

## POLYIMIDY NA BÁZE SUROVÍN Z OBNOVITEĽNÝCH ZDROJOV

MICHAELA ŠUSTEROVÁ a PETR SYSEL

Ústav polymerů, Vysoká škola chemicko-technologická  
v Praze, Technická 3, 166 28 Praha 6  
michaela.susterova@gmail.com

Došlo 7.6.22, prijaté 12.7.22.

Kľúčové slová: polyimidy, recentné suroviny, alicyklické monoméry, udržateľné polyméry

• <https://doi.org/10.54779/chl20220681>

## Obsah

1. Úvod
2. Polyimidy
  - 2.1. Syntéza polyimidov
  - 2.2. Vlastnosti polyimidov
3. Monoméry na recentnej báze pre syntézu polyimidov
4. Príprava a popis nových bio-polyimidov
5. Záver

## 1. Úvod

Syntetické polyméry, ktoré sa pripravujú najmä z látok s fosílnym pôvodom (ropa), sa stali nevyhnutnou a každodennou súčasťou nášho života či už v podobe domácich potrieb a textilu až po sofistikované inžinierske materiály používané napríklad v biomedicíne, leteckej technike či elektronike. Veľký dopyt po týchto materiáloch má však za následok znečistenie životného prostredia a dopadá aj na vyčerpanie zásob fosílnych surovín, a preto tiež bolo a stále je vynakladané úsilie nájsť obnoviteľné (recentné) zdroje a produkovať polyméry na báze prírodných surovín (tzv. bio-based polyméry)<sup>1</sup>.

V oblasti udržateľnej chémie už boli dosiahnuté pokroky s využitím biomasy. Biomasa je synonymum pre organický materiál biogénneho, tzn. nefosílného, charakteru, zahŕňajúc aj živú a rastúcu hmotu v prírode a odpadové materiály. Pod tento pojem teda spadajú okrem rastlinami produkovaných polysacharidov (celulóza, hemicelulóza, škrob) a lignínu tiež suchozemské a morské rastlinné materiály (tiež ich zvyšky a vedľajšie produkty) a živočíšne odpady<sup>2</sup>. Monoméry na biologickej báze boli už využité k syntéze polyuretánov, polykarbonátov, polyesterov či polyamidov a v súčasnosti sa venuje zvýšená pozornosť tiež možnosti produkcie tzv. bio-polyimidov (bio-PI)<sup>1</sup>.

Nasledujúci text sa zaoberá problematikou prípravy nových PI v kontexte využitia monomérov s biologickým

pôvodom. Počiatočná časť pojednáva o PI vo všeobecnej rovine, o možnostiach ich prípravy a ich vlastnostiach s prihliadnutím k ich novej modifikácii ako dôsledku zavedenia špecifických chemických štruktúr/skupín do polymérneho reťazca. Ďalšiu časť predstavuje krátky popis prípravy a získavania monomérov, tzn. diamínov a dianhydridov, z obnoviteľných surovín. Posledná časť zahŕňa popis vlastnej syntézy PI na báze alicyklického biomonoméru dianhydridu kyseliny 1,2,3,4-cyklobután-tetrakarboxylovej (CBDA) a vlastností týchto produktov, pričom ich porovnáva s plne aromatickým produktom na báze dianhydridu kyseliny pyromellitovej (PMDA) a 4,4'-oxydianilínu (ODA); tento produkt je komerčne dostupný pod názvom Kapton<sup>®</sup>.

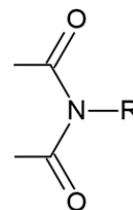
## 2. Polyimidy

Prvým syntézam produktov obsahujúcich imidové skupiny sa už v roku 1908 začal venovať Bogert a v roku 1955 boli získané aromatické PI s vysokou molekulovou hmotnosťou ako produkty dvojstupňovej polyreakcie, dnes známe ako Kapton<sup>®</sup>. Záujem o tieto polyméry odvtedy neustále rastie, za čím stoja hlavne vlastnosti PI, napríklad ich termooxidačná stabilita, jedinečné elektrické vlastnosti, vysoká odolnosť voči žiareniu a rozpúšťadlám či vysoká mechanická pevnosť. Využitie našli PI v pokročilých aplikáciách v letectve, kozmonautike, mikroelektronike, separačných membránach, optických zariadeniach, senzorocho, alebo ako polymérne matrice v kompozitných materiáloch<sup>3,4</sup>.

Základom ich štruktúry je prítomnosť imidovej skupiny (viď obr. 1), definovanej atómom dusíku viazaného k dvom susedným karboxylovým atómom uhlíku. Najčastejšie sa vyskytuje imidová štruktúra ako súčasť päť- alebo šesťčlenného cyklu<sup>5</sup>.

## 2.1. Syntéza polyimidov

Pre prípravu PI sú kľúčovými monomérmi dianhydridy karboxylových kyselín a diamíny, príp. aj diizokyanáty, a známych je viacero syntetických prístupov. Dvojkoľková syntéza je najvyužívanejším postupom pri príprave



Obr. 1. Štruktúra imidovej skupiny

lineárných PI. Táto polyreakcia zahŕňa krok, keď sa tvorí prekursor polyamidkarboxylová kyselina (PAA), a ktorý prebieha vo vysokovriacom rozpúšťadle pri nízkych až stredných teplotách. Imidový kruh sa najčastejšie vytvorí termickou imidizáciou pri teplote až 250 °C, v špeciálnych prípadoch možno využiť i chemickú cestu. Reakčnú schému dvojstupňovej syntézy, kde Ar predstavuje aromatickú, Al alicyklickú štruktúru, R môže reprezentovať aromatickú, alicyklickú alebo alifatickú štruktúru, ukazuje obr. 2. Ďalšou možnosťou je jednokroková syntéza. Týmto postupom môžu byť monoméry priamo prevedené na konečné produkty obvykle rozpustné v reakčnom systéme, pričom zmiešanie diamínu s dianhydridom v rozpúšťadle prebieha pri teplote 180 až 200 °C. Konverzia monomérov na PI tu prebieha rýchlo a medziprodukt PAA je prakticky nedetekovateľný<sup>4,6-8</sup>.

## 2.2. Vlastnosti polyimidov

Vlastnosti PI závisia na jeho štruktúre. Plne aromatické PI dosahujú vysokú tuhosť, sú rigidné a medzi reťazcami sa vyskytujú silné interakcie, následkom čoho sú tieto PI veľmi málo rozpustné a netaviteľné, čo limituje ich spracovanie klasickými metódami využívanými bežne pre termoplasty (napr. vstrekovanie či vytlačovanie). Tieto interakcie sú výsledkom tvorby intra- a interreťazcového prenosu náboja a polarizácie. S cieľom dosiahnuť ľahšie spracovanie PI, ovplyvniť molekulárne interakcie, narušiť usporiadanie makromolekúl a zvýšiť rozpustnosť boli už študované rôzne štrukturálne zmeny vzniknuté v dôsledku zavedenia tepelne stabilných, ale flexibilných spojok do reťazca (–O–, –CH<sub>2</sub>–, –SO<sub>2</sub>–), začlenenia polárnych či nepolárnych substituentov. Skúmalo sa tiež nahradenie symetrických štruktúr asymetrickými, zavedenie objemných substituentov a zalomených/nekoplanárnych štruktúr alebo prístup kopolymerizácie<sup>3,7</sup>.

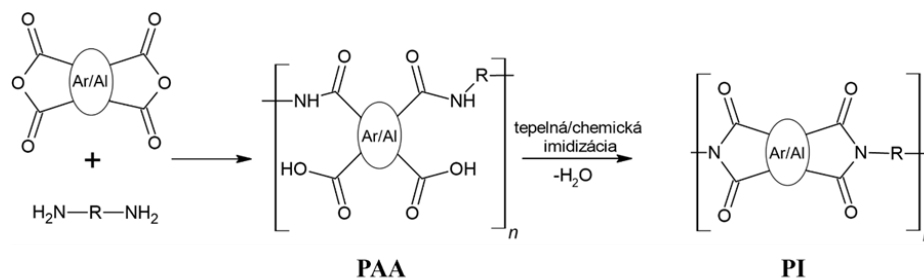
PI majú veľmi dobré tepelné a dielektrické vlastnosti. Vďaka teplotnej odolnosti a adhézii k rade materiálov sa používajú ako vysokoteplotné štruktúrne lepidlá či vysokoteplotné matrice vo vyššie zmienených aplikáciách. Za vysokou tepelnou stabilitou PI až do oblastí trvalo okolo 200 °C je ich aromatický charakter, silné medzireťazcové interakcie a pomerne inertný imidový kruh. Tepelnú stabilitu možno ešte zvýšiť modifikáciou koncových skupín polyméru. Počas tepelného rozkladu sa ako hlavný produkt uvoľňuje oxid uhoľnatý z imidového kruhu<sup>6,9</sup>.

PI dosahujú výborné mechanické vlastnosti, ktoré sú ovplyvnené štruktúrou, molekulovou hmotnosťou a procesom prípravy. Vo všeobecnosti sa pevnosti v ťahu pre PI pohybujú medzi 70–100 MPa s modulom pružnosti medzi 1,5 až 3 GPa a predĺžením pri pretrhnutí od 3 do 15 %, pričom pro PI s flexibilnými jednotkami v štruktúre môže predĺženie dosahovať vyšších hodnôt. Platí, aj keď nie absolútne, že polyméry s vyšším modulom vykazujú menšie predĺženie<sup>3</sup>.

Prenos náboja medzi donorovými amínovými a akceptorovými anhydridovými skupinami spôsobuje to, že PI sú obecné sfarbené do žltá až hnedá. Zafarbenie sa môže meniť v závislosti od toho, ako je štruktúra modifikovaná. Vplyv má napríklad trifluórmetylová (–CF<sub>3</sub>) skupina, ktorá je silným akceptorom elektrónov, alebo zavedenie alifatickej štruktúry. Tieto modifikácie redukujú interakcie spojené s prenosom náboja, čo môže vo výsledku viesť až k takmer bezfarebným produktom. Vznik prenosu náboja má vplyv tiež na optickú priepustnosť v spektre vlnových dĺžok viditeľného svetla, ktorá je znížená najmä u plne aromatických PI, ktorých štruktúry obsahujú konjugované väzby. Obecnne sa dá optická priepustnosť zvýšiť zavedením ohybných spojok, objemných substituentov alebo nekoplanárnych skupín do hlavného či vedľajšieho reťazca. Optické a elektrické vlastnosti možno upraviť začlenením chromofórov (trifenylaminová, karbazolová, perylénová štruktúra)<sup>3,10</sup>.

Rozpustnosť je parametrom, ktorý do istej miery súvisí s možnosťou spracovania polymérov. PI sú často veľmi málo rozpustné až nerozpustné v klasických organických rozpúšťadlách a navyše majú vysokú teplotu mäknutia, čo má za následok náročné a nákladné spracovanie. Riešením je využitie prekursoru PAA, z ktorého sa odlieva film, ktorý následne podstúpi imidizáciu. Rozpustnosť a spracovateľnosť z taveniny zlepšuje zavedenie objemných substituentov či flexibilných spojok do štruktúry PI (cit.<sup>3</sup>).

Čoraz významnejšími sa stávajú pre oblasť PI alicyklické a alifatické monoméry. Zabudovanie takýchto štruktúr do polymérneho reťazca ovplyvňuje vlastnosti PI, čo je dôsledkom nízkej hustoty (nie tak tesného usporiadania molekúl ako je tomu v prípade plne aromatických PI), slabšej polarizácie a nízkej pravdepodobnosti vzniku intera-intramolekulárneho prenosu náboja. Alicyklické dianhydridy majú slabú schopnosť elektróny prijať a alicyklické, resp. alifatické, diamíny elektróny darovať,



Obr. 2. Schéma dvojškrokovj syntézy PI cez prekursor PAA

čím sa potlačí tvorba interakcií s prenosom náboja<sup>3,11</sup>. Predmetom záujmu sa stali najmä alicyklické dianhydridy, keďže aminoskupiny alicyklického diamínu sú príliš bázičné a pre syntézu tak predstavujú problém z dôvodu tvorby soli PAA (cit.<sup>12</sup>). Pozornosť sa už venovala využitiu dianhydridov kyselín 1,2,3,4-cyklobutántetrakarboxylovej<sup>13</sup>, 1,2,3,4-cyklopentántetrakarboxylovej<sup>14</sup>, 1,2,4,5-cyklohexántetrakarboxylovej<sup>15</sup>, bicyklo[2.2.2]okt-7-én-2,3,5,6-tetrakarboxylovej<sup>11</sup> či dicyklohexyltetrakarboxylovej<sup>16</sup>.

### 3. Monoméry na recentnej báze pre syntézu polyimidov

Okrem modifikácie vlastností PI skrz alicyklické monoméry je ďalšou výhodou potenciálny bio-základ niektorých z nich. Väčšina v súčasnosti používaných chemikálií a polymérov je totiž založená na fosilných surovinách. Nežiaduce environmentálne a sociálne-ekonomické dôsledky a obmedzené zásoby tohto zdroja vedú k rastúcemu záujmu o využívanie biomasy ako suroviny pre výrobu chemikálii, polymérov a iných materiálov. Takéto polyméry potom možno nazvať ako udržateľné a možno ich rozdeliť do dvoch kategórií – prírodné polyméry (celulóza, lignín, škrob, atď.) a syntetické polyméry na prírodnej báze (tzv. bio-based, získané z biomasy). Používanie týchto polymérov môže zabrániť závislosti od ropných zdrojov a pomôcť znížiť emisie uhlíka, no rozšírenie ich používania je zatiaľ limitované viacerými prekážkami, zahŕňajúc napr. náklady či ich termomechanický výkon (obecne majú nižšiu tepelnú a mechanickú stabilitu)<sup>17</sup>.

Niektoré alifatické diamíny môžu byť produkované aj biotechnologickými postupmi – fermentáciou, bunkovou konverziou, enzymatickými procesmi – využívajúcimi mikroorganizmy<sup>18</sup>, no z dôvodu už zmienenej prílišnej zásaditosti ich aminoskupín je ich využitie pre syntézu PI limitované. Táto skutočnosť tak komplikuje otázku prípravy plne bio-PI, keďže aromatické diamíny nie je možné získať biosyntézou z dôvodu ich nekompatibility s mikroorganizmami a rastlinnými bunkami, pravdepodobne v dôsledku kombinácie interakcií iónových a hydrofóbných, a faktorov súvisiacich s  $\pi$ -elektrónmi, ktoré sú prítomné práve v aromatických látkach. Pre prípravu týchto monomérov je však možno využiť syntetické postupy s využitím látok na biologickej báze – príkladom je diamín odvodený od kyseliny 4-aminoškoricovej (4-ACA), ktorá je produkovaná bakteriálnymi kmeňmi.

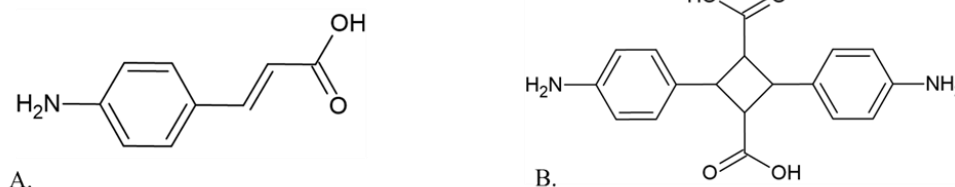
4-ACA možno previesť fotodimerizáciou na dichlorid a následne na diestery kyseliny 4,4'-diamino- $\alpha$ -truxilovej (4-ATA); 4-ACA a z nej odvodená 4-ATA sú ukázané na obr. 3. Estery 4-ATA boli potom využité pre syntézu rady PI dvojstupňovou syntézou cez prekursor PAA v kombinácii so štruktúrne rozličnými dianhydridmi. Pripravené PI vykazovali vysokú tepelnú stabilitu a vysoké hodnoty mechanických vlastností<sup>19</sup>.

Pre syntézu PI sa spolu s diamínmi využívajú dianhydridy tetrakarboxylových kyselín. Na význame naberajú stále viac tie, ktoré obsahujú alicyklické jednotky v štruktúre a ktoré ako monoméry majú z vyššie uvedených dôvodov väčší potenciál pri modifikácii vlastností výsledných PI. Pri ich syntéze sú však použité surové podmienky, často sa využíva foto-ožiarenie alebo vysokotlaková oxidácia kyselinou dusičnou alebo ozónom, čo robí syntézu náročnou a drahou. Ako príklad možno uviesť prípravu CBDA ožiareníím roztoku anhydridu kyseliny maleínovej v dioxáne vysokotlakovou ortuťovou lampou<sup>3</sup>. Tento dianhydrid však možno zaradiť medzi monoméry získateľné aj zo surovín na biologickej báze, keďže biomaleínová kyselina sa dá pripraviť kaskádou reakcií z furfuralu (ten sa získa z biomasy). Na CBDA možno previesť aj kyselinu fumarovú, ktorá sa extrahuje z rastliny *Fumaria officinalis*, eventuálne sa získa fermentáciou<sup>20,21</sup>. Na báze CBDA boli už pripravené filmy s vysokou tepelnou odolnosťou a transparentnosťou<sup>22</sup>, kompozitné materiály<sup>23</sup> či PI na plne biologickej báze v kombinácii s esterami 4-ATA (cit.<sup>19</sup>).

