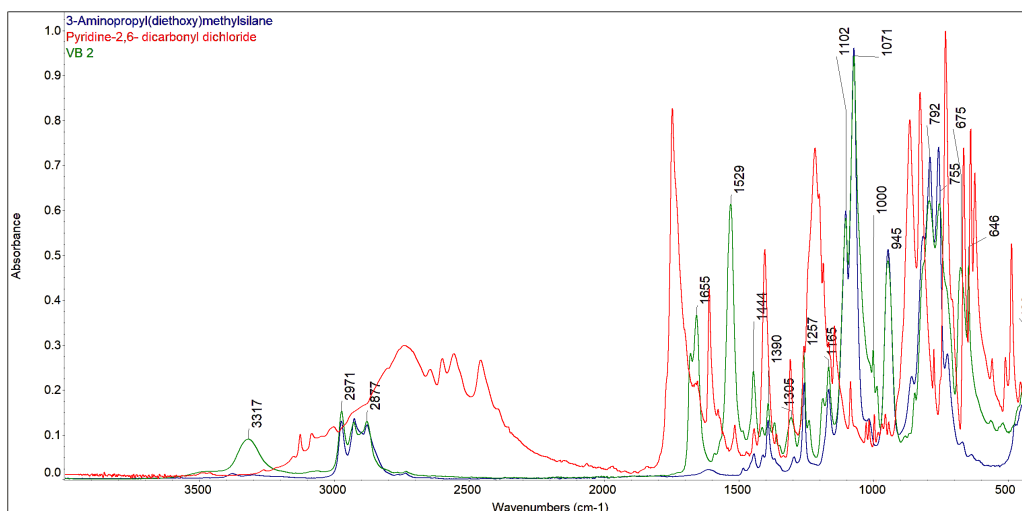
Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) prokázala úspěšný průběh amidační reakce. U prekurzoru BiTSAP byl zaznamenán vibrační pás $\nu(\text{N-H})$ amidové skupiny kolem 3315 cm^{-1} a extrémně důležitý pás $\nu(\text{C=O})$ posunutý vlivem konjugace s aromatickým kruhem do polohy $\sim 1681\text{--}1644\text{ cm}^{-1}$.

Tabulka 1: Přiřazení stěžejních vibračních pásů z FTIR spektra prekurzoru BiTSAP.

Vlnočet [cm^{-1}]	Přiřazení / Vibrační skupina
~ 3317	$\nu(\text{N-H})$ amidu (rozšířené maximum vlivem H-můstků)
$\sim 2971, \sim 2877$	$\nu(\text{C-H})$ alifatické vibrace propylových a ethoxy skupin
~ 1655	$\nu(\text{C=O})$ amidu (posunuto konjugací s pyridinem)
~ 1529	$\delta(\text{N-H}) + \nu(\text{C-N})$, překryv s aromatickými pásy
$\sim 1102, \sim 1071$	$\nu(\text{C-O-C})$ a $\nu(\text{Si-O-C})$ ethoxy skupin na křemíku
~ 1000	"Ring breathing" pyridinového jádra



Obrázek 4: FTIR spektrum pro BiTSAP



Obrázek 5: FTIR spektrum pro BiDSAP

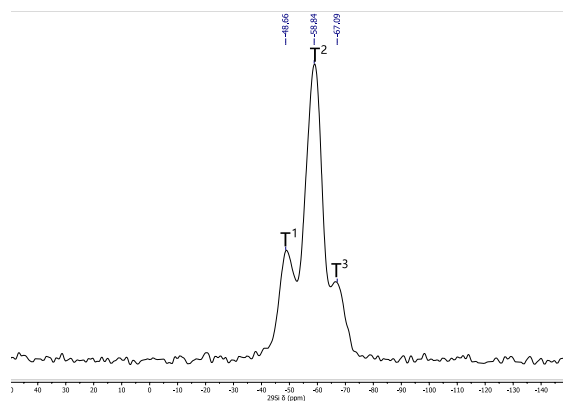
Vysoce citlivá hmotnostní spektrometrie (MS) s vysokým rozlišením poskytla přesné molekulové hmotnosti. V případě BiTSAP predikce molekulového iontu $[M+H]^+$ stanovila hodnotu m/z na 574,2957. V experimentu byl zachycen ostrý pík přesně při 574,2963, což představuje zanedbatelnou odchylku garantující produkt. Zajímavým jevem však byla masivní senzitivita těchto silanů. Vlivem silně kyselého pracovního prostředí MS spektrometru došlo k okamžité parciální hydrolyze alkoxy skupin, jež se projevila výskytem iontů s $m/z = 546, 2652$. U prekurzoru BiDSAP, který vykazuje nižší sterické bránění (dvě ethoxy skupiny místo tří), došlo v MS analyzátoru dokonce k úplné hydrolyze za vzniku tetrasilanolu (detekováno $m/z = 402, 1505$ vůči výpočtu 402,1512).

