Hergert Tamás[1], Kánya Nándor[1], Kormos Péter[1], Dormán György[2], Bajcsi Áron[1], Juhász Levente[1], Török Viktor[1], Gilmore Szilvia[1], Darvas Ferenc[1]

[1] ThalesNano Nanotechnológia Zrt. [2] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem | tamas.hergert@thalesnano.com | ferenc.darvas@thalesnano.com

Az áramlásos kémia növekvő jelentősége és digitalizációja, magyar hozzájárulások

Mi az áramlásos kémia és miért várható gyors növekedése a mesterséges intelligencia (MI) korában?

Az áramlásos kémia (ÁK) ma már sok laboratóriumban használatos szerves kémiai reakciók megvalósítására, és az egyetemek honlapja szerint számos magyar egyetemen része a kémiai oktatásnak [1]. Lombik használata helyett az ÁK alkalmazása során a reagenseket szabályozott térfogatárammal, folyamatosan juttatják egy néhány mm átmérőjű csőreaktorba, majd a reakcióelegy a reaktoron áthaladva termékáramként távozik. Megvalósítása kereskedelmi forgalomban lévő készülékekkel történhet [2], de saját laboratóriumban összerakott komplex berendezések áramlásos kémiai alkalmazására is van példa [3].

Az ÁK-nak számos előnye és hátránya van a szakaszos üzemű reaktorhoz képest. A reakcióidő az ÁK-nál a szakaszos reaktorhoz képest gyakran nagyságrenddel rövidebb, a reaktor nagy felület/térfogat aránya pedig kedvez a hatékony anyagátadásnak, a hőátadásnak és a pontos hőmérséklet-szabályozásnak is. A reaktorok a szokásos laboratóriumi eszközöknél általában sokkal nagyobb nyomáson és tágabb hőmérsékleti tartományban képesek működni, gyakran szabványosított heterogén katalizátorok felhasználásával. Hátrányuk azonban az, hogy dugulásra hajlamosak, alkalmazásuk a szokásos szerves kémiai ismereteken gyakran jóval túlmutató társszakmák (áramlástan, hidrodinamika stb.) ismeretanyagát követeli meg. A készülékek viszonylag magas ára és karbantartási költsége is gyakran akadályozó tényező. Mindezzel együtt az ÁK egyre inkább teret nyer a veszélyes anyagok gyors, exoterm szintézisénél, továbbá ott, ahol a reakciók gyors méretnövelésére vagy éppen a gyártási költség csökkentésére van szükség.

Az utóbbi években azonban az ÁK „verhetetlennek” tűnő előnyre tett szert a hagyományos, szakaszos üzemmódú eszközökre építő szintetikus kémiával szemben: ez pedig a természetes befogadóképesség a manapság „digitalizációnak” nevezett irányzatok iránt.

A –80 °C és +1000 °C fok között működő, adott esetben 300 bar nyomást biztosító áramlásos reaktorok biztonságos használata elképzelhetetlen a készüléken belüli fejlett automatika nélkül. A beépített automatika viszont a szakaszos üzemmódú berendezéseknél lényegesen egyszerűbben csatlakoztatható optimálást, önoptimálást, távirányítást, robotokkal történő összekapcsolást és hasonló, a digitalizáció körébe eső műveleteket megvalósító szoftverekhez [4–5].

Az MI terjedése és az MI-vel kombinált kemoinformatikai számítógépes rendszerek gyors fejlődése indokolttá teszi, hogy a magyar kémikusok szélesebb rétege is tájékozódjon a digitalizáció egyre fontosabb szerepéről az áramlásos kémiában, rámutatva az MI-vel segített ÁK néhány érdekes lehetőségére. Jelen közlemény bemutatja az ÁK hazai fejlődésének fontosabb állomásait és a nemzetközi érdeklődést kiváltó magyar eredményeket is.

Epizódok az áramlásos kémia magyarországi történetéből

Az áramlásos kémiát megalapozó mikrofluidikának Magyarországon hosszú múltja van. Magának az áramlásos kémiának az alapjait azonban privát kezdeményezés, hazai és külföldi egyetemi kollaboráció együttesen teremtette meg a 2000-es évek elején [6]. A terület korai magyar nyelvű összefoglalását Hermecz István és munkatársai közölték 2011-ben [7].