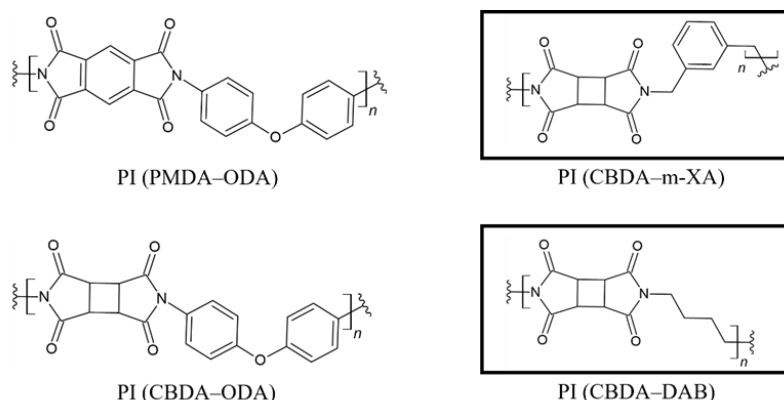
### 4. Príprava a popis nových bio-polyimidov

Využitie CBDA však umožňuje aj prípravu ďalších PI na potenciálne obnoviteľnej báze. Tu uvádzame v súčasnej dobe v našom laboratóriu syntetizované nové polymérne materiály (obr. 4), pričom do súvislostí sa dáva ich chemická štruktúra a vlastnosti.

Dva z týchto pripravených materiálov možno považovať za PI na plne biologickej báze. Ide o PI získané kombináciou CBDA s *m*-xylyldiamínom (*m*-XA) a s 1,4-diaminobutánom (DAB), označené ako PI (CBDA-*m*-XA) a (CBDA-DAB). DAB je totiž možné získať biosyntézou, prebiehajúcou v širokom spektre organizmov (napr. *Escherichia coli* alebo *Corynebacterium glutamicum*) prostredníctvom aminokyselín L-arginínu alebo L-ornitínu<sup>18</sup> a pri syntéze *m*-XA možno vyjsť z furfuralu (ten sa dá získať



Obr. 3. Chemická štruktúra (A) 4-ACA a (B) 4-ATA



Legenda:

PMDA – dianhydrid kyseliny pyromellitovej

CBDA – dianhydrid kyseliny 1,2,3,4-cyklobutántetrakarboxylovej

ODA – 4,4'-oxydianilín

m-XA – *m*-xylyldiamín

DAB – 1,4-diaminobután

Obr. 4. Štruktúry pripravených PI

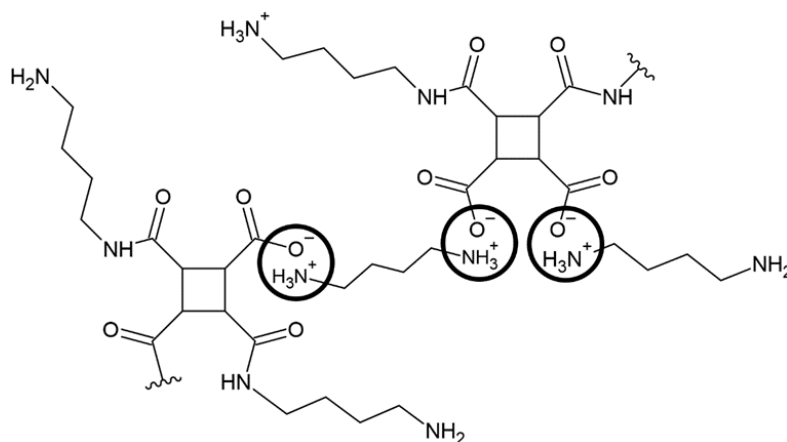
z biomasy) a akrylonitrilu<sup>24</sup>, alternatívou sú fenolické zlúčeniny (eugenol, ferulová kyselina, vanilín, kardanol, katechol), ktoré možno priamo extrahovať a izolovať z prírodných zdrojov, eventuálne je možné využiť odpad z agropriemyslu (drevo, orechové škrupiny)<sup>25</sup>.

K príprave PI bol využitý primárne prístup dvojstupňovej syntézy v prostredí rozpúšťadla *N*-metyl-2-pyrrolidónu s následnou tepelnou imidizáciou s finálnou teplotou ohrevu 250 °C. Vznik prekursoru a následne PI bol potvrdený infračervenou spektroskopiou. Použitie alicyklického dianhydridu s alifatickým diamínom pri príprave prekursoru PAA (CBDA–DAB) však viedlo k vzniku nerozpustnej zrazeniny v reakčnej zmesi. Z literatúry je známe, že v prípade použitia alicyklického/alifatického diamínu dochádza k tvorbe soli PAA (zobrazenie soli PAA

(CBDA–DAB) ukazuje obr. 5) v dôsledku vysokej bazicity aminoskupiny takéhoto aminu. Soľ sa tvorí už na začiatku reakcie a jej fyzikálne zosieťovaná štruktúra ako výsledok acidobázických interakcií vedie k heterogénnemu systému, keď sa vzniknutá zrazenina nerozpúšťa v bezvodých amidických rozpúšťadlách<sup>4</sup>.

Okrem dvojstupňovej syntézy je možná aj jednostupňová. Práve tá sa ukazuje ako vhodný postup pre prípravu PI s využitím vysoko bazických diamínov, keď sa reakčnými podmienkami zabráni vzniku zrazeniny PAA.

Po termickej imidizácii sa vyhodnocovala schopnosť materiálov tvoriť súvislé filmy. Kapton® je známy touto svojou vlastnosťou, ostatné materiály však tiež vykazovali filmtvorné vlastnosti, s výnimkou PI (CBDA–DAB), výsledkom ktorého po termickom procese bol prášok. Ter-



Obr. 5. Schematické zobrazenie acidobázických interakcií v PAA (CBDA–DAB)

mická stabilita sa stanovuje s využitím termogravimetrickej analýzy, na základe ktorej možno určiť teplotu, pri ktorej dochádza k tepelnému rozkladu materiálov, označovanej ako  $T_{10\%}$  (teplota, pri ktorej dôjde k strate desiatich hmotnostných percent). Plne aromatický PI Kapton® dosahuje v tomto smere vysoké hodnoty ( $T_{10\%} > 550\text{ °C}$ ), ďalšie pripravené semiaromatické PI sú tepelne stabilné menej z dôvodu začlenenia alicyklických segmentov. Dosiahnuté  $T_{10\%}$  pre tieto materiály klesali v rade podľa použitého diamínu ODA > *m*-XA > DAB a pohybovali sa v oblasti okolo 430 °C pre semiaromatické a pod 100 °C pre alicyklicko-alifatický PI.

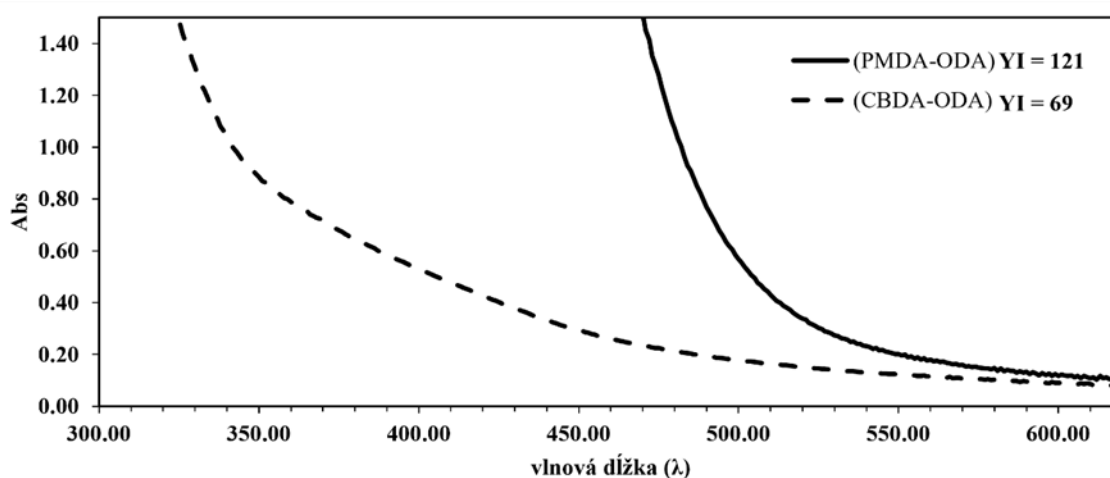
Nepřítomnosť aromatických segmentov v štruktúre PI má za následok potlačenie prenosu náboja medzi reťazcami, nižšiu hustotu a polarizovateľnosť makromolekúl. Začlenenie alicyklických štruktúr do polyimidových reťazcov sa preto považuje za jeden z efektívnych spôsobov, ako zvýšiť optickú transparentnosť<sup>4</sup>. Na obr. 6 sú ukázané výrezy z UV/Vis spektier pre pripravené materiály, ktoré poskytli transparentné filmy, spolu s hodnotami indexu žltosti (YI), kde hodnota nula prislúcha ideálne bielej/priehľadnej vzorke a s rastúcou hodnotou je viac žltá. PI (CBDA-*m*-XA) a (CBDA-DAB) neumožnili analýzu UV/Vis spektroskopiou, no pre PI na báze *m*-XA bolo možné zmerať aspoň YI, ktorý bol pre tento polymér rovný hodnote 75.