4.2 Kinetika sol-gel transformace a architektura polymerní sítě

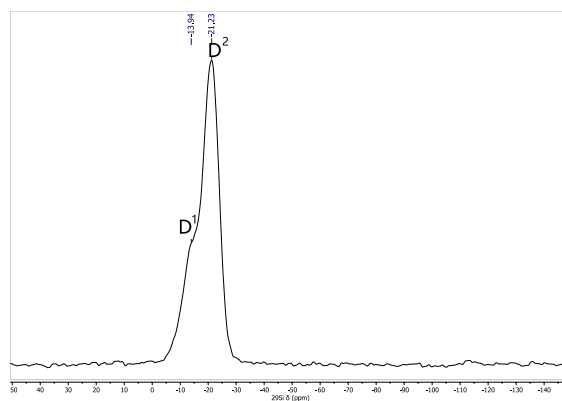
Zásadní informace o stupni zesíťování po provedení elektrospinningu poskytla pevnolátková nukleární magnetická rezonance (SS-NMR). Míra, do jaké monomery vytvořily prostorovou síť, přímo determinuje finální mechanické vlastnosti nanovláknenné membrány.

Systém BiTSAP (Trifunkční prekurzor): Pevnolátkové ^{29}Si CP/MAS NMR spektrum jasně detekovalo formování T-jednotek (silikony vázané ke třem kyslíkům). Spektrum ukázalo široké rezonance příslušející jednotkám T^1 , T^2 a T^3 . Signál nejčetnějšího druhu T^2 se nacházel při hodnotě chemického posunu $\delta = -58,84$ ppm, s doprovodnými rameny T^1 na $-48,66$ ppm a T^3 na $-67,09$ ppm. Pokročilou dekonvolucí píků byl zjištěn střední stupeň polykondenzace ve výši 63 %.

Ačkoliv 63 % nemusí znít jako limitní konverze, pro trifunkční systémy je to vynikající stav. Znamená to, že polymerní síť je bohatě větvená, ale zároveň obsahuje dostatek volných, nekondenzovaných konců (což potvrdilo pevnolátkové ^{13}C spektrum: 14 % zbytkových ethoxy skupin a 23 % volných silanolů). Právě tato úroveň polykondenzace zajišťuje ideální propletení (chain entanglement), které dalo solu fenomenální viskoelastické vlastnosti pro proces vlákenní.



(a) ^{29}Si CP/MAS NMR pro BiTSAP.



(b) ^{29}Si CP/MAS NMR pro BiDSAP.

Systém BiDSAP (Difunkční prekurzor): Na druhou stranu, systém tvořený difunkčními D-silany podstoupil mnohem razantnější transformaci. Spektrum ^{29}Si NMR odhalilo ostrý a masivní pík D^2 jednotek (plně kondenzované články lineárního řetězce) s posunem $\delta = -21, 23$ ppm, a pouze drobné rameno částečně kondenzovaných D^1 jednotek při $\delta = -13, 94$ ppm. Matematický model stanovil ohromující míru polykondenzace 83 %. Pevnolátkové ^{13}C NMR dokonce prokázalo, že u tohoto systému proběhla 100% hydrolyza (nula zbytkových ethoxy skupin, 17 % volných -OH).

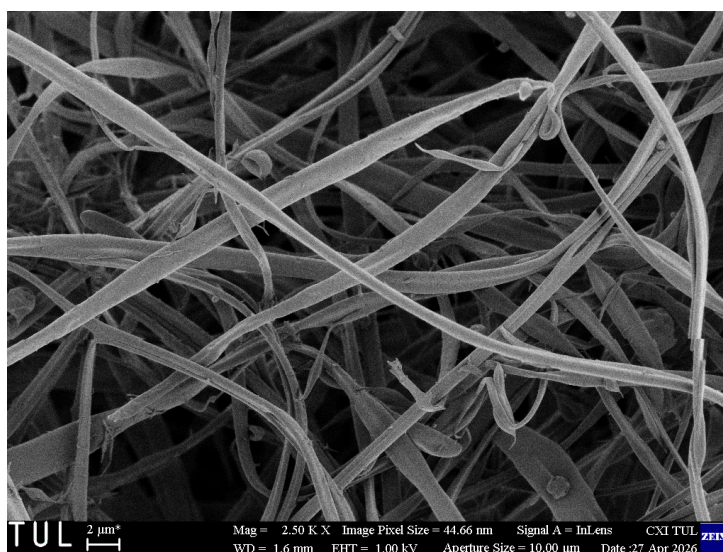
Z chemického hlediska reagoval BiDSAP mnohem ochotněji a kompletněji, avšak generoval pouze dlouhé, lineární polysiloxanové řetězce, neschopné vytvářet pevné, trojrozměrné uzly. To

se fatálně projevilo na morfologii vláken.

