

Zelený vodík: Výzkumný tým z VŠCHT hledá způsob, jak vrátet drahé materiály z elektrolyzérů zpět do oběhu

23.2.2026 - Jakub Drahonský | Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Zelený vodík je jedním z pilířů klimatické politiky EU, ale klíčová technologie jeho výroby - PEM (proton exchange membrane) elektrolyzéry - stojí na extrémně vzácném iridiu a problematických perfluorovaných polymerech. Projekt IRION, na kterém se podílí i tým z VŠCHT Praha vedený Karlem Bouzkem a Martinem Prokopem, hledá cestu, jak z vysloužilých elektrolyzérů „vytěžit“ drahé kovy i membrány a vrátit je zpět do oběhu. Nejde jen o laboratorní experiment: úspěšná recyklace může zásadně zlevnit výrobu zeleného vodíku, snížit množství nebezpečného odpadu a rozhodnout o tom, jestli evropská vodíková strategie zůstane na papíře, nebo se stane realitou. Více v rozhovoru s doktorem Prokopem.

Mohl byste prosím na úvod stručně představit, o čem projekt IRION je a jaký hlavní problém chce řešit v oblasti PEM elektrolyzérů?

Projekt IRION je zaměřený na velký problém spojený s likvidací a recyklací PEM elektrolyzérů vody, tedy zařízení používaných k výrobě zeleného vodíku. Tato zařízení mají velmi rychlý start, takže se dobře kombinují s obnovitelnými zdroji energie, a dnes už existují instalace v Evropě, Americe i Asii o výkonech v řádu MW. Výhodou PEM elektrolyzérů je vysoký výkon, relativně kompaktní rozměry a dobrá životnost, ale recyklace po skončení životnosti je složitá. PEM elektrolyzéry obsahují velké množství perfluorovaných sulfonovaných polymerů v membráně i v katalytických vrstvách drahých kovů - platinovým katalyzátorem na katodě a iridiovým na anodě. Při recyklaci je potřeba oddělit platinu i iridium, a zároveň zabránit degradaci perfluorovaných sulfonovaných polymerů během separace. Ty budou následně znovu recyklovány a použity pro výrobu nových membrán a ionomerů pro další elektrolyzéry.

V jakých souvislostech se projekt dotýká nejen průmyslu, ale i celé společnosti?

PEM elektrolýza vody je v současném energetickém schématu a ve vodíkových strategiích států EU zásadní technologií pro výrobu zeleného vodíku. V Evropě PEM elektrolyzéry vyrábí více firem - jako příklad lze uvést Nel nebo v Česku společnost Leancat Electrolyzers, která dodává škálovatelné jednotky až do výkonu 1 MW. Přesto zatím žádná firma nepřišla s efektivní strategií recyklace materiálů, které se v PEM elektrolyzérech používají. Jedna z možností je celý svazek elektrolyzéro rozemlít a chemicky zpracovat tak, aby se získala platina a iridium. Nicméně, perfluorované sulfonované polymery v těchto svazcích jsou klasifikované jako nebezpečný odpad. Nelze je jednoduše skládkovat, musí být podle evropských regulací ukládány v uzavřených nádobách na specializovaných uložistiích nebezpečného odpadu. To znamená další zátěž pro životní prostředí, logistiku i dodatečné náklady. Pokud se podaří vyvinout metody, které umožní recyklovat nejen drahé kovy, ale i tyto perfluorované materiály, sníží environmentální zátěž a zároveň se výrazně sníží cena nových jednotek - samotné membrány dnes mohou tvořit až zhruba čtvrtinu investičních nákladů PEM elektrolyzéro.

Jak dnes vypadá konec životnosti PEM elektrolyzéro a jaké recyklační přístupy se v praxi používají?

V současnosti se pro recyklaci drahých kovů používá hlavně mechanická dezintegrace – elektrolyzér se rozebere, svazek včetně membrány s katalytickými vrstvami se rozemele a výsledný materiál se pak louží v silných oxidativních roztocích při zvýšené teplotě. Po rozpuštění následuje rafinace a získání kovů. U samotných membrán je situace ještě komplikovanější – v průmyslu zatím neexistuje škálovatelná metoda recyklace perfluorovaných sulfonovaných polymerů, takže se s nimi nakládá v režimu nebezpečného odpadu.

Jaké recyklační přístupy testujete v IRIONu?

Projekt je rozdělený mezi několik partnerů, z nichž každý má vlastní výzkumnou doménu. Náš tým se soustředí na elektrochemickou část – vytváříme databázi standardů výkonu PEM elektrolyzérů a testujeme jednotlivé komponenty (membrány, katalyzátory, cely) z komerčních materiálů, abychom měli jasný standard. Následně budeme stejným způsobem charakterizovat materiály z recyklace a porovnávat výkon i dlouhodobou stabilitu recyklovaných materiálů s komerčními.

Čemu se v rámci projektu věnují vaši partneři?

Odepsané komponenty PEM elektrolyzérů dodává italský partner RINA. Recyklaci membrán a zpracování polymerů má na starosti španělský partner AIMPLAS ve spolupráci se slovinským partnerem NIC. Recyklaci a rafinaci kovů, zejména iridia, zajišťuje česká firma Safina; s ní pak úzce spolupracujeme na výrobě iridiového katalyzátoru, který následně společně charakterizujeme. Výrobu nových membrán s katalytickými vrstvami (CCM) z recyklovaných materiálů provádí Fraunhofer ENAS v Německu metodou inkoustového tisku. Tyto nové CCM pak charakterizujeme přímo v PEM elektrolyzérech, a to ve spolupráci s francouzskou firmou Saint-Gobain. Důraz je kladen na skutečnou průmyslovou aplikaci recyklovaných materiálů v nových funkčních elektrolyzérech.

Jaké jsou hlavní cíle projektu IRION a podle čeho na konci poznáte, že byl úspěšný?

Už v přihlášce projektu jsou definovány KPIs (Key Performance Indicators). Každý partner si v rámci svého pracovního balíčku stanoví několik (typicky tři až čtyři) takových parametrů a ty musí být do konce projektu splněny. Tyto cíle jsou nastavené poměrně ambiciózně. V našem případě je jedním z cílů připravit iridiový katalyzátor, který dosáhne **alespoň 90% aktivity ve srovnání s komerčním katalyzátorem**. Úspěch projektu definují konkrétní čísla – výkon, stabilita a ekonomická využitelnost recyklovaných materiálů v elektrolyzérů.

Jak se do projektu promítají environmentální a ekonomické analýzy?

Environmentální a ekonomické analýzy tvoří samostatný pracovní balíček, na kterém se podílejí všichni partneři. Tento balíček koordinuje kyperský partner STRATAGEM, který sbírá data od všech ostatních účastníků – technické parametry, provozní podmínky, experimentální data – a na základě nich a průzkumu trhu provede techno-ekonomickou analýzu recyklovaných PEM elektrolyzérů. Výsledkem má být popis finálního produktu – recyklovaného PEM elektrolyzérů – který může být nabízen na trhu jako ekonomicky a environmentálně smysluplná alternativa k dnešním zařízením.

Jakou roli v tom všem hraje VŠCHT Praha?

Naše skupina na VŠCHT je složená převážně z elektrochemiků a elektrochemických inženýrů a v rámci konsorcia jsme de facto jediný tým, který umí do detailu charakterizovat všechny materiály, které ostatní partneři připraví. Saint-Gobain sice také testuje PEM elektrolyzéry, ale zaměřuje se na charakterizaci hotových jednotek ve větším, poloprodučním či průmyslovém měřítku. My provádíme výzkum již od katalyzátorů, přes membrány až po celé články a menší svazky.

Odkud pramení zkušenosti vašeho týmu v oblasti PEM elektrolýzy?

PEM elektrolýze se na VŠCHT věnujeme už více než 15 let. Za tu dobu jsme řešili několik evropských projektů, řadu projektů TAČR, bilaterální granty GAČR apod. Historicky jsme se soustředili na stabilitu a aktivitu katalyzátorů, vliv provozních podmínek na membrány (jejich stabilitu a vodivost) a v posledních letech i na charakterizaci celých PEM elektrolýzérů a stavbu menších svazků do výkonu cca 1 kW. IRION tak navazuje na naši dlouhodobou expertízu v oblasti materiálů i elektrochemického inženýrství.

Jak konkrétně vypadají experimenty, které na VŠCHT v rámci IRIONu děláte - o konkrétně testujete, v jakých režimech a co přesně měříte?

Rozšířili jsme výrazně infrastrukturu, takže dnes pokrýváme celý řetězec od jednotlivých komponent až po celé články a malé svazky. Pro studium iridiových katalyzátorů používáme rotační diskovou elektrodu a řadu malých elektrochemických cel, kde testujeme jejich aktivitu. Pro membrány máme dvě speciální testovací jednotky, ve kterých měříme protonovou vodivost za různých podmínek - umíme ji měřit in situ s průtokem temperované vody i při průtoku zvlhčeného plynu.

V laboratořích máme pět testovacích stanic pro dlouhodobé zkoušky jednotlivých PEM elektrolýzérů, a ještě jednu stanici pro testování menších svazků. Sledujeme výkon, stabilitu, změny napětí, vývoj odporů a obecně degradační chování cel a svazků v čase.

Když porovnáte PEM elektrolýzéry z recyklovaných materiálů se standardními materiály, jaké rozdíly v chování očekáváte nebo už dokonce pozorujete?

V samotném projektu IRION zatím recyklované materiály k testování ještě nemáme, protože projekt teprve začal. Nicméně ve spolupráci s německými partnery jsme už studovali recyklované membránové materiály. Největším rozdílem je vnitřní struktura membrán. Membrána odlévaná z čerstvého ionomeru má jinou morfologii než membrána připravená extruzí, a u recyklovaných materiálů se navíc projevuje degradace ionomerů, které slouží jako prekurzory. To se odráží ve struktuře a vlastnostech finální membrány.

Recyklovaná membrána tak může mít horší mechanickou stabilitu, nižší vodivost i horší separační vlastnosti. V praxi je to zásadní problém, protože v elektrolýzérovi odděluje vodík a kyslík doslova jen tenká membrána o tloušťce přibližně 50 až 150 mikrometrů. Proto je potřeba prokázat, že i recyklovaný materiál splňuje bezpečnostní a provozní požadavky.

Jak obtížné je z experimentálních dat rozlišit, co dělá ionomer a co iridiový katalyzátor?

Teoreticky existují metody, jak odlišit vliv ionomeru a katalyzátoru na výkon elektrolýzérovi, ale je to analyticky náročné. Základem je testovat jednotlivé komponenty samostatně. U iridiového katalyzátoru můžeme měřit jeho elektrickou vodivost - například v kompresní cele pro prášky pomocí stejnosměrného proudu. Podobně lze připravit vzorek ionomeru a změřit jeho vodivost. Tím získáme odpor zvlášť pro katalyzátor i pro ionomer.

V celé PEM cele pak měříme celkové chování - využíváme jak DC, tak AC metody a z impedančních měření jsme schopni rozdělit jednotlivé příspěvky odporu (anoda, katoda, membrána). Na základě této analýzy lze dále separovat jednotlivé odporové příspěvky ionomeru a katalyzátoru na anodě. Celá analýza je ale složitá a vyžaduje hodně zkušeností s interpretací dat.

Jak velkou roli ve vaší práci hraje modelování - používáte modely spíše k návrhu experimentů, k interpretaci dat, nebo i k odhadu chování při škálování?

Matematické modelování používáme poměrně často, i když v projektu IRION není formálně vyčleněno jako samostatný balíček. Využíváme jednodušší modely pro určení kinetických parametrů katalyzátorů pro vývoj kyslíku a pokročilejší modely pro návrh optimální geometrie testovacích cel. Obecně lze říct, že modelování pomáhá jak při interpretaci experimentů, tak při intenzifikaci zařízení – můžeme například simulovat rozvod vody, chování systému při různých proudových hustotách, odvod kyslíku a transport vody ke katalytické vrstvě na anodě.

Jak funguje spolupráce mezi akademickými partnery a průmyslem v IRIONu - co typicky potřebují průmysloví partneři od vás a co vy od nich?

Projekt je koordinován španělským AIMPLAS, kyperský partner STRATAGEM se stará o projektový management, komunikaci navenek a koordinaci mezi partnery. Během roku probíhají velká osobní setkání všech partnerů a k tomu pravidelné online schůzky v rámci jednotlivých pracovních balíčků. V našem případě je to jednodušší v tom, že klíčoví partneři – Safina a Fraunhofer ENAS v Chemnitzu – jsou geograficky i historicky blízko, s oběma už máme delší spolupráci.

Průmysloví partneři od nás nejčastěji chtějí přesná data o materiálech a dlouhodobé degradační testy. Potřebují totiž doložit výkon a životnost materiálů v konkrétních číslech a hodinách provozu. My naopak potřebujeme od průmyslu přístup k materiálům, zejména těm recyklovaným, a často i detailní parametry těchto materiálů – a to jsou někdy citlivé informace, které firmy nerady sdílejí.

Jaká je vaše osobní role v projektu IRION - za co nesete největší odpovědnost?

Hlavním koordinátorem projektu za VŠCHT je profesor Bouzek. Na mě ale spadá veškerá experimentální činnost v rámci projektu IRION, koordinace zpráv a projektových výstupů. Vedou menší tým v rámci skupiny Technická elektrochemie na našem ústavu – aktuálně tři doktorandy, tři magisterské a dva bakalářské studenty. Ti primárně zajišťují charakterizační experimenty spojené s projektem.

Jak podle vás recyklace iridia a PFSA ovlivní ekonomiku a rozšíření PEM elektrolyzérů v horizontu 10-15 let? A jaké projekty by na IRION měly ideálně navázat?

Hodně záleží na tom, jak se v Evropě bude vyvíjet vodíková strategie. V Česku je současná vodíková strategie poměrně ambiciózní, i když uvidíme, zda ji vláda neupraví. Už teď existují dvě „vodíková údolí“ – na Ostravsku a na Ústecku – kde se uvažuje o větších aplikacích PEM elektrolyzérů. V Německu byla role vodíku v poslední době spíše umenšena, ale stále existuje mnoho aplikací, které PEM elektrolýzu a zelený vodík využívají.

Obecně význam recyklačních procesů poroste – v provozu je už dnes v EU přes 1 GW instalované kapacity PEