



Dinamikus átrendeződések

Beszélgetés Toldy Andreával

Toldy Andrea a Műegyetem Polimertechnika Tanszékének munkatársa, 2022 óta Gábor Dénes-díjas egyetemi tanára. 2023-ban alapította meg az MTA–BME Lendület Fenntartható Polimerek Kutatócsoportot, tavaly elnyerte a Magyar Érdemrend Tisztikereszt polgári tagozat kitüntetését. Projektjei, megbízatásai, díjai sorát a honlapján olvashatják, most csak azt emeljük ki, hogy „kutatási területe felöleli a polimer kompozitok teljes életciklusát az új, innovatív polimerek és környezetbarát adalékok fejlesztésétől kezdve, a korszerű gyártástechnológiáikon és átfogó minősítésükön át, egészen az értéknövelő újrahasznosításukig”.

Sok minden történt az utóbbi években, de még a felületes szemlélőnek is kirajzolódik az életrajzából, hogy szinte mindig változódtak az események a környezetében. Kisiskolás korában tört ki a délszláv háború, és a Vajdaságból Szegedre költöztek.

Ott egyik pillanatról a másikra föl kellett nőni. Akkor jártam negyedikbe, de szerintem mindennel teljesen tisztában voltunk. Nagyon élesen emlékszem a részletekre. Egy adott ponton a szüleim úgy döntöttek, hogy nem várják meg a következő katonai behívót, hanem átköltözünk Magyarországra. Édesapám transzfuziológus orvos volt, a szegedi egyetemen kapott munkát. Először barátoknál laktunk, mert a szüleimnek szinte az egész baráti köre addigra átköltözött Szegedre. Ott jártam utána általános iskolába, később gimnáziumba.

„Otthon” magyar vagy szerb iskolába járt?

Magyarba. Eleinte Magyarcsernyén laktunk, ott csak magyar iskola van, utána az édesapám munkája miatt költöztünk Nagybcskerekre, de ott is magyar iskolába jártunk. Magyar az anyanyelvem. Kisebbségként, azt hiszem, nagyon jó helyzetben voltunk Vajdaságban: tíz gyereknek már nyitottak magyar nyelvű tagozatot. Előremutató kisebbségi törvények voltak, talán a titói Jugoszlávia örökségeként, és szerintem még ma is azok.

Az iskolaváltás így sem lehetett könnyű, hiszen még ugyanabban a városban sem az.

Nagyon jó kémia tanárnőm volt a tanárképző főiskola gyakorló iskolájában, Péntek Lászlóné, Ágota, aki mindig támogatott és ösztönzött. Ez volt az egyetlen tantárgy, amit Szegeden kezdtem el tanulni, így semmilyen hátrányt nem kellett ledolgoznom az eltérő tantervek miatt. Az ő mentorálásával 8. osztályban megnyertem az országos Curie Kémia Emlékversenyt. De már korábban is nagyon érdekelt a kémia: édesapám még gyerekkorában kapott egy jutalomkönyvet az iskolában – az volt a címe, hogy *Játsszunk kémiát!* –, én pedig azt bűjtöttem, és a fizikatanártól, aki egyben kémia tanár is volt, kértem vegyszereket, hogy ott-hon kísérletezhessenek.

Az általános iskolából egyenes út vezetett „Meleg Pista” legendás kémia tagozatára a Radnóti Miklós Gimnáziumba. Akkor még sok minden érdekelt, de eljöttem a Műegyetem Vegyészmérnöki Karának nyílt napjára, és nagyon megtetszett az itteni légkör, a gyakorlatorientáltság, ezért döntöttem a vegyészmérnöki képzés mellett.



FOTO: MOLNÁR KOLOS

Rögtön a műszaki megoldások érdekelték, nem a hagyományosabb gyógyszerfejlesztés?

Igen, már kezdetben is a műszaki megoldások vonzottak. Érdekesnek találtam, hogy a vegyészmérnöki megközelítés nemcsak a molekulák szintjén vizsgálja a folyamatokat, hanem azok ipari megvalósítására és optimalizálására is fókuszál. Ez a gyakorlati szemlélet állt hozzám közelebb.

Keglevich György mosolyogva említette, hogy a diákköröse volt.

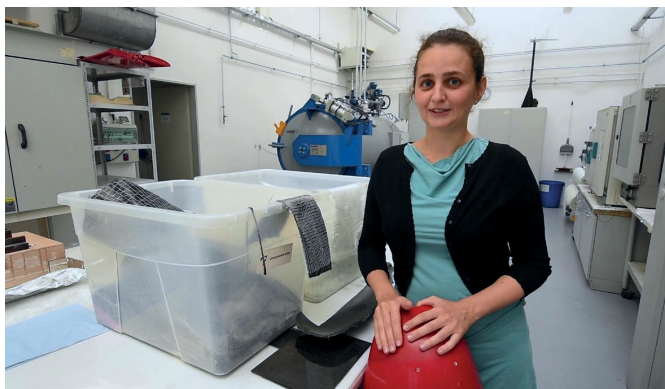
Elég korán bekapcsolódtam a kutatómunkába, és akkor is az a szempont vezérelt, hogy ne a fióknak fejlesszek, hanem legyen valamilyen alkalmazás. Úgyhogy azokat az égésgátló molekulákat, amelyeket előállítottunk, a gyakorlatban is hasznosítottuk, még az egyetemi évek alatt. Ennek a folytatása lett a PhD-munka Marosi Györgynél. Abból született egy szabadalom is, és azt az anyagot, amit akkor fejlesztettünk, most vizsgálja be egy cég, már várjuk az eredményeket. Hát ha ilyen hosszú Csipkerózsika-álmom után gyártani fogják, és kereskedelmi forgalomba kerül.

Mit „tud” ez az anyag?

A szabadalom egy egyszerű, környezetbarát szintézismódszerre vonatkozik, amellyel olyan foszfortartalmú égésgátlókat lehet előállítani, amelyek térhálósítóként is működnek, azaz reaktív égésgátlók.



FOTÓ: SZEBÉNYI GÁBOR



A Lányok Napján

Ezek szerint még tűz nélkül is hasznát veszik a vegyületüknek.

Igen, az additív égésgátlóktól eltérően a reaktív égésgátlók reakcióba lépnek a polimerrel, és mivel beépülnek a rendszerbe, nem migrálnak ki a használat során a polimer felületére, ezáltal kicsit stabilabbak.

Marosi György korábban mesélte, hogy az égésgátlás kutatása mellett megjelentek a palettájukon a gyógyszerformuláláshoz kapcsolódó fejlesztések és persze a biopolimerek.

Én főleg térhálós rendszerek, epoxigyanták kutatásával foglalkoztam, illetve foglalkozom a mai napig. De volt egy európai uniós kutatási pályázatunk, amelyben megújuló forrásból fejlesztünk cukoralapú biogyantákat.

Gondolom, nem kristálycukorból.

A szintézisek glükózból indultak ki, de az alapvető célunk az volt, hogy a biogyanták előállítása ne csökkentse az élelmiszer-termelésre rendelkezésre álló földterületeket, hanem – fenntartható módon – a meglévő mezőgazdasági hulladékokat hasznosítsa.

A PhD-fokozat megszerzése után átkerült a Polimertechnika Tanszékre, és talán eltolták a hangsúlyok.

A Szerves Kémia és Technológia Tanszék és a Polimertechnika Tanszék gyakran közösen dolgozott együtt különböző kutatási területeken, mert jól kiegészítik egymást a kompetenciáink, ami nagyon előnyös. Amikor befejeztem a doktori képzést, a Vegyész-mérnöki Karon létszámszop volt, de a két tanszék közösen elnyert egy európai uniós pályázatot polimerek értéknövelő újrahasznosítására. A Polimertechnika Tanszéken akkoriban nem volt olyan kolléga, aki megfelelő tapasztalattal rendelkezett volna az európai uniós pályázatok vezetésében, úgyhogy 2008-tól én lettem a „hídember”.

Hogyan egészíti ki egymást a kétféle kompetencia?

Az anyagtudományi területnek rendszerint anyagfejlesztési része is van, például új anyagokat, új adalékokat állítunk elő, másrészt megjelenik a műszaki fejlesztés, például a kompozitok előállítása, mert az új epoxigyantákból vagy az új adalékokból szálerősített kompozitokat állítunk elő. Egy projektben sokszor egy vegyész-mérnök és egy gépész-mérnök hallgató dolgozik párban, és mindenki azt csinálja, amihez jól ért, amit szeret, ugyanakkor együtt is dolgoznak és beletanulnak kicsit a másik szakmájába. Ha később az iparban dolgoznak, szót tudnak majd érteni a partnerterület szakértőivel.

Milyen „értéknövelő újrahasznosítást” javasoltak az első munkában?

Ezt a pályázatot az újrahasznosítás hőskorában írták ki, amikor elég kevés információ állt még rendelkezésre erről a területről, ezért először az ipari szereplők igényeit mértük fel: hol tudnának újrahasznosított anyagokkal dolgozni, milyen alapvető követelményeket kell ehhez teljesíteni. Például az olvadákfolyási indexnek állandónak kell maradnia, különben a reciklátum nehezen építhető be a termelésbe. Emellett fejlesztettünk is: számos ipari projektpartnerrel kaptunk különböző hulladékokat, akár autóiipari vagy elektronikai hulladékot, és kidolgoztunk egy analitikai, főként spektrometriai módszert az egyes sűrűségfrakciók hatékony azonosítására, mert az értéknövelt újrahasznosításhoz nem felel meg a vegyes hulladék. Meghatároztuk azokat a határokat, ahol sűrűség szerint érdemes elválasztani a hulladékokat, és utána úgy fejlesztettünk termékeket, hogy kihasználtuk az egyes frakciók előnyeit. Itt bejött az égésgátlás is, mert csináltunk olyan szendvicskompozitot, amelynek a felületi rétege égésgátló volt, a belső réteg másik sűrűségfrakcióból készült, és még szálerősítést is adtunk hozzá. Készítettünk például egy ajtónyitó kilincset, amely teljes mértékben újrahasznosított polimerből épült fel.

A következő években repüléstechnikai fejlesztéseket célzó EU-s pályázatokat is elnyertünk.

A Clean Sky programról már többször hallhattunk. Hogyan hirdetik meg a témákat, hogyan találkoznak a fejlesztők és a megrendelők?

Az Európai Unió és a repüléstechnikai iparág szereplői közösen finanszírozzák a Clean Sky programot, amelynek keretében célzott kutatás-fejlesztési pályázatokat hirdetnek meg. A nagy ipari vállalatok és más érintett szereplők meghatározzák a megoldatlan technológiai kihívásaikat – például olyan fejlesztési feladatokat, amelyekhez nem áll rendelkezésükre elegendő erőforrás vagy szakértelem. Ezekhez időkeretet és elérhető támogatási összeget rendelnek, majd nyílt pályázatot írnak ki. A felhívásokra önállóan vagy kisebb konzorciumokban is lehet pályázni. A két tanszék két pályázatot nyert meg együtt, és nagyon sikeresen kooperáltunk.

Mi volt a feladat?

Az Airbus Defence and Space kompozit repülőgépek villámvédelmére keresett megoldást. Ha fém repülőgépbe csap bele a villám, nem sérülnek meg az utasok, mert a fémtest Faraday-kalitkaként viselkedik. De a mostani repülőgépeknek már több mint a fele polimer kompozit. Erre a váltásra azért került sor, mert a polimer kompozitnak sokkal kisebb a tömege, így jelentősen csökkenthető az üzemanyag-fogyasztás, környezetbarátabbá válik a repülés. Sokan nem tudják, hogy a modern gépek szén-dioxid-kibocsátása már 60 gramm/utaskilométer alá csökkent, tehát ha valaki egyedül autózik, nagyobb mértékben terheli a környezetet, mintha repülne – és ezt jórészt a kompozitoknak köszönhetjük.