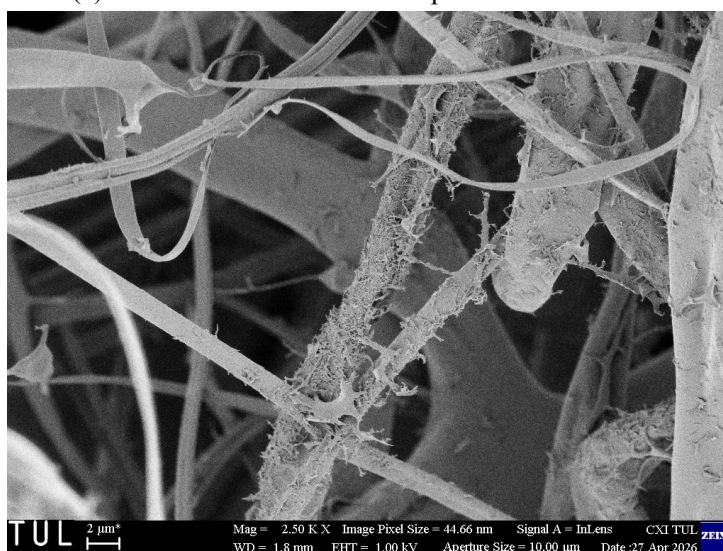
4.3 Vliv architektonické struktury na morfologii vláken (SEM Analýza)

Dopad dimenzionality (trifunkční T-jednotky vs. difunkční D-jednotky) na elektrohydrodynamické vlastnosti polymerního paprsku se naplno vizualizoval pod rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM).

Snímky nanovláčkové vrstvy zhotovené z prekurzoru **BiTSAP** ukázaly excelentní výsledky. Vláčka disponují vysoce hladkým, kruhovým průřezem a zcela uniformním tvarem. Vrstva nevykazuje žádné přebytky kapek (tzv. beading effect), perlové struktury ani praskliny na povrchu. Dosažení polykondenzace $\sim 63\%$ zabezpečilo solu dokonalou kohezi, takže paprsek během letu v elektrickém napětí 61,5 kV konzistentně schnul a prodlužoval se [2, 7].



(a) Hladká uniformní vlákna z prekurzoru BiTSAP.



(b) Silně defektní vlákna z prekurzoru BiDSAP.

Snímky vzorků zhotovených z prekurzoru **BiDSAP** poskytly zcela opačný, avšak vědecky hodnotný výsledek. Vláčka sice vznikla, ale mají vysoce nerovnoměrný, velmi drsný a trnitý povrch. Na hlavní ose vlákna kondenzovaly ostré výčnělky a struktura kolabovala. Lineární

povaha D-silanových polymerních řetězců znamenala, že jakmile se při letu začalo prudce odpařovat rozpouštědlo, řetězce se po sobě "sklouzávaly" (nedostatek chemického větvení).

5 Závěr

Tato bakalářská práce úspěšně dosáhla přípravy a charakterizace hybridních organosilanových vláken s heterocyklickými spojkami na bázi pyridinu. Experimentální práce prokázala, že syntéza prekurzorů BiTSAP i BiDSAP je vysoce účinná a poskytuje produkty o vysoké čistotě, jak bylo potvrzeno pomocí NMR v kapalně fázi a hmotnostní spektrometrie. Zabudování pyridinové skupiny do siloxanové kostry bylo ověřeno pomocí FTIR spektroskopie, která identifikovala charakteristické amidové a aromatické vibrace. Tyto výsledky potvrzují, že zvolená syntetická cesta, zahrnující reakci pyridin-2,6-dikarbonyl dichloridu s aminosilany, poskytuje spolehlivou platformu pro tvorbu funkcionalizovaných stavebních bloků pro hybridní nanomateriály.