Aromatické PI dosahujú jedny z najvyšších hodnôt mechanických vlastností, ak ide o komerčné plasty, ako výsledok interakcií medzi reťazcami s aromatickým charakterom. Naopak, plne alicyklické/alifatické PI majú mechanické vlastnosti obecné horšie, hoci zavedenie týchto segmentov do reťazca za určitých podmienok molekulárneho usporiadania môže zachovať mechanické vlastnosti v medziach požadovaných hodnôt<sup>4,5</sup>. V prípade pripravených semiaromatických PI mali na dosiahnuté hodnoty mechanických vlastností vplyv najmä použité diamíny. Tieto monoméry obsahovali vo svojej štruktúre rôzne typy spojok, ktoré ovplyvnili hlavne krehkosť polyimidových filmov.

Rozpustnosť PI je v organických rozpúšťadlách limitovaná, ale k dispozícii sú postupy, ako rozpustnosť zvýšiť. Spomenúť možno zavedenie ohybných spojok, nekopolárných, nesymetrických, alicyklických a iných štruktúr brániacich vzniku prenosu náboja do hlavného reťazca, príp. začlenenie bočných skupín<sup>4</sup>. Napriek prítomným alicyklickým segmentom vo vybraných PI, nemali semiaromatické produkty zlepšenú rozpustnosť. Dôvodom je zrejme vysoká rigidita cyklobutánovej časti v CBDA. Určitým riešením problému obmedzených mechanických vlastností a tiež rozpustnosti môže byť vytvorenie vrstvy roztoku prekursoru na vhodnom substráte nasledovane termickou expozíciou (imidizáciou).

## 5. Záver

Zavádzanie rôznych funkčných skupín a špecifických štruktúr do polymérnych reťazcov PI sa uskutočňuje s cieľom modifikovať ich vlastnosti a uľahčiť ich spracovanie. Tiež sa do pozornosti čoraz viac dostávajú monoméry získané z obnoviteľných surovín. V rámci výskumu sme sa venovali príprave nových PI na báze potenciálne recentného CBDA s prihliadnutím na zisk takých produktov, ktoré by bolo možné považovať za plne na biologickej báze s využitím ďalších monomérov majúcich tento potenciál – *m*-XA a DAB. Ukázalo sa, že takéto PI možno získať dvojestupňovou alebo jednostupňovou syntézou. Zlepšenú rozpustnosť, s ktorou je späté spracovanie týchto polymérov, sme však zavedením jednotiek CBDA do makromolekúl nedosiahli. Zanesenie alicyklických segmentov skrz CBDA do polymérnych reťazcov ale viedlo k zlepšeniu optických parametrov pripravených filmov v porovnaní s plne aromatickým, no filmy na jeho báze boli krehkejšie. Pripravili sme radu materiálov, ktoré na základe použitého dianhydridu možno označiť prinajmenšom ako čiastočne bio-PI.



Obr. 6. Výrez z UV/Vis spektier a namerané hodnoty YI pripravených materiálov

Táto práca bola finančne podporená z projektu GA ČR č. 20-06264S.

#### Zoznam použitých skratiek

4-ACA	kyselina 4-aminoškoricová
4-ATA	kyselina 4,4'-diamino- $\alpha$ -truxilová
CBDA	dianhydrid kyseliny 1,2,3,4-cyklobután-tetrakarboxylovej
DAB	1,4-diaminobután
<i>m</i> -XA	<i>m</i> -xylylendiamín
ODA	4,4'-oxydianilín
PAA	polyamidkarboxylová kyselina
PI	polyimid(y)
PMDA	dianhydrid kyseliny pyromellitovej
YI	index žltnutia