A budapesti ThalesNano Zrt. (THS) H-Cube® hidrogénező készüléke bizonyítottan az első példa volt a jelentős mértékben automatizált, kis méretű, a laborfülkében elhelyezhető, nagy nyomáson és magas hőmérsékleten is működő, patronokba zárt heterogén katalizátorokat alkalmazó hidrogénező reaktorra [8]. A H-Cube® és a belőle kifejlesztett készülékek a sikeres nemzetközi bemutatkozást követően széles körben elterjedtek és számos innovációs díjat nyertek az Egyesült Államokban (R&D 100 Award, 2005, 2019, 2021) és idehaza (Ipari Innovációs Díj, 2005). A THS kifejlesztett egy komplett reaktorcsaládot, amely homogén és heterogén fázisú reakciók megvalósítására alkalmas és a szokásos laboratóriumi paraméterteret (nyomás, hőmérséklet) jelentősen kiterjesztette, ezzel lehetővé téve szelektív reakciók megvalósítását és nanorészecskék áramlásos előállítását [9–12]. Ez utóbbi világszerte újdonságnak számított.

Az áramlásos kémia széles körű hazai elterjesztésében nagy szerepet játszottak a hazai egyetemek. A THS sikeres kutatási

együttműködést alakított ki a Szegedi Tudományegyetemmel (SZTE), a Pannon Egyetemmel és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemmel (BME). A cél egyrészt az áramlásos kémia gyakorlati oktatásba való bevonása, másrészt a helyi, egyedi kémiai tudás alkalmazásával új, innovatív alkalmazások létrehozása és az áramlásos kémia széles körű alkalmazhatóságának demonstrálása volt.

A szegedi iskola Fülöp Ferenc professzor vezetésével, Mándity István, Ötvös Sándor, majd Orsy György munkái révén számos reakcióra kiterjesztette az áramlásos kémia alkalmazását. Nagy jelentőségű az áramlásos, nagy izotóptisztaságú deuterálás [13] és az áramlásos szilárd fázisú peptidszintézis [14].

A THS munkatársai a Pannon Egyetem kutatóival együtt új, aszimmetrikus áramlásos hidrogénezési eljárást dolgoztak ki [15], míg a BME kémikusaival enzimkatalizált szelektív áramlásos acilezést hajtottak végre [16].

A 2020-as évekre a THS és az egyetemek együttműködése révén hazánkban is teret nyert az áramlásos technológia gyógyszeripari alkalmazását előtérbe helyező „flow-to-pharma" koncepció. Erre példák, hogy a SZTE és az Egis kémikusai áramlásos szintézist dolgoztak ki a gyógyszer-intermedier oxindol közvetlen 3-alkilezésére [17], illetve a BME és a Richter együttműködése az áramlásos szemléletet számos gyógyszeripari folyamatfejlesztési problémára alkalmazta [18].

A hazai áramlásos kémia elterjedésében szerepet játszott, hogy a THS folyamatosan kereste az áramlásos kémia új alkalmazási irányait is. A fenntartható kémiát képviselte az a törekvés, hogy biomasszából potenciális üzemanyagokat lehessen előállítani áramlásos folyamatokkal. A BME és az ELTE kutatói a γ-valerolakton szintézisét valósították meg jó kitermeléssel [19].

Az elektrokémiai technológiák fejlesztése a hidrogén-előállítás mellett a szén-dioxid hasznosítható gáznemű termékekké történő átalakítására is kiterjedt. A SZTE Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszékével közös kutatás eredményei nemzetközi figyelmet kaptak [20]. Ezeknek a kutatásoknak a földi alkalmazások mellett az űrkutatásban is komoly jelentősége lehet [21].

A nagy fontosságú, komplex alkalmazási területek közül kiemelkedik az űrkémia [22], két jelentős megoldatlan problématerülettel a hosszú távú űrutazáshoz, illetőleg a Holdon/Marson történő tartózkodáshoz kapcsolódóan. Mindkettő az űrben történő kémiai szintézishez kapcsolódik és elsősorban áramlásos kémiát igényel. Az egyik az űrben lejátszódó polimerszintézis, amelyre meghibásodott szerkezeti anyagok helyben történő pótlása érdekében kerülhet sor [21], a másik az űrben megváltozott gyógyszerstabilitás és gyógyszer-metabolizmus következtében végső megoldásként az űrben történő gyógyszerszintézis megvalósítása [23].

Az áramlásos kémia fejlődésének és gyakorlati elterjedésének, illetve az akadémiai és ipari kutatók együttműködésének elősegítésére hazai és nemzetközi áramlásos kémikusok 2010-ben Svájcban létrehozták a nemzetközi Flow Chemistry Societyt és Budapesten a magyar Áramlásos Kémiai Tudományos Társaságot. Ez utóbbi 2011-ben – világelső áramlásos kémiai szakfolyóiratként – elindította a *Journal of Flow Chemistry*t az Akadémiai Kiadó/Kluwer (2018-tól a Springer) kiadásában. Magyar kezdeményezésre létrejött az IUPAC és a THS közös díja az áramlásos kémia területén elért kimagasló szakmai tevékenység elismerésére.

A Budapesten 2007 óta többször megtartott FROST áramlásos kémiai konferenciasorozat első rendezvényét az American Chemical Society magyar tagozata szervezte; majd a rendezvénysorozat szervezését átvette a Flow Chemistry Society és a magyar Áramlásos Kémiai Tudományos Társaság.

Ezek a konferenciák az oktatásban is fontos szerepet játszottak, a résztvevők a Flow Chemistry Academy keretében működés közben is megismerkedhettek a legkorszerűbb készülékekkel. A THS kifejezett küldetésének tekinti a gyakorlati oktatást, 2026-ban létrehozta a FlowEd® oktatási platformot, amelyet elsősorban akadémiai intézmények számára fejlesztettek.

Az oktatást szolgálja a kétkötetes, két kiadást megért *Flow Chemistry* tankönyv (De Gruyter, 2014, 2021, [24]), amelyet japán nyelvre is lefordítottak. A tankönyv a hagyományosan főként szakaszos reakciókra épülő vegyészképzést egészíti ki az áramlásos technológiák bemutatásával.

A platformkoncepció és hazai megvalósítása

Az áramlásos kémia fejlődésének jelenlegi iránya túlmutat az egyedi reakciók folyamatos üzemű megvalósításán. A technológia következő fejlődési szintjét az integrált, moduláris és digitálisan vezérelt reakcióplatformok jelentik, melyekben a reagensadagolás, a reakció, a gázkezelés, a nyomás- és hőmérséklet-szabályozás, a valós idejű analitika, valamint az adatfeldolgozás és folyamatirányítás egységes technológiai rendszerben kapcsolódik össze. A fejlődés ezért egyre kevésbé írható le pusztán új reaktortípusok megjelenésével; sokkal inkább a részben autonóm platformok felé történő elmozdulásról beszélhetünk.

A platformkoncepció lényegi eleme a modularitás: az eszközök funkcionálisan elkülönülnek, ugyanakkor egységes rendszerbe szervezhetők. Ez lehetővé teszi, hogy az adott szintetikus feladathoz ne egy rögzített berendezést, hanem megfelelő modulokból összeállított technológiai konfigurációt alkalmazzunk. A szakirodalomban ennek megfelelően már fotokémiai, elektrokémiai, többfázisú és 3D nyomtatással előállított reaktorok mellett az automatizálás és a reakciót követő feldolgozás integrációja is megjelent.

A klasszikus laboratóriumi munkafolyamatban a reakció végrehajtása és analitikai értékelése időben elkülönül. Automatizált áramlásos platformokban ezzel szemben ez a két lépés alig különül el, és így az analitikai információ közvetlenül a folyamatirányítás részévé tehető. Az inline vagy online spektroszkópiai, illetve kromatográfiás módszerekkel folyamatos vagy nagy gyakoriságú információ szerezhető a reaktorból kilépő anyagáram összetételéről. Ebben az architektúrában az analitikai eredmény már nem pusztán a kísérlet utólagos értékelését szolgálja, hanem nagy hatékonysággal közvetlen bemeneti adatként használható a folyamatparaméterek módosításához.

Az integrált analitika következő lépcsőjeként az önoptimalizáló reakcióplatform célja már nem kizárólag egy előre meghatározott reakció reprodukálható végrehajtása, hanem az optimális reakciókörülmények autonóm vagy részben autonóm meghatározása. Az automatizált platform végrehajtja a kijelölt kísérletet, megvárja az állandósult állapot kialakulását, analitikai adatot gyűjt, majd az eredményt továbbítja az optimalizáló algoritmusnak, mely végül kiválasztja a következő kísérleti pontot. A ciklus mindaddig ismételhető, amíg a választott célfüggvény – például konverzió, szelektivitás, hozam, téridő-hozam vagy ezek kombinációja – alapján teljesül az előre meghatározott optimalizálási vagy leállítási feltétel, melynek eredményeként „önoptimalizáló laboratórium" kialakulásáról beszélhetünk.

A platformszemlélet második meghatározó területe a méretnövelés. A hagyományos szakaszos technológiában a laboratóriumi folyamat termelési méretre történő átvitele a reaktortérfogat

növelését jelenti, mely esetben azonban megváltozhatnak a hő- és anyagátadási viszonyok, a keveredés és a lokális koncentrációviszonyok, ezért a laboratóriumban meghatározott reakcióparaméterek nem feltétlenül vihetők át változtatás nélkül. Az áramlásos technológia alternatív lehetőséget biztosít, mivel a termelt mennyiség növelhető a működési idő meghosszabbításával, illetve több reaktor párhuzamos működtetésével. A „numbering-up", illetve „scale-out" megközelítésben az optimalizált reakcióteret nem egyetlen lényegesen nagyobb reaktorban reprodukáljuk, hanem több azonos vagy hasonló karakterisztikájú reakciómodult működtetünk párhuzamosan, amivel csökkenthető a klasszikus méretnövelési újraoptimalizálás igénye.

A scale-out koncepció továbbfejlesztése a reaktorflotta, melyben több önálló áramlásos modul működik közös folyamatirányítási rendszer alatt. A flotta nem egyszerűen párhuzamos reaktorokat jelent. Lényeges eleme a közös hardver- és szoftverarchitektúra, mely képes az egyes modulok konfigurálására, terheléselosztására, monitorozására és adatainak egységes kezelésére. A reaktorok párhuzamos kapcsolása elsősorban a kapacitás növelését, míg soros kapcsolásuk egymást követő reakciólépések integrálását teszi lehetővé. A kettő kombinációjával olyan mátrixszerű technológiai struktúra alakítható ki, melyben egyes modulok különböző reakciólépéseket végeznek, miközben az adott lépés kapacitása több párhuzamos egységgel növelhető.

A hazai megvalósítás szempontjából a THS fejlődése jól példázza az egyedi reakcióberendezéstől a platformszemlélet felé vezető technológiai utat. A H-Cube® eredeti konstrukciójában már több olyan funkció integráltan jelent meg, mely a későbbi platformok alapelvévé vált: a hidrogén helyben történő előállítása, a szabályozott folyadékáram, a nyomás alatti reakció és a szilárd fázisú katalizátor egyetlen kompakt rendszerben működik. A vállalat későbbi fejlesztései ezt az eredetileg hidrogénezésre kialakított technológiai teret fokozatosan szélesítették az önálló hidrogénellátás, az általános célú flow-reaktorok, a fotokémia és a magas nyomáson végzett gáz–folyadék vagy gáz–gáz reakciók irányába.

A fentiekből látható, hogy a platformok egymásba épülő, többszintű rendszereket alkothatnak. Egy-egy önálló készülék is tartalmazhat kisebb, különálló platformokat, amelyek például a vezérlést, a kommunikációt vagy a vészhelyzeti eljárásokat vezénylik. Maguk a készülékek pedig a korábban bemutatott, részben autonóm áramlásos kémiai platformokat képezik. Felmerül tehát a kérdés: léteznek-e olyan magasabb szintű, átfogó platformok, amelyekbe az áramlásos kémiai platformok is integrálhatók? Igen, legalább három ilyen terület azonosítható:

Gyógyszeripari platformok. A gyógyszeripari kutatásban a nagy múltra visszatekintő kemometriát több kutatócsoport ötvözi mesterséges intelligenciával. A számos tudományos közlemény között találhatók olyan munkák, amelyek az MI alkalmazását komplex kémiai szintézisplatformok koordinálására is kiterjesztik [25]. A gyógyszerfejlesztés későbbi fázisaiban és a gyógyszergyártásban nagy jelentőségű méretnövelés újabban egyre nagyobb hangsúlyt helyez a gyors fejlesztést biztosító áramlásos kémiai platformok integrálására, a helyi szuperplatformokba. A gyógyszergyártásban pedig hosszabb ideje alkalmaznak részben vagy teljesen automatizált szuperplatformokat, amelyekbe jól illeszthetők a többek között Magyarországon, a THS által fejlesztett áramlásos kémiai platformok is.

Nagyipari kémiai és analitikai platformok. A nagyipari kémia számos meghatározó szereplőjének hosszú távú célja a komplex kémiai rendszerek teljes automatizálása, az emberi beavatkozás szükségességének minimálisra csökkentése. Közülük különösen előrehaladottak a komplex analitikai platformokat fejlesztő és forgalmazó nagyvállalatok. Rendszereikben az automatikus vegyszeradagolás már régóta megoldott, analitikai eszköztáruk pedig folyamatosan bővül, azonban sok esetben még hiányzik a rendszerükből a jól automatizálható, mesterséges intelligenciával vezérelhető áramlásos kémiai technológia. Ennek integrálása fontos lépést jelenthet a valóban autonóm kémiai szuperplatformok megvalósítása felé.

A vezető mesterségesintelligencia-vállalatok saját platformjai. A komplex kémiai rendszerek teljes automatizálása a világ vezető mesterségesintelligencia-vállalatainak érdeklődését is felkeltette. Ennek hátterében egyrészt a rendkívüli technológiai kihívás, másrészt a jövőben várható jelentős üzleti és ipari alkalmazási lehetőségek állnak. Bár ezen a területen eddig még nem születtek igazán átütő eredmények, a jelenleg legnagyobb MI-vállalatok közvetlen hozzáférése egy fejlett áramlásos kémiai platformhoz komoly versenyelőnyt jelenthet. Mindez valószínűsíti, hogy ezek a vállalatok a jövőben egyre meghatározóbb szerepet játszanak a teljesen automatizált, mesterséges intelligenciával vezérelt kémiai szuperplatformok fejlesztésében [21, 23].