Přechod od molekulárních prekurzorů k pevným vláknitým strukturám byl realizován prostřednictvím řízeného sol-gel procesu s následným stejnosměrným elektrostatickým zvlákňováním (DC electrospinning). Analytické zhodnocení výsledných vláken pomocí ^{29}Si a ^{13}C NMR spektroskopie v pevné fázi odhalilo významné rozdíly v architektuře sítě mezi oběma systémy. Zatímco BiTSAP, charakterizovaný trifunkčními T-jednotkami, dosáhl stupně polykondenzace přibližně 63 %, difunkční systém BiDSAP vykazoval vyšší stupeň kondenzace 83 %. Morfologická analýza provedená pomocí SEM ukázala, že BiTSAP poskytuje vlákna s hladkým a jednotným povrchem, zatímco vlákna BiDSAP se vyznačují vysoce nerovnoměrnou, trnitou topografií povrchu. Tato zjištění naznačují, že trifunkční povaha prekurzoru BiTSAP je příznivější pro tvorbu stabilních molekulárních zapletení nezbytných pro rovnoměrné ztenčování vlákna během procesu zvlákňování.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat charakteristikám zpracování prekurzoru BiDSAP. Ačkoli je jeho syntéza pozoruhodně přímočará a prakticky identická se syntézou BiTSAP, následná fáze zvlákňování se ukázala jako výjimečně obtížná. Reologické chování solů BiDSAP představovalo značné výzvy, které často vedly k nestabilní tvorbě paprsku a nekonzistentní depozici. Zdá se, že snížená funkcionalita stavebních bloků D-silanu omezuje vývoj dostatečně robustní viskoelastické sítě ve srovnání s analogem T-silanu. K posílení jeho zvlákňitelnosti pro praktické aplikace by byla nutná další optimalizace podmínek stárnutí v rámci sol-gel procesu nebo použití aditiv.

Během závěrečných fází této studie bylo krátce zkoumáno střídavé elektrostatické zvlákňování (AC electrospinning) jakožto potenciální alternativa. Přestože tyto počáteční zkoušky v současném rozsahu nepřinesly prokazatelné ani kvantifikovatelné výsledky, tato technika zůstává slibnou cestou pro další výzkum. AC zvlákňování je známo svou vyšší produkcí a odlišnými mechanismy stabilizace paprsku, což by mohlo lépe vyhovovat specifickým reologickým požadavkům difunkčních prekurzorů, jako je BiDSAP. Systematická studie parametrů AC zvlákňování by potenciálně mohla odemknout schopnost produkovat vysoce kvalitní vlákna z širší škály organosilanových architektur.

Použitá literatura

- [1] BROOK, Michael A. *Silicon in Organic, Organometallic, and Polymer Chemistry*. New York Weinheim: Wiley, 2000. A Wiley-Interscience Publication. ISBN 978-0-471-19658-7.
- [2] MÁKOVÁ, Veronika et al. Hybrid Organosilane Fibrous Materials and Their Contribution to Modern Science. *Polymer* [online]. 2021, roč. 228, s. 123862 [cit. 2026-03-20]. ISSN 0032-3861. Dostupné z DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123862.
- [3] KATRITZKY, Alan Roy. *Handbook of Heterocyclic Chemistry*. 3rd edition. vyd. Oxford: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-08-095843-9.
- [4] MAKOVA, Veronika, HOLUBOVA, Barbora, KULHANKOVA, Johana. *Method for the Preparation of a Sol for the Preparation of Hybrid Organosilane Fibers by Electrostatic Spinning, the Sol Prepared by This Method and Hybrid Organosilane Fibers Prepared by the Electrostatic Spinning of This Sol*. Vynálezce: Veronika MAKOVA, Barbora HOLUBOVA, Johana KULHANKOVA. Publ.: 2022-10. EP4067542 (A1). [Cit. 2026-03-20].
- [5] ISSA, Ahmed A., LUYT, Adriaan S. Kinetics of Alkoxysilanes and Organoalkoxysilanes Polymerization: A Review. *Polymers* [online]. 2019, roč. 11, č. 3, s. 537 [cit. 2026-04-21]. ISSN 2073-4360. Dostupné z DOI: 10.3390/polym11030537.
- [6] BRINKER, C. Jeffrey, SCHERER, George W. *Sol-Gel Science. The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press, 1990. ISBN 978-0-08-057103-4.
- [7] RENEKER, Darrell H. et al. Bending Instability of Electrically Charged Liquid Jets of Polymer Solutions in Electrospinning. *Journal of Applied Physics* [online]. 2000, roč. 87, č. 9, s. 4531–4547 [cit. 2026-03-21]. ISSN 0021-8979. Dostupné z DOI: 10.1063/1.373532.