

Hajós Péter

■ Pannon Egyetem, Analitikai Kémia Intézeti Tanszék | hajosp@almos.uni-pannon.hu

Ionkromatográfiás és ioncsere-kémiai kutatások a Pannon Egyetemen

Előzmények és kitekintés

A Pannon Egyetem Analitikai Kémia Intézeti Tanszékén, valamint a korábban itt működő MTA Analitikai Kémia Kutatócsoportban 50 éve (1970–2020) folynak kutatások a nagy hatékonyságú analitikai elválasztások fizikai kémiai, oldatkémiai vizsgálatában, az ioncsere-kémia elméletének és kromatográfiás alkalmazásainak témakörében. Az elmúlt évtizedek alatt nemzetközileg elismert kémiai elválasztástudományi iskola alakult ki, elsősorban az ioncsere- és folyadékkromatográfia, a komplex kémiai egyensúlyok elválasztástechnikái alapjainak kutatásában. Az ioncsere-kémia témakörének első korai felvetéséhez Inczédy János akadémikus, tanszékvezető egyetemi tanár, az MKE egykori elnöke nevét kell említeni [1]. A tanszék sokfelé ágazódó elválasztástudományi kutatásain (extrakció, ionpár-képződés, szelektivitás, külsőszféra-komplexek) belül az ionkromatográfiás szakterületet – e cikk szerzője, korábbi és jelenlegi egyetemi munkatársak, PhD-hallgatók, diplomázók, több generáción át – megalapozták, művelték, új felismerések sorával bővítették, és széles körben bevezették. Jelentős nemzetközi együttműködések alakultak ki vezető külföldi egyetemi kutatócsoportokkal (Torino, Lausanne, Bécs, Innsbruck, Lund, Hobart, Genf). A kooperációk kölcsönösen előnyösnek bizonyultak. Gyakran adtak lehetőséget kutatók, PhD-hallgatók cseréjére, közös pályázatokra, jelentős nemzetközi publikációk közlésére. Az oktatásban kiemelt szerep is figyelemre méltó, több mint 100 szak- és diplomadolgozat, valamint 16 egyetemi doktori, PhD-értekezés készült ezen a szakterületen a kutatóhely témavezetésében, ill. kooperációjában.

A kutatócsoport innovatív módon és eredményesen művelte az ioncsere szilárd állófázisok, a folyadékfázisú eluens kémia-ját és új, hatékony kémiai elválasztási elveket, detektálási módszereket fejlesztett ki. A tudományos iskola kiemelendő érdeme, hogy nemcsak alapkutatások és módszerfejlesztések történtek – a megfelelő elméleti háttér kidolgozása mellett –, hanem napjainkban a vizsgálatokhoz elengedhetetlenül szükséges korszerű nagy hatékonyságú, csatolós mőszeres infrastruktúra is kialakult. Ugyanakkor meg kell említeni például, hogy a kezdeti években az első magyarországi, saját összeállítású ionkromatográf (Hajós Péter) és nagy nyomású intenzív folyadékkromatográf (Víg Gyula) megépítésére itt, a Veszprémi Egyetem Analitikai Kémia Tanszékén került sor. Az ionkromatográfiás mérőrendszer szintézissel kifejlesztett héjszerkezetű ioncsereelővel működött. Ezek az eszközök már oldatelemzési kutatásokra is alkalmasak voltak [2,3].

Sikeres hazai és külföldi pályázatok (5 ciklusban, 4 éves futamidőön át) elnyert alapkutatási OTKA-pályázatok, olasz–magyar T&T-projekt, CNR-Italia, FEFA, Phare, Támop, ill. Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique, Svájc) révén a lehetőségek folyamatosan bővültek. Az egyes témákhoz ipari kutatási együttműködések is társultak, elsősorban a gyógyszeripar és az atomerőművi vízkémia területeiről.

Később, a 90-es években nyilvánvalóvá vált, hogy a módszer elméleti és infrastrukturális tanszéki fejlesztése, alkalmazása a szerves ionok és az ionizálható, kis molekulatömegű szerves molekulák analitikai vizsgálatában új tudományterületet képvisel. Ennek megfelelően a csoport kutatási palettája a 90-es évek közepétől lényegesen bővült. A rövidebb, hosszabb tanulmányutak is jelentősen hozzájárultak a kutatási stratégia finomításához. Erre az együttműködések keretében Hajós Péter cambridge-i, lausanne-i és torinói, Horváth Krisztián torinói, knoxville-i, ill. a PhD-hallgatók, diplomázók torinói, lund-i, bécsi, genfi tapasztalatszerzései révén került sor. Preferált terület volt az elválasztó szilárd fázisok működése és a korszerű csatolt analitikai technikák megismerése, alkalmazása. A kölcsönösség jegyében két svájci és hat olasz PhD-hallgató, ill. kutató végzett eredményes és jól dokumentált kutatómunkát laboratóriumunkban.

Kutatásaink hasznosítása ma már az elválasztások szelektivitásának tervszerű növelésén át az ultranagy tisztaságú vizek vizsgálatáig, a komplex ionok és az ionizálható biológiai óriásmolekulák bioanalitikai elválasztásáig terjed. Napjainkban az oldatokból végzett ionos analízis nagy hatékonyságú ionszelektív folyadékkromatográfiás módszer, amelyben az elválasztó szilárd fázis felületi szerkezetű ioncsereelő polimer, és a detektálás legtöbbször nagy érzékenységű, az eluens ionok háttérvezetését kiküszöbölő elektromos vezetés. Egyre szélesebb körben találunk kutatási alkalmazást a kémia szinte minden területén, a szerves és szerves kémia, a biokémia, a proteomika, a gyógyszerkémia, a környezeti kémia és a víztechnológiákban egyaránt.

A kutatóhely eredményei, publikációi és a meghívások ez időben nemzetközi elismertségre utaltak. A hazai rendezésű Balatoni Nemzetközi Ioncsere kémiai szimpóziumokat (1980–1990, MKE, FECS, MTA) követően az első nagy létszámú szakterületi konferenciák széles körű egyetemi, kutatóintézeti részvétellel Torinóban (1994) és Dallasban (1995), majd Pittsburghban (2006) zajlottak. Ezek sikeres eredményeiben a tanszék munkatársai jelentős részt vállaltak. A konferenciasorozat nemzetközileg meg-



szavazott tudományos bizottságának összetétele is jól demonstrálja a témában vezető kutatóhelyek eloszlását (J. Chromatogr., 706, 1994, 583; P. Haddad, Hobart University, Australia; P. Hajós, University of Pannonia, Hungary; H. Small, HSR, Michigan, USA; K. Tanaka, Nagoya, Japan; D. Pietrzyk, University Iowa, USA; J. Stillian, Dionex Co. California, USA; J. Fritz, Iowa State University, USA; R. Cassidy, University of Saskatchewan, Canada; C. Sarzanini, University of Torino, Italy; J. Lamb, Brigham Young University, USA).

Ha kitekintünk a modern analitikai kémiai elválasztástudomány elmúlt évtizedeire, megállapítható, hogy az egyik legdinamikusabban fejlődő részterületté vált a nagy hatékonyságú ion- és folyadékromatográfia. A módszer vizes oldatokból ionok és ionizálható szerves molekulák gyors, szelektív elválasztását, felismerését teszi lehetővé. E kutatási irány napjainkban a világ vezető HPLC-laboratóriumaiban fokozott igényű kihívást jelent. Ez érzékelhető a héjszerkezetű szilárd fázisok szintézise, alkalmazásai területén, mechanizmusok elméleti leírásában, a detektálási és a nagy szelektivitású csatolási módszerek fejlesztésében is (HPIC /MS, UHPLC/ICP/MS, UHPSEC stb.).

Érdemes megemlíteni, hogy a klasszikus ioncsere-kémiaiban és ioncsere-kromatográfiában az elmúlt több évtized során világszerte jelentős fordulatok tanúi lehettünk. Az aminosavak szelektív elválasztása ioncsere oszlopon (kémiai Nobel-díj, 1972) a biokémiaiban, biológiában sorsdöntő előrelépést jelentett. A szilárd fázisú peptidszintézis ioncsere polimeren (kémiai Nobel-díj, 1984) a gyógyszerkémia fontos eljárásává vált. Az ioncsere folyamatok intenzifikálása pellikuláris állófázisokon, a szendvics szerkezetű polimer ioncsereolók szintézisei (1985), a nagy érzékenységgel szuppresszoros elektromos vezetési detektálás, az eluens oldatok célzott elektrolitikus on-line kémiai generálása (2005), a mikrokapilláris és többdimenziós csatolt ionkromatográfia, (2015) – a hagyományos, vizes-oldatos analízisben – áttörést idézett elő. A szakterületen olvasható legújabb irányok is fontos témákat jeleznek. Ezeket a kihívásokat elsősorban a környezeti kémia és az orvosi kémia problémái generálják. Az ion-szelektív grafének megjelenése (Nature, 2016, Carbon, 2020), a nanopórusos ioncsereolók és a szelektív ionpumpák szerepe az energiahasznosításban és a biokémiaiban (Nature, 2019, Nature Materials, 2020), a mikrofluid ioncsere csatornák szintézise, fehérjespecifikus 3D nyomtatott monolit ioncsereolók szintézise (ACS, Analytical Chemistry, 2019) vagy a terápiás antitest-módosulatok SEC–ioncsere–MS vizsgálata (Sci. Rep.-Nature, 2020) arra utalnak, hogy a kutatócsoport ioncsere-kémia alapuló látásmódja a jövőben is aktuális lehet. A kutatási profil, a helyi lehetőségekkel összhangban, ez irányban is bővíthető.

Mi is tapasztaljuk – azt a mások által is említett tényt –, hogy a korábban nemzetközileg is elismert magyar analitikai alapoktatási iskolák hazai viszonylatban fogyatkoznak. Elsősorban azért, mert az művelésükhöz szükséges kreatív kémiai szaktudás egyre ritkább, másrészt a rutin analitikai műveleteket preferálják. Ezért is fontos lenne a tradicionális alapokkal működő hazai kutatóműhelyek megtartása, fejlesztése, az egyetemi utánpótlás biztosítása és eredményeik szélesebb körben történő bemutatása.

A tanszéken jelenleg is folyó analitikai kémiai elválasztástudományi kutatási témakörök rövid bemutatásakor részben hivatkozunk múltbeli, időszakonként megjelenő összefoglaló jellegű hazai és külföldi beszámolóinkra is (pl. MTA 187. ünnepi közgyűlése, Kémiai Tudományok Osztálya tudományos ülése, MKF [4], Adv. Chromatogr., Marcel Dekker Inc., New York [5], Reviews on Analytical Chemistry, Euroanalysis, Bologna [6], Cambridge [7]).

Ezúttal az elért eredményekből mutatunk be vázlatot néhány jellemző példával.

Kémiai egyensúlyi elmélet ioncsere retenció leírására

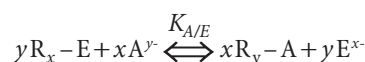
Retenció adatbázis létrehozása

A kutatócsoportban jelenleg is művelt alapoktatási témák aktualitását az a tény adja, hogy az egyre összetettebb és bonyolultabb biológiai, biotechnológiai és környezeti minták ionizálható molekuláinak felismerése állandóan jelen lévő kémiai és egyben analitikai igény. Széles vizsgálati skálában karbonsavak, haloecetsavak, aminosavak, alifás aminok, oxoanionok, szerves ionok, ionos peptidláncok, fémorganikus komplex ionok szelektív elválasztását, azonosítását tekintettük feladatnak. Ezek nagy szelektivitású megoldása új alapelvek kromatográfiai módszereket, egyensúlyi és kinetikai számításokat, ill. ion- és molekulaszeelektív állófázis-anyagok kifejlesztését igényelték. A kutatásaink során igazoltuk, hogy a szelektivitás, a hatékonyság, a kémiai szerkezettől való retenciófüggés mint alapvető funkcionális tulajdonságok birtokában a bonyolult analitikai elválasztások tervezhetővé, paramétereire becsülhetővé válnak. A retenció sorrendet, a hatékonyságot több fizikai kémiai tényező befolyásolja, és az adott elválasztási rendszer szelektivitásának szabályozásakor valamennyi paraméter együttes hatását kell figyelembe vennünk [5, 8–13].

Kutatásaink egyik fő iránya volt az elválasztások fizikai kémiai mechanizmusának részletes meghatározása és a szelektivitás célszerű növelése. Ezek a szilárd és az oldatfázisú mikroegyensúlyi kémiai paraméterek (pH, komplexstabilitási értékek, ionos moláris frakciók, megoszlási állandók, ioncsere-kapacitás, a komponensek pK és pI értékei) ismeretében, iterációs számítások segítségével valósultak meg. A szelektivitás szisztematikus szabályozásával az elválasztások kémiai paramétereinek optimalizálását értük el. A hatékonyság növelését új eluens oldatok kifejlesztésével és a héjszerkezetű fázisok alkalmazásával lehetett biztosítani.

A retenció folyamatok elméleti leírásának alapja az a felismerés volt, hogy a folyamatokban részt vevő minta- és eluensionok a mozgófázisban fellépő lehetséges kémiai mellékreakcióit (protolízis, töltésváltozás, ikerion-képződés, kelát- és hidroxokomplex-képződés) kell pontosan típusonként beazonosítani és a megoszlási folyamatba integrálni [5]. Ezek nyomán – az aktuális móltörteloszlásoknak megfelelően – a komponensek különböző frakciókban vannak jelen, amelyek szimultán ioncsere-folyamatokban együttesen határozzák meg a retenció mértékét. Az elv alkalmazása jelentősen könnyíti az analitikus módszertani feladatait. Ilyen jellegű kémiai tipizálásra az ionkromatográfia nemzetközi szakirodalmában első alkalommal került sor.

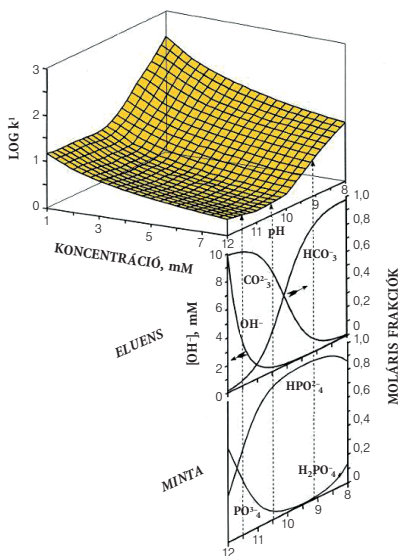
Ezen rendszerek kvantitatív kezeléséhez – kémiai egyensúlyi megfontolások alapján – egységes tárgyalásmódot biztosító retenció mechanizmusokat, ill. azokat leíró egyenleteket vezetünk be az ionkromatográfiába. A számítások alapja a két fázis (R szilárd és E eluens oldat) között zajló megoszlási egyensúlyi folyamat, amelyre A ion esetében felírható kiindulási alapegyenleti reakció:



Az eredmények jó alapot szolgáltatnak az ionos szerkezet és a retenció tulajdonságok között megfigyelt kísérleti összefüggések értelmezésére. Kromatográfiai úton, a mérések alapján retenció adatbázist hoztunk létre több mint 100 különböző ionfé-



leség elválasztásával különböző kémiai összetételű, híg vizes oldatú eluensrendszerben. Ezen adatok alapján széles eluenskoncentráció- és pH-tartományban az egyes ionokra jellemző 3D retenciós felületeket adtunk meg, amelyek kvantitatív módon, jól demonstrálják az egyes analitikai rendszerekben az eluensek retenciós hatásait, a tervezhető szelektivitási viszonyokat. Az így szerkesztett ábrák alapvető információval szolgálnak a mintaionok megoszlási folyamatainak kémiai háttéréről. A mintaion és az eluension protolízise a megosztó ioncsere-folyamatra szuperponálódó, azt befolyásoló mellékreakció, mint ahogy ez a foszfát esetében is látható (1. ábra).



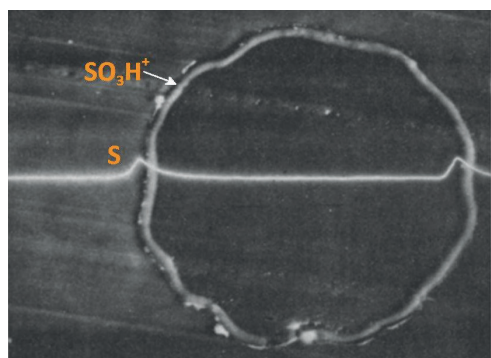
1. ábra. Foszfátion számított és várható retenciós felülete karbonátos elúció során. Eluensionok és a mintaion moláris frakcióinak változása a pH függvényében

A 3D felület minden pontja kromatográfiai csúcspozícióknak felel meg. A számított és/vagy mért retenciós idők értékei ezeken a felületeken követhetők. Az egyensúlyi elmélet alapján hasonló stratégiai retenciós felületeket, összefüggéseket adtunk meg egyéb szervetlen, szerves anionok, változó oxidációfokú klór-, bróm-oxoanionok, fém-kelát anionok, ill. kationok esetében is.

Szelektív szilárd fázisok szintézise és eluens oldatrendszerek kémiája

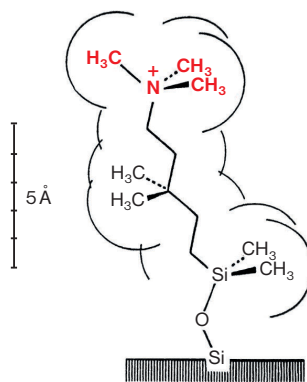
A nagy hatékonyságú ion- és folyadékromatográfia gyors fejlődése elsősorban az alkalmazott héjszerkezetű szorbensek, a különleges fizikai és kémiai összetételű ioncserélők szintézisének és az ezek mechanizmusával kapcsolatos felismeréseknek köszönhető.

2/a ábra. Felületileg szulfonált kationcserélő keresztmetszete, kapacitás: 0,055 mekv/g, funkciós csoport: -SO₃H⁺ (S-elemzés, X-ray microanalyser system, JEOL 50A, EDAX 707 B) [2]



A kutatások korai szakaszában felületi ioncserélők működésének elméletével, szintézisével foglalkoztunk. Pellikuláris vagy felületi ioncserélő szintézisére láthatunk példát a 2/a ábrán.

A sztírol-divinilbenzol kopolimeren irányított szulfonálással előállított kationcserélő polimer szemcse elektronmikroszkópos röntgen-mikroanalitikai felvételén a keresztmetszeten áthaladó elektronsugár vonala kénintenzitást jelez a hely függvényében. Ezáltal a szemcse gömbhéjban feldúsuló -SO₃H⁺ kationcsere funkciós csoportok beépülését igazoltuk. A polimer szemcse közepe neutrális, a funkciós csoportoktól mentes. Az ilyen szerkezetű szilárd megosztó fázisokon az ioncsere elválasztási folyamatok diffúziós gátlása, kapacitása jelentősen csökken. Ennek következtében az elválasztások sebessége és hatékonysága nagyságrendekkel nő. A fázis előállítási szintézise szabadalom által védett [14]. Hasonló megfontolásból, felületi anioncserélő szintézisére és alkalmazására is sor került (2/b ábra). Ervin sz. Kovatscsal (Lausanne-i Egyetem, Svájc), – a GC retenciós index megalkotójával – közös kutatási projektben derült fény arra, hogy a retenciói mértékének indexálását a funkciós csoportok felületi, molekuláris sűrűsége is befolyásolhatja. Kvaterner ammónium funkciós csoportú anioncserélők előállítása történt szilícium-dioxid-alapú hordozón, amelyen a különböző molarányú szilícizáló szerek révén változó felületi funkciós sűrűségű szilárd fázishoz jutottunk [9].



2/b ábra. Szilikaalapú aminált felületi anioncserélő [9]

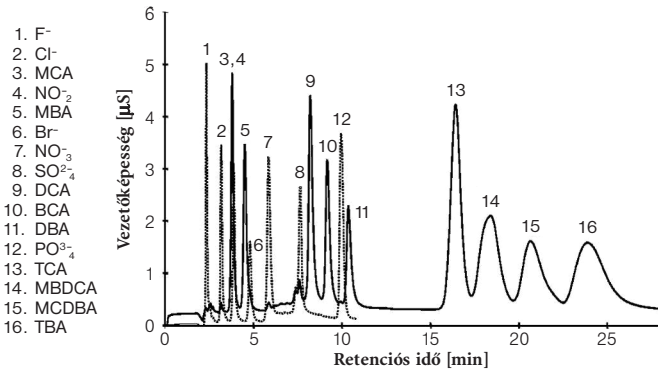
Ezeket a vizsgálatokat „eluens azonos” deuteralált minták injektálásával alapoztuk meg. Tudomásunk szerint első alkalom volt a szakirodalomban, hogy ioncsere-funkcionális polimernek kémiai tulajdonságát meghatározó csoportok molekuláris távolságát és a fázis szelektivitását összefüggésbe hozta. Az újabban használatos felületi ioncserélők elektrosztatikus elven alapuló szendvicsszerkezetűek, amelyek révén a funkciós sűrűséget is szabályozni lehet.

Makrociklikus anionkromatográfia

Karbonsavak, haloecetsavak elválasztása

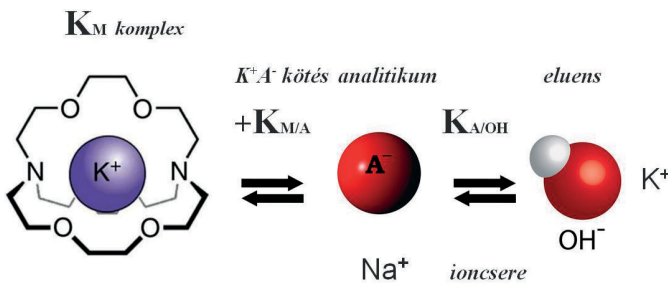
A módszer kifejlesztésére és alkalmazására főleg a vízanalitika tartott igényt. Nagy hatékonyságú ionkromatográfiai módszert fejlesztettünk ki nyolc halogénezett ecetsav (monoklór-, diklór-, triklór-, monobróm-, dibróm-, tribróm-, monoklór-monobróm-, monoklór-dibróm-ecetsav) analitikai elválasztására makrociklikus tulajdonságú polimer állófázison, vezetőképességi detektálással (3. ábra) [15].

A környezeti minták analízise során fontos feladat az ehhez hasonló kompozíciójú minták gyors vizsgálata, amely egyéb kromatográfiai módszerrel (ionkizálás, ionpár) csak korlátozott szelektivitással lehetséges. Ugyanakkor a makrociklikus anioncserélő kémiai szerkezete, komplexálása az eluensek különböző alkáli-



3. ábra. Mono-/di-/tri- klór-bróm haloacetátok elválasztása makrociklikus ioncserével (1 – fluorid, 2 – klorid, 3 – monoklór-acetát, 4 – nitrit, 5 – monobrom-acetát, 6 – bromid, 7 nitrát, 8 – szulfát, 9 – diklór-acetát, 10 – bromklór-acetát, 11 – dibrom-acetát, 12 – foszfát, 13 – triklóracetát, 14 – monobrom-diklór-acetát, 15 – monoklór-dibrom-acetát, 16 – tribrom-acetát [15])

ionjaival, a pH változtatása lehetőséget adtak az elválasztások szelektivitásának szabályozására. Makrociklus-alapú, n-decil-2.2.2 (D222) (4. ábra) összetételű anioncserélő anyag retenciósi tulajdonságait, ill. az anioncserélő réteg komplexálással kialakítható körülményeit tanulmányoztuk abból a célból, hogy változtatható ioncsere-kapacitású elválasztórendszert fejlesszünk ki.



4. ábra. Makrociklikus anioncserés elúció kémiai egyensúlyai

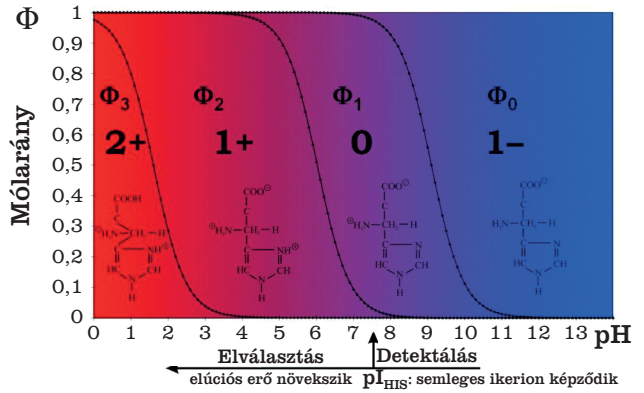
Az így előállt kromatográfiai rendszer előnye, hogy az izokratikus, állandó koncentrációjú elúció körülményei között is lehetőség van a retenció értékének, így az elválasztás minőségének szabályozására [15–17].

Dipoláris ionkromatográfia

Ikerionos eluensek kifejlesztése

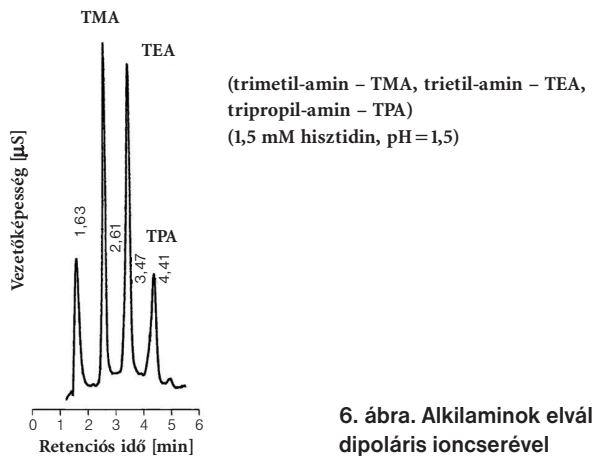
Felismertük, hogy az izoelektromos tulajdonságú bázisos aminosavak – pl. az L-hisztidin (2-amino-3-(4-imidazol)-propionsav), (HIS) – vagy a 2,3-diamino-propionsav (DAP) sósavas közegben – előnyösen alkalmazható eluensek alkáli-, alkáliföldfém-ionok, alifás aminok kationcserélő oszlopon történő kromatográfiájára és a szelektivitás tervszerű változtatására. Az eluens az alkalmasan választott pH-tól függően ($1 < \text{pH} < 3$) egyértékű (H_2HIS^+) vagy kétértékű ($\text{H}_3\text{HIS}^{2+}$) kationként funkcionál, és ily módon az egymástól jelentősen eltérő retenciósi tulajdonságú kationos mintaionok elválasztása egy szeparáción belül megoldható [10,18–19]. Ennek során a pH szabályozásával az eluens elúciós erőssége, töltése változtatható (5. ábra) és a retenció befolyásolható.

További előny, hogy az L-hisztidin alkalmazásával, annak izoelektromos tulajdonsága következtében, – $\text{pH} \sim \text{pI}$ közegben – elő-



5. ábra. Dipoláris ioncsere, HCl – L-hisztidin eluens protonionizációs egyensúlyai

nyös elektromos vezetési detektálás valósítható meg. Nyomnénynységű kationok, ill. alkil-aminok analízise válik lehetővé (6. ábra).

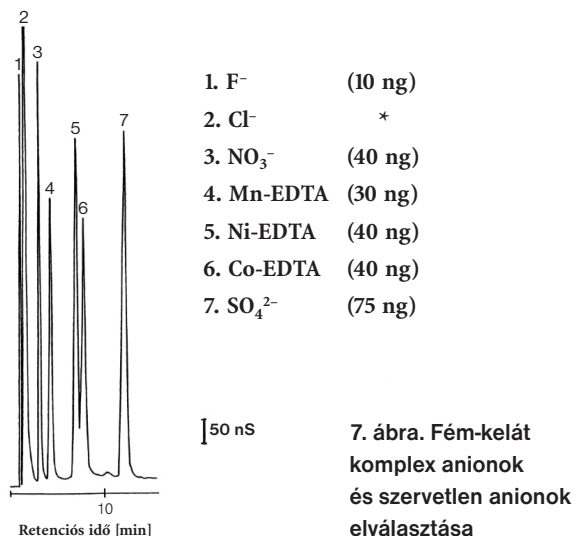


6. ábra. Alkilaminok elválasztása dipoláris ioncserével

Fém-kelát komplex anionok elválasztása és retenciósi elmélete

Kompleképző ligandumok, anionok, kationok szimultán analízise

A fém-ligandum komplexek kialakítása és kölcsönhatásai szelektív HPLC-elválasztásokra adnak lehetőséget. Munkánk során fém-kelát komplex anionok, kationok és ligandumaik ionkromatográfiai meghatározására nagy hatékonyságú módszert fejleszt-



7. ábra. Fém-kelát komplex anionok és szerves anionok elválasztása



tettünk ki peptidális anioncserélő oszlopon [20–22]. Felismer-tük, hogy ezzel a módszerrel a ligandumok mint anionok, a fé-ionok mint anionos komplexek szimultán kromatográfiás meg-határozására nyílik mód (7. ábra).

Környezetkémiai és bioanalitikai alkalmazások

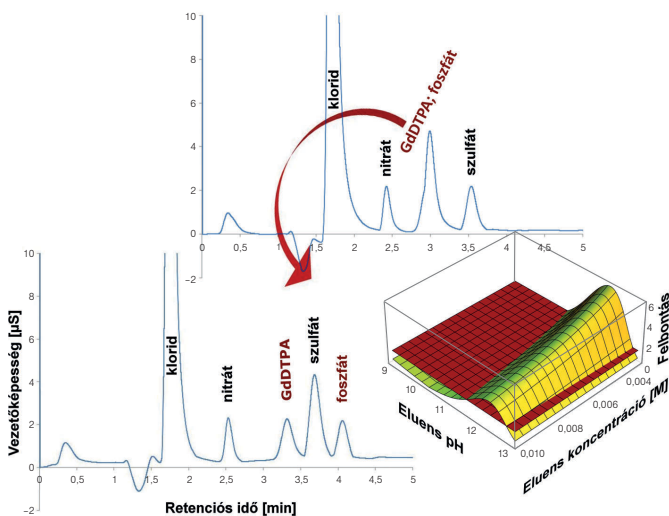
Néhány alábbi példa jellemzi alap kutatásaink alkalmazhatóságai-nak körét.

Az ivóvizek mikrobiológiai szennyeződéseinek hatékony keze-lése általában klórozó reakcióval történik. Ugyanakkor e folya-mat során a klór a vízben természetesen előforduló több szerves anyaggal is reakcióba lép, és ezáltal a klórtartalmú melléktermé-kek széles variációit, kombinációit adja. Hasonló melléktermé-keket adhat a vízben eredendően jelen levő nyommenyiségű bromid klórral történő oxidációjából származtatható bróm is. Ezek-nek a halogénezett szerves anyagoknak jelentős részét a haloecetsavak (HAAAs) képezik, amelyek már nagyon kis koncentrá-cióban is potenciálisan karcinogén és mutagén hatásúak (3. áb-ra). A laboratóriumunkban kifejlesztett fémkomplexek elválasztá-si módszere is különösen fontos komplex környezeti minták elemzésében. Ezek a komponensek vízdoldhatóak, amino-poli-karbonsavai, ill. átmeneti- és nehézfémekkel alkotott komplexei a talajt, a növényzetet és a természetes vizeket is szennyezhetik (7. ábra) [22]. Az alifás és aromás karbonsavak a természetben, ill. a feldolgozott termékekben általában szimultán vannak jelen [23]. Aromás karbonsavakkal egyidejű vizsgálatuk azonban ne-hézkés, de makrociklikus ionkromatográfiás eljárásunkkal ez si-keresen megoldható [16]. Légtéri minta alkalmazására példa szulfát és metánszulfonát kimutatása aeroszolban [24]. Az atom-erőművi primer és szekunder vízkörök $\mu\text{g/L}$ ionkoncentráció-szintű nyomelemzése biztonsági okokból kiemelt fontosságú, de e módszerekkel sikeresen kivitelezhető.

Az eljárások gyakorlatban alkalmazott paramétereinek opti-málására, ill. a várható mátrixhatások becslésére számítási eljá-rásokat, a folyadékfázis kiválasztásához eluens homológ sorokat dolgoztunk ki [25–29].

Laki Kálmán nemzetközi hírű biokémikus, aki a Szent-Györgyi Albert által alapított National Foundation for Cancer Research betesdai igazgatója volt, hívta fel figyelmünket a módszer lehe-tőségére vérplazma ionos komponenseinek bioanalitikai vizsgá-

8. ábra. Gd-kelát komplex anion (MRI-kontrasztágens) és kísérő anionok elválasztása. Felbontás optimalizálása



latában. A felvetést e szakterületen is igazoltuk [30]. A különbö-ző Gd(III)-tartalmú kelátok környezeti és biológiai mintákban történő vizsgálata egyre nagyobb figyelmet kap, tekintettel az esetlegesen szabad Gd(III) toxikus hatására. A Gd(III) fő forrását a Gd-kelátok MRI-kontrasztanyagként való nagyszámú felhasz-nálása jelenti. Módszerünk révén szelektív analízisre nyílik mód pl. szérumban és kórházi szennyvízben a nyommenyiségű Gd-komponensek és kísérőik kimutatására (8. ábra) [11,31]. A kifej-lesztett ioncserés módszerek, elvek további, széles körű alkalma-zásokban (pl. vízkémiai ionos nyomszennyezők, monoklonális antitestek vizsgálata) hasznosulhatnak, elsősorban a korszerű el-választási platformok (multidimenzió, mikrofluid ioncsere) tér-nyerése révén.



A kutatócsoport egy része az Analitikai Kémia Intézeti Tanszék laboratóriumában: Horváth Ádám, Horváth Krisztián, Horváth Szabolcs, Lukács Diána, Hajós Péter, Farsang Evelin

IRODALOM

- [1] P. Hajós, J. Inczedy, The Theory and Practice of Ion Exchange, Cambridge University (editors: D. Naden, M. Streat), Ellis Horwood Ltd., 1984, 450.
- [2] P. Hajós, J. Inczedy, J. Chromatogr. (1980) 201, 253.
- [3] G. Vigh, J. Inczedy, J. Chromatogr. (1974) 102, 381.
- [4] P. Hajós, Magy. Kém. Foly. (2017) 123, 8. (MTA 187. ünnepi közgyűlése, Kémiai Tudományok Osztálya tudományos ülése).
- [5] P. Hajós, O. Horváth, G. Révész, Advances in Chromatography, Marcel Dekker Inc., New York, 1998, 39, 311.
- [6] P. Hajós, in Reviews on Analytical Chemistry. Società Chimica Italiana, FECS, EUROANALYSIS IX, Bologna, ISSN: 0003-4592, 1997, 165.
- [7] P. Hajós, O. Horváth, G. Révész, J. Peear, C. Sarzanini, Progress in Ion Exchange, (Editors: A. Dyer, M.J. Hudson, P.A. Williams), The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1997, 144.
- [8] P. Hajós, O. Horváth, V. Denke, Anal. Chem., ACS (1995) 67, 434.
- [9] G. Fóti, G. Révész, P. Hajós, G. Pellaton, E. sz. Kováts, Anal. Chem., ACS (1996) 68, 2580.
- [10] P. Hajós, J. Chromatogr. A. (1997) 789, 141.
- [11] P. Hajós, D. Lukács, E. Farsang, K. Horváth, J. Chromatogr. Sci. (2016) 54(10), 1752.
- [12] P. Hajós, G. Révész, C. Sarzanini, G. Sacchero, E. Mentasti, J. Chromatogr. (1993) 640, 15.
- [13] J. Madden, P. R. Haddad, P. Hajós, TrAC-Trend Anal. Chem. (1996) 15(10), 531.
- [14] P. Hajós, J. Inczedy, Hung. Patent No. 196719 (1989). Internat. Classification: B01J41/12; C08J7/14.
- [15] M. Bruzzoniti, R. R. D. Carlo, K. Horváth, D. Perrachon, A. PELLE, R. Tófalvi, C. Sarzanini, P. Hajós, J. Chromatogr. A. (2008) 1187, 188.
- [16] D. Lukács, K. Horváth, P. Hajós, J. Chromatogr. A. (2020) 1621, 461066.
- [17] M. C. Bruzzoniti, P. Hajós, K. Horváth, C. Sarzanini, Acta Chim. Slov., (2007) 54, 14.
- [18] P. Hajós, E. Szikszay, J. Chromatogr. A. (2001) 920, 23.
- [19] P. Hajós, K. Horváth, R. Conca, C. Sarzanini, Chromatographia (2002) 56, 103.
- [20] P. Hajós, G. Révész, O. Horváth, J. Peear, C. Sarzanini, J. Chromatogr. Sci. (1996) 34, 291.
- [21] P. Hajós, J. Chromatogr. (2002) 955, 1.
- [22] R. Tófalvi, K. Horváth, P. Hajós, J. Chromatogr. A (2013) 1272, 26.
- [23] P. Hajós, L. Nagy, J. Chromatogr. B (1998) 717, 27.
- [24] H. Lukács, A. Gelencsér, A. Hoffer, G. Kiss, K. Horváth, Z. Hartyáni, Atmos. Chem. Phys. (2009) 9, 231.
- [25] K. Horváth, M. Olajos, A. Felinger, P. Hajós, J. Chromatogr. A. (2008) 1189, 42.
- [26] P. Hajós, Annali di Chimica (Rome) (1997) 87, 167.
- [27] P. Hajós, G. Révész, J. Chromatogr. (1997) 771, 23.
- [28] P. Hajós, K. Horváth, J. Chromatogr. (2008) 1199, 101.
- [29] K. Horváth, P. Hajós, J. Chromatogr. A (2006) 1104, 75.
- [30] P. Hajós, A. Kener, M. Horváth, Clinical Chemistry (1987) 33(4), 617.
- [31] P. Hajós, D. Lukács, K. Horváth, 7th European Bioanalysis Forum, Barcelona, 2014.