#### LITERATÚRA

- Chen C.-K., Lin Y.-C., Hsu L.-C., Ho J.-C., Ueda M., Chen W.-C.: ACS Sustainable Chem. Eng. 9, 3278 (2021).
- Pascault J. P., Höfer R., Fuertes P., v knihe: *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (Matyjaszewski K., Möller M., ed.), str. 59. Elsevier, Amsterdam 2012.
- Liaw D.-J., Wang K.-L., Huang Y.-C., Lee K.-R., Lai J.-Y., Ha C.-S.: Prog. Polym. Sci. 37, 907 (2012).
- Zhuang Y., Seong J. G., Lee Y. M.: Prog. Polym. Sci. 92, 35 (2019).
- Bryant R. G., v knihe: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (Ley C., ed.), str. 1. Wiley-VCH, Weinheim 2014.
- Elvers B. (ed.): *Ullmann's Polymers and Plastics, 4 Volume Set: Products and Processes*. Wiley-VCH, Weinheim 2016.
- Tsai C.-L., Yen H.-J., Liou G.-S.: React. Funct. Polym. 108, 2 (2016).
- Kuhire S. S., Ichake A. B., Grau E., Cramail H., Wadgaonkar P. P.: Eur. Polym. J. 109, 257 (2018).
- Ramgobin A., Fontaine G., Bourbigot S.: Fire Saf. J. 120, 103060 (2021).
- Yi C., Li W., Shi S., He K., Ma P., Chen M., Yang C.: Sol. Energy 195, 340 (2020).
- Zhang M., Liu W., Gao X., Cui P., Zou T., Hu G., Tao L., Zhai L.: Polymers 12, 1532 (2020).
- Zhai L., Yang S., Fan L.: Polymer 53, 3529 (2012).
- Hasegawa M.: Polymers 9, 520 (2017).
- Schab-Balcerzak E., Grobelny L., Sobolewska A., Miniewicz A.: Eur. Polym. J. 42, 2859 (2006).
- Liu H., Zhai L., Bai L., He M., Wang C., Mo S., Fan L.: Polymer 163, 106 (2019).
- Hu X., Mu H., Wang Y., Wang Z., Yan J.: Polymer 134, 8 (2018).
- Wang Z., Ganewatta M. S., Tang C.: Prog. Polym. Sci. 101, 101197 (2020).
- Wang X., Gao S., Wang J., Xu S., Li H., Chen K., Ouyang P.: Chin. J. Chem. Eng. 30, 4 (2021).
- Suvannasara P., Tateyama S., Miyasato A., Matsumura K., Shimoda T., Ito T., Yamagata Y., Fujita T., Takaya N., Kaneko T.: Macromolecules 47, 1586 (2014).
- Thiyagarajan S., Franciolus D., Bisselink R. J. M., Ewing T. A., Boeriu C. G., van Haveren J.: ACS Sustainable Chem. Eng. 8, 10626 (2020).
- Wojcieszak R., Santarelli F., Paul S., Dumeignil F., Cavani F., Gonçalves R. V.: Sustainable Chem. Processes 3, 9 (2015).
- Suzuki H., Abe T., Takaishi K., Narita M., Hamada F.: J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem. 38, 108 (2000).
- Lu Y., Hao J., Xiao G., Zhao H., Hu Z., Wang T.: Appl. Surf. Sci. 394, 78 (2017).
- Scodeller I., Mansouri S., Morvan D., Muller E., de Oliveira Vigier K., Wischert R., Jérôme F.: Angew. Chem., Int. Ed. 57, 10510 (2018).
- Zhang C., Xue J., Yang X., Ke Y., Ou R., Wang Y., Madbouly S. A., Wang Q.: Prog. Polym. Sci. 125, 101473 (2022).

**M. Šusterová and P. Sysel** (*Department of Polymers, University of Chemistry and Technology, Prague*): **Polyimides Based on Feedstocks from Renewable Sources**

Aromatic polyimides constitute a group of special polymers with excellent thermal and mechanical properties. However, they are insoluble and infusible due to strong intermolecular interactions. For this reason, approaches are sought that would lead to an improvement of these properties and open the possibility to extend the use of polyimides. The interest to protect the environment leads also to searching for an alternative, namely, recent feedstocks, which could replace the fossil ones. This work is focused on the use of potentially recent monomers for synthesis of polyimides and their properties.

Keywords: polyimides, recent feedstocks, alicyclic monomers, sustainable polymers

● Šusterová M., Sysel P.: Chem. Listy 116, 681–686 (2022).

● <https://doi.org/10.54779/chl20220681>

#### Acknowledgements

This work was supported by the project of GA CR No. 20-06264S.