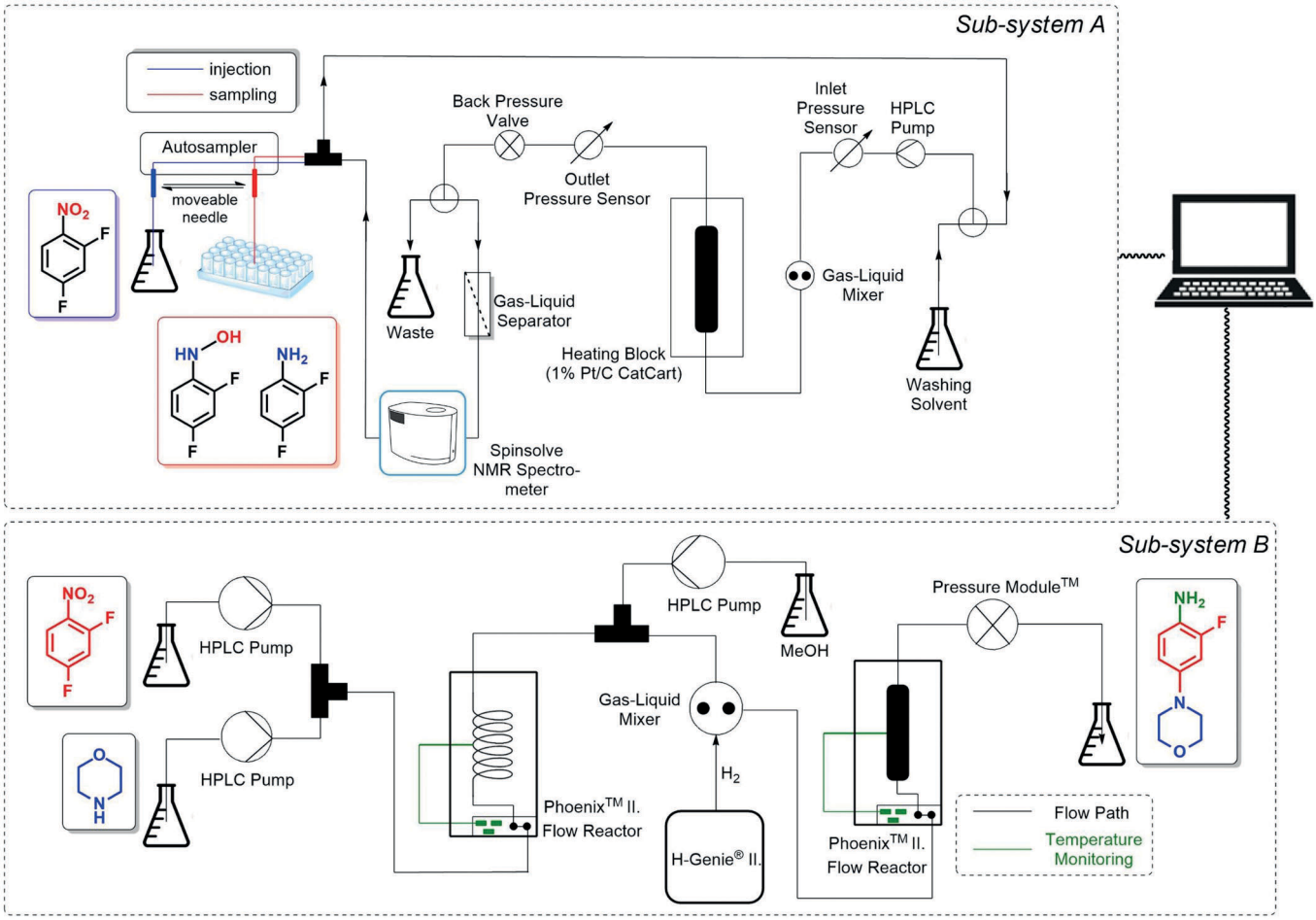
Konkrét példa egy platformalapú rendszer bemutatására

A fentiekben ismertetett platformkoncepciót a THS budapesti laboratóriumában a gyakorlatban is megvalósították, igazolva annak alkalmazhatóságát. A kísérlet részletei és eredményei a vállalat honlapján közzétett alkalmazástechnikai leírásban (application note) érhetők el [26]. Az eredményeket emellett a 2025-ben Malagában megrendezett Flow Chemistry Europe konferencián is bemutatták.

A kifejlesztett platform célja egy többlépéses szintézis méretnövelésének megvalósítása úgy, hogy a reakciókörülmények optimalizálása a termelési folyamattal párhuzamosan is elvégezhető legyen. Ennek érdekében a rendszer két, egymással összehangolt alrendszerből épül fel. A kisebb léptékű, reakcióoptimalizálásra szolgáló alrendszerbe integrált, áramlás közbeni (inline) analitikai egység lehetővé teszi a reakciók nyomon követését és az optimális paraméterek gyors meghatározását. Az így nyert információk közvetlenül felhasználhatók a nagyobb léptékű szintézist végző alrendszer működési körülményeinek módosítására, akár a gyártás megszakítása nélkül. A koncepció gyakorlati bemutatására egy linezolidanalóg kulcsfontosságú intermedierjének szintézisét választották modellreakcióként.

Az integrált analitika és a léptéknövelés két kapcsolódó megvalósítását az **1. ábra** szemlélteti: az „A alrendszer" fluorozott nitroaromás vegyület hidrogénezésének követését, a „B alrendszer" pedig aromás nukleofil szubsztitúció és hidrogénezés soros összekapcsolását mutatja be.

A kis léptékű kísérleti rendszer kialakításának célja a reakciókörülmények gyors, automatizált optimalizálása volt: a fluorozott nitrobenzol-származék adagolása automatikusan történt, az áramlásos reaktor működési paramétereit programozottan állították be, a reakciót követően a felesleges gázt elválasztották a folyadékfázistól, majd a reakcióelegyet inline ^{19}F-NMR-spektroszkópiával követték. Mindössze 10 különböző paraméterkombináció vizsgálata elegendő volt a teljes konverzió és szelektivitás eléréséhez; egy kísérleti ciklus az analitikai vizsgálattal együtt 10



1. ábra. Az analitikával összekapcsolt hidrogénezés [A] és a soros reakciómodulokból álló rendszer [B] vázlata

percet vett igénybe, ciklusonként 150 mg terméket szolgáltatva, ami 0,9 g/h termelékenységnek felelt meg.

A méretnövelési kísérletekben a reagenseket két pumpával adagolták és keverték össze, majd az első, csőreaktorral felszerelt Phoenix-rendszerben aromás nukleofil szubsztitúciót (S_NAr) hajtottak végre. A nyers reakcióelegyet metanollal 0,5 M koncentrációra hígították, in situ előállított hidrogénnel keverték, majd egy második, félcolos, 10%-os Pd/C katalizátort tartalmazó oszloppal felszerelt Phoenix-reaktorba vezették. A méretnövelés optimalizálásához ebben az esetben is mindössze 10 kísérletre volt szükség; a tizedik kísérletre kvantitatív konverziót értek el, miközben egy 10 perces ciklusban 10 g termék előállítása vált lehetővé. Ez a kis léptékű, 150 mg/10 perc kiindulási értékhez képest mintegy 67-szeres termelékenységnövekedést jelentett. A nagyobb léptékű konfiguráció folyamatos, 24 órás működésére extrapolálva a termelékenység 1,44 kg/nap, tíz párhuzamosan működtetett rendszerből álló reaktorflotta esetén pedig elméletileg 14,4 kg/nap lehet.

Az eddigiekből egyértelműen kirajzolódik, hogy az áramlásos kémia digitalizációja a jövőben is folytatódik, várhatóan egyre gyorsuló ütemben. Érdemes felidézni, hogy a mesterséges intelligencia kémiai alkalmazásának gyökerei Magyarországon egészen az 1970-es évek elejéig nyúlnak vissza, és az akkor megkezdett úttörő munka máig élő tudományos és technológiai hagyományt teremtett. Az akkoriban kibontakozó, logikai alapú mesterséges intelligencia a numerikus optimalizálási módszerekkel együtt ma is értékes kiegészítője lehet a nagy nyelvi modellekre épülő MI-rendszereknek. E technológiák együttes alkalmazása a jövőben meghatározó szerepet játszhat az áramlásos kémiai platformok irányításában és optimalizálásában, további versenyelőnyt jelentve a hazai ipar és kutatás számára.

Összefoglalás és perspektívák

Az áramlásos kémia az elmúlt évtizedekben a speciális mikroreaktoros megoldásoktól a széles körben alkalmazható, moduláris és digitálisan vezérelt technológiai platformok irányába fejlődött tovább. Elterjedését a kedvező hő- és anyagátadás, a pontos szabályozhatóság, a nagyobb biztonság, a reprodukálhatóság és a rugalmas méretnövelés egyaránt segítette.

A következő fejlődési szintet várhatóan egy-egy új reaktortípus megjelenése mellett az integrált és részben autonóm működésű platformok térnyerése jelenti majd.

Ígéretes fejlesztési irány a platformok kiegészítése a nagy nyelvi modellekkel (large language models, LLM-ek) támogatott autonóm ágensekkel. Ezek nyelvi modellek és külső eszközök segítségével terveznek és hajtanak végre feladatokat, majd az eredmények alapján módosítják további lépéseiket [4]. Automatizált kémiai platformokhoz kapcsolva a kísérlettervezéstől az eredmények értékeléséig több munkafázist támogathatnak. Megnövekedett számítástechnikai erőforrásigényeiket a jövőben kvantumszámítógépek biztosíthatják [5].

A reaktorflották és a párhuzamos működtetés ezzel egyidejűleg a termelékenység növelésére kínálnak új lehetőséget. Ebben a szemléletben az áramlásos kémia már nem csupán reaktortechnológia, hanem a digitalizált, adatvezérelt és egyre önállóbban működő kémiai kutatás és gyártás fizikai alapjává válhat.

Rendszertechnikai és vezérlési szempontból nagy kihívás az áramlásos és szakaszos reaktorrendszereket tartalmazó hibrid rendszerek egységes platformba integrálása, továbbá a reakciókinetika gyors és megbízható feltérképezése.

Összefoglalva: a hazai áramlásos kémia képviselői az egyedi és innovatív műszerfejlesztések, a hazai és nemzetközi együttműködések kialakítása, valamint az oktatás és a szakterület nemzetközi szintű szervezése révén jelentős szerepet játszottak az áramlásos kémia alapjainak megteremtésében. Munkásságuk hozzájárult ahhoz, hogy az analitika, a digitalizáció, így a robotizáció és a mesterséges intelligencia integrálásával az áramlásos kémia a kémia jövőjének egyik legfontosabb irányzatává és meghatározó alappillérévé váljon.

IRODALOM

[1] Szegedi Tudományegyetem (www.u-szeged.hu), ELTE (www.elte.hu), Pannon Egyetem (www.uni-pannon.hu), Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (www.bme.hu), Semmelweis Egyetem (www.semmelweis.hu).
[2] Fekete, M., Glasnov, T. (átdolg.) Hii, K.K., Deadman, B.J. Technology overview/Overview of the devices. Flow Chemistry. Fundamentals. Szerk: Darvas, F., Dormán, Gy., Hessel, V., Ley, S.V. de Gruyter, Berlin, 2021, 3. fejezet, 87–144, DOI: 10.1515/9783110693676-003
[3] a) Bonciolini, S.; Pulcinella, A.; Noël, T., J. Am. Chem. Soc. (2025) 147, 28523–28545. b) Pilon, S., Savino, E., Bayley, O.M., Vanzella, M., Claros, M., Siasiaridis, P., Liu, J., Lukas, F., Damian, M., Tseliou, V., Intini, N., Slattery, A., San Jose Orduna, J., den Hartog, T., Peters, R., Gargano, A., Mutti, F., Noël, T., ChemRxiv (2025) DOI: 10.26434/chemrxiv-2025-73xqf
[4] Ramos, M.C., Collison, C.J., White, A.D., Chem. Sci. (2025) 16(6), 2514–2572, doi.org/10.1039/d4sc03921a
[5] Weidman, J.D., Sajjan, M., Mikolas, C., Stewart, Z.J., Pollanen, J., Kais, S., Wilson, A.K., (2024) Cell Reports Physical Science Perspective (2024) 5(9), szeptember 18.
[6] Kiss, T. Magyar Kémikusok Lapja (2009) 64(10), 312–315.
[7] Vörös A., Baán Z., Hermecz I., Mizsey P., Finta Z., Magyar Kémiai Folyóirat (2011) 117, 22.
[8] Jones, R.V., Gödörházy, L., Szalay, D., Gerencsér, J., Dormán, Gy., Ürge, L., Darvas, F., QSAR Comb. Sci., (2005) 24, 722.
[9] Csajági Cs., Borcsek, B., Niesz, K., Kovács, I., Székelyhidi, Z., Bajkó, Z., Ürge L., Darvas, F., Org. Lett. (2008) 17, 1589.
[10] Lengyel, L.Cs., Nagy, T.Z., Sipos, G., Jones, R.V., Dormán, Gy., Ürge, L., Darvas, F., Tetrahedron Lett. (2012) 53, 738.
[11] Lengyel, L.Cs., Sipos, G., Sipőcz, T., Vágó, T., Dormán, Gy., Gerencsér, J., Makara, G., Darvas, F., Org. Process Res. Dev. (2015) 19, 399.
[12] Angi, R., Solymosi, T., Ötvös, Zs., Ordasi, B., Glavinas, H., Filipcsei, G., Heltovics, G., Darvas, F., Eur. J. Pharm. Biopharm. (2014) 86, 361.
[13] Mándity, I.M., Martinek, T.A., Darvas, F., Fülöp, F., Tetrahedron Lett. (2009) 50 (30), 4372.
[14] Mándity, I.M.; Olasz, B.; Ötvös, S.B.; Fülöp, F., ChemSusChem (2014) 7, 3172.
[15] Balogh, S., Farkas, G., Madarasz, J., Szöllősy, Á., Kovács, J., Darvas, F., Ürge, L., Bakos, J., Green Chem. (2012) 14, 1146.
[16] Csajági, Cs., Szatzker, G., Tőke, E.R., Ürge, L., Darvas, F., Poppe, L., Tetrahedron: Asym. (2008) 19, 237.
[17] Mándoki, A., Orsy, G., Pászti, Z., Porcs-Makkay, M., Bogdán, D., Simig, G., Mándity, I.M., Volk, B., Synthesis (2023) 55, 4025.
[18] Fülöp, Z., Szemesi, P., Bana, P., Éles, J., Greiner, I., React. Chem. Eng. (2020) 5(9), 1527.
[19] Tukacs, J. M., Jones, R.V., Darvas, F., Dibó, G., Lezsák, G., Mika, L.T., RSC Adv. (2013) 37, 16283.
[20] Endrődi, B., Bencsik, G., Darvas, F., Jones, V.R., Rajeshwar, K., Janáky, Cs., Prog. Energy Combust. Sci. (2017) 62, 133.
[21] Darvas, F., Mezey, P.G., Dormán, Gy, Buchholcz, B., Janáky, Cs, Jones, R.V., Sipos, G., Peidl, T., Mezőhegyi, G., In-Space Manufacturing and Resources: Earth and Planetary Exploration Applications. Chemistry-Related Innovations in Space, Benefits of Flow Chemistry. Wiley, Szerk. Hessel, V., Stoudemire, J., Miyamoto, H., Fisk, I.D., 2022, 6. fejezet, 111–140. https://doi.org/10.1002/9783527830909.ch6
[22] Jones, R.V., Darvas, F., Janáky, Cs., Nature Rev. Chem. (2017) 1, 0055.
[23] Dormán, Gy., Buchholcz, B., Puskás, I., Szabó, P., Varga, E., Szente, L., Keserű, Gy. M., Darvas, F., Nature Scientific Reports (2025) 15:4182, DOI: 10.1038/s41598-024-81428-5
[24] Darvas, F., Dormán, Gy., Hessel, V., Ley, S.V. szerk., Flow Chemistry. Fundamentals/Applications (Vol.1., Vol.2). de Gruyter, Berlin, 2021. ISBN 978-3-11-069359-1
[25] Darvas, F., Marokházi, S., Kormos, P., Kulkarni, G., Kalász, H., Papp, Á., in Databases and High-Throughput Screening Testing During Drug Design and Development (szerk. P. W. Erhardt). IUPAC-Blackwell Science, Oxford, 1999, 237–270.
[26] a) https://thalesnano.com/wp-content/uploads/2024/07/ThalesNano19FNMRMagritekEngBroschureA44Pages20240613Web.pdf b) https://thalesnano.com/wp-content/uploads/2023/05/Phoenix-H-Genie-application-note-Kilogram-scale-synthesis-of-a-Linezolid-analogue.pdf

Agárdi Tamás

AFV Kft.

Biztonsági jelek: jó és rossz gyakorlatok

A biztonsági jelzés nem attól látja el a feladatát, hogy valaki kipipálta: „tábla kihelyezve”. A jó szándék és egy tekercs ragasztószalag még nem feltétlenül garantálja az észlelhetőséget és a tartósságot. Az alábbi példák azt mutatják meg, hol csúszhat félre a kivitelezés, és hogyan lehet szakszerű a megoldás. Elsőként nézzünk körül egy fogorvosi rendelőben, ahol ezúttal a biztonsági jelzés szorul kezelésre.



A jelzést a fogorvosi rendelő várójában helyezték el, és vélhetően a saját szakmájában kétségkívül nagy tapasztalatú aszszisztensre bízták a kivitelezését és kihelyezését. Mérete kb. 10×10 cm, anyaga papír, melyre irodai tintasugaras nyomtatóval vitték fel a jelzést. A felhelyezést átlátszó ragasztószalaggal oldották meg. A jelzés ebben a formában nem tisztítható, nem vízálló és mindössze csak a színösszeállításában felel meg az ISO 7010 szabványnak.

A helyes grafikai kivitelen nemcsak az idevágó figyelmeztető jel ISO 7010 szerint piktogramja kerül feltüntetésre, hanem tájékoztató szövegmezőben a figyelmeztetés oka, a veszély elkerülését szolgáló tiltó jel, valamint utasítást adó színkombinációban a helyes magatartás. A jelzés kivitele egészségügyi intézmény esetén a hátoldalon nyomtatott PETG-lemez, amely lehetővé teszi a fertőtlenítőszeres lemosást. A tábla felhelyezése a hátoldali öntapadó réteg segítségével könnyen kivitelezhető.



Egy másik példában egy építkezés bejáratához elhelyezett többfunkciós – úgynevezett összegző – biztonsági jelcsoportot látunk. A képen látható jelzés jó példája