De ha egy kompozit szerkezeti elembe belecsap a villám, akkor jelentős hőenergia halmozódhat fel lokálisan, ami gyulladáshoz vezethet. Emiatt többnyire finom rézhálót laminálnak a szénszálerősítésű kompozit szénszálerétegei közé, ez viszont egyrészt drága, másrészt rontja a különböző rétegek közötti adhéziót. Ezért az Airbus jól vezető kompozitot akart, mi pedig arra gondoltunk, hogy nanotechnológiai megoldással kellene megnövelni az epoxigyanták vezetőképességét.



Tudtuk, hogy a szén nanocsövek alkalmasak erre, és az is felmerült, hogy mi magunk fejlesszünk szén nanoszálakat. Magyarországon nagy hagyománya van a szénszályártásnak, és arra gondoltunk, hogy elektrosztatikus szálképzéssel állítsunk elő poliakrilonitril nanoszálakat, amelyeket aztán elszenesítünk. Ez az ötlet nagyon megtetszett az Airbusnak, és megnyertük a pályázatot. Rendkívül kockázatos vállalkozás volt, mert a nanoszálaknak sokkal kisebb az átmérőjük és sokkal nagyobb a felületük, mint a hagyományos prekursorzálaknak, ezért fennállt annak a veszélye, hogy nem tudjuk az anyagunkat nanoszénzállá alakítani, hanem egyszerűen elég. De sikerült úgy optimalmunk a paramétereket, hogy nem égett el, és a nanoszálak a kompozitokban is jól működtek. Szén nanocsövekkel együtt alkalmazva pedig további szinergikus hatásokat tapasztaltunk. Az Airbus elégedett volt – a hasznosítás már ipari titok.

És a másik cég?

A Dassault Aviation esetében az volt az alapötletünk, hogy a kőolajalapú epoxigyantákat megújuló forrásból származó gyantákra kellene cserélnünk. Nagyon sok ilyen rendszer létezik már most is, de a repüléstechnikai alkalmazásokhoz általában alacsony az üvegesedési átmeneti hőmérsékletük. A beltéri alkatrészek esetében az üvegesedési átmeneti hőmérsékletnek legalább 120 °C-nak kell lennie, míg a szerkezeti elemek esetében ez a hőmérséklet minimum 180 °C, amelyet a különböző növényi olajokon alapuló epoxigyantákkal korábban nem igazán sikerült elérni. A szerkezet-tulajdonság összefüggések ismeretében tudtuk, hogy ehhez merevbb, aromás vagy cikloalifás szerkezetre van szükség, így kézenfekvő volt, hogy cukoralapú bioepoxi rendszereket kezdjünk fejleszteni. Nagyon sok molekulát előállítottak a vegyészmérnök kollégák, köztük olyat is, amelynek az üvegesedési átmeneti hőmérséklete megfelelő térhálósítóval akár 210 fok köré emelkedett. És ami még nagyon fontos: az ebből készült kompozit mechanikai tulajdonságai legalább olyan jók vagy jobbak voltak, mint a hagyományos DGEBA-alapú (1,4-butándiol-diglicidil-éter) epoxigyanta kompozitoké. A szerkezeti elemként használható szénszálak kompozitok mellett növényi eredetű erősítéssel is készült biokompozit. A jutaszállal erősített bioepoxi kompozitból például belső, kabintéri elemeket, szekrényeket gyártott a Dassault, de akár ülések háttámlájaként is megállja a helyét. A természetes szálak nagyon jól égnek, ezért ezeknek a kompozitoknak még fontosabb az égésgátlása. Az epoxigyanta és a természetes szálak együttes égésgátlásán az egyik PhD-hallgatóm, Szolnoki Beáta dolgozott sokat; ez a „kettős égésgátlás” nagyon hatásosnak bizonyult.

Van „pilot üzemük” is?

Jól felszerelt félüzemi laborunk van, ahol a legtöbb, iparban is alkalmazott gyártástechnológia rendelkezésünkre áll, így innen akár már méteres darabok is kikerülhetnek. A tanszék támogatja az egyetemi versenycsapatokat is, amelyek rakétát, napelemes hajót, versenyautókat fejlesztenek: ők szintén készítenek itt nagyobb méretű kompozitokat.

A cikkeiből kiderül, hogy az égésgátlás mind a mai napig megmaradt, de közben, az újrahasználatosság iránti igény erősödése miatt, megjelentek a hőre lágyuló anyagok.

Igen, hőre lágyuló kompozitokat is fejlesztünk, mégpedig kaprolaktámalapú poliamid 6 rendszereket. Ezek azért különlegesek, mert a kaprolaktám vízviszkózítású folyadék, így a hagyományos térhálós rendszerekre kidolgozott gyártástechnológiákkal tudjuk

előállítani a polimer kompozitokat in situ polimerizációval. Ezáltal nemcsak rövid szálak, fröccsöntött kompozitokat, hanem hosszú szálak erősítésű kompozitokat is készíthetünk, amelyek mechanikai tulajdonságai jelentősen meghaladják a rövid szálak rendszereket, így például autók szerkezeti elemeiként is alkalmazhatók.

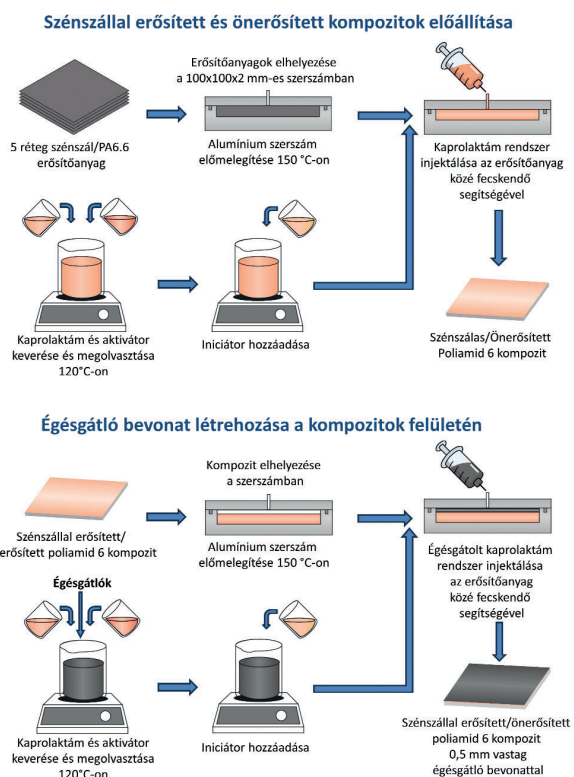
A hőre lágyuló kompozitok égésgátlását még a térhálós rendszereknel is nehezebb megoldani, mert jellemzően kisebb a termikus stabilitásuk. Emellett a kompozitok égésgátlása számos kihívást tartogat a szálerősítés miatt. A legelső cikkeket mi írtuk arról, hogy hogyan befolyásolja a száltartalom az éghetőséget, és hogyan befolyásolja a szálerősítés a felhabosodó égésgátlók mechanizmusát.

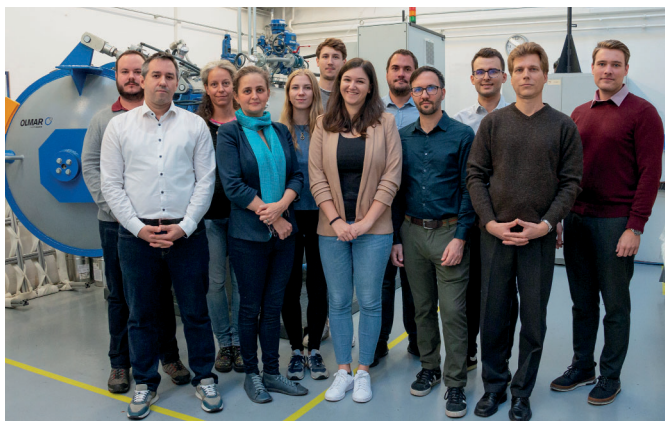
Mire szolgál a felhabosodás?

Ez általánosan alkalmazott égésgátlási mechanizmus, amely jól szigetelő védőréteget hoz létre a polimer felületén, de ha a szénszálak rétegek közötti polimerben is van felhabosodó égésgátló, akkor ez „működésbe lépve” elválasztja egymástól a erősítőrészeket, emiatt a tüzeset után megmaradó mechanikai tulajdonságok nagyon leromlanak. Égés közben pedig maga az erősítőanyag akadályozza az összefüggő, jól szigetelő hab kialakulását. A polimer mátrixba bevitt égésgátló egyébként is leronthatja a mechanikai tulajdonságokat, csökkentheti az üvegesedési átmeneti hőmérsékletet.

Emiatt előnyösnek bizonyult egy olyan konstrukció, ahol a mátrixban nem alkalmazunk égésgátlót, viszont a felületre, ahol a hőhatást várjuk, fölviszünk még egy réteget, amely nagy koncentrációban tartalmaz égésgátlót. Egy-egy felhasználási területen gyakran előírják a felületi jellemzőket, és a minőségi követelményeket rendszerint gélbevonattal teljesítik. Ha amúgy is kell bevonat a felületre, akkor már jobban járunk, ha ezt felhabosodó égésgátló bevonattá alakítjuk.

Kompozitok előállítása (fent) és égésgátló bevonat kialakítása az öntőformában (lent) – így alig kerülnek illékony szerves vegyületek a levegőbe





A Lendület-kutatócsoport

Pomázi Ákos, egykori PhD-hallgatóm doktori munkája során sikerült epoxigyanta-alapú égésgátló gélbevonatokat fejlesztenünk. A most végzős PhD-hallgatóm, Kovács Zsófia szintén hasonló égésgátló bevonatokat készített, de kaprolaktámalapú poliamid 6 szénszálal és önerősített kompozitokra.

Mostani Lendület-kutatásaiban egy különleges, „hőre keményedő–hőre lágyuló” anyag a főszereplő.

Amikor először olvastam erről az anyagcsaládról, a vitrimerekről, akkor azonnal felmerült bennem: ha eljutunk odáig, hogy akár repülőgépek szerkezeti elemeiként is alkalmazhatók és ipari méretekben is újrahasznosíthatók lesznek, akkor ez a felfedezés akár Nobel-díjat is érhet... Bár a dinamikus kovalens kötések szerepét már az 1940-es években vizsgálták a gumikban, a vitrimer-kon koncepció a polimerek területén csak az elmúlt két évtizedben kapott jelentős figyelmet. A lengyel–francia Ludwik Leibler és csoportja 2011-ben publikálta azt a nagy hatású tanulmányt, amely széles körben ismertté tette ezt az anyagcsaládot a polimer-kutatásban.

A vitrimerek ugyanúgy térhálósak, mint az epoxigyanta, de a mátrixban dinamikus átrendeződő kötések vannak, és egy adott hőmérséklet fölött úgy viselkednek a polimerek, mintha hőre lágyulók lennének. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy megolvashatók, könnyen újrahasznosíthatók, öngyógyuló tulajdonságokkal rendelkeznek. A kémiai háttér is nagyon érdekes: sokféle típust tartanak már számon – a kutatók óriási lendülettel vetették bele magukat a fejlesztésbe, hogy minél több ilyen rendszert kipróbáljanak, összehasonlítsák a tulajdonságaikat a meglévő epoxigyantákéval és kidolgozzák a hatékony újrahasznosítási eljárásokat. Akár zárt ciklusú újrahasznosítás is megvalósulhat: építőelemekre bontás és újbóli szintézis, minőségromlás nélkül.

De még sok kihívással kell megbirkóznunk, úgyhogy a Lendület-programunk egyik pillére is a vitrimer rendszerek fejlesztése. Az égésgátlás ugyancsak fontos, mert a vitrimerek jól éghetők, és azon is dolgozunk, hogy olyan „építőköveket” integráljunk a mátrixba, amelyek mellett megmaradnak a különleges tulajdonságok, de szükség esetén égésgátló hatással is rendelkeznek.

Tehát reaktív égésgátlást terveznek?

Az első hozzáférhető rendszerrel többféle megoldást kipróbáltunk – azzal az amerikai céggel vettünk részt közös kutatási projektben, amely először hozott kereskedelmi forgalomba vitrimeret. Kezdetben additív égésgátlókat használtunk, aztán saját fejlesztésű reaktív égésgátlókat, végül sikeresen megoldottuk a felületi égésgátlást is. Ennek az az előnye, hogy az égésgátló réteget egy-

szerű préseléssel föl lehet vinni, mert a vitrimer átalakulási hőmérséklete fölött megolvasható és összepréselhető a szénszálal kompozittal. Itt tartunk most, és már vannak ötleteink az égésgátláshoz szükséges építőkövek beépítésére is: ez a következő időszak feladata lesz. Bízom benne, hogy a vitrimerek fejlesztése hamarosan elér arra a pontra, ahol már ipari termékeként is megjelenhetnek.

Említette a PhD-hallgatóit. A tudományegyetemen csökken az érdeklődés a posztgraduális képzés iránt. Mivel tartják a tanszéken a végzősöket?

Igyekszünk olyan témákat kiírni, amelyek nemcsak tudományos, hanem gyakorlati szempontból is érdekesek, és valamilyen pályázathoz kapcsolódnak, amiből kiegészítő ösztöndíjat tudunk fizetni.

A fokozat megszerzése után elmennek egy céghez vagy bent maradnak az egyetemen?

Mindkettőre van példa. Szolnoki Beáta, Pomázi Ákos az egyetemen kapott státuszt, Beátának hamarosan végez az első két saját PhD-hallgatója, Ákos pedig laborvezető a Polimertechnika Tanszéken. De Niedermann Péter már lassan négy éve a dániai LEGO-nál dolgozik – ez persze sikertörténet.

A Műegyetem most „vált modellt”, ami nyugtalanságot okozhat.

Nagy a bizonytalanság, úgy látom, de próbálunk reménnyel tekinteni a jövő felé. Elkötelezetten dolgozunk, rengeteget pályázunk, ez később sem változik majd.

A hazai kutatási támogatások csökkenő tendenciát mutatnak, ami sok helyen már nem csak a fiatal kutatókat térítheti el a pályától.

Tagja vagyok a Fiatal Kutatók Akadémiájának, amely szerintem nagyon fontos szerepet tölt be a fiatal kutatók érdekvédelmében. Igyekszünk konstruktív visszajelzést adni a pályázatkíró szervezeteknek. Nemrég például tárgyalást folytattunk az NKFIH-val, és örömmel tapasztaltuk, hogy több javaslatunkat is figyelembe vették a pályázati kiírásokban, figyelnek a szavunkra. Bízunk benne, hogy ezzel is hozzájárulhatunk ahhoz, hogy a fiatal kutatók számára itthon is vonzó perspektívát kínáljon a tudományos pálya.

Ez önmagában még rendszerint nem elég: a tanszéken nagyon sok európai uniós vagy bilaterális pályázatot adunk be.

Közben ott a családja, a három iskolás gyerek. Hogy jut mindenre idő?

Szülőként még inkább törekszem arra, hogy a kutatásra fordítható időt a lehető leghatékonyabban kihasználjam, bár ez nem mindig könnyű. Fontosnak tartom, hogy azoknak is segítsek, akik hasonló helyzetben vannak. A Műegyetemen működő „Gender Equality Plan” csoport munkájában is részt veszek, amelynek létrehozása elengedhetetlen volt ahhoz, hogy az egyetem továbbra is pályázhasson európai uniós forrásokra. Ehhez éves akciótervek is kapcsolódnak, amelyeknek egyik eleme a családbarátabb egyetem kialakítása. Ennek részeként jött létre a Műegyetem játszóháza: így a szülési szabadságon lévő munkatársak, hallgatók könnyebben be tudnak jönni konzultációra vagy megbeszélésre, akár családtag vagy bébisitter kíséretében. Emellett kialakítottunk egy közösségi irodát, ahol nyugodt körülmények között lehet dolgozni, tárgyalni. Kaptunk pályázati támogatást, de sok önkéntes munka is kellett ahhoz, hogy olyan környezetet teremtsünk, amely valóban támogatja a szülőként dolgozó egyetemi polgárokat.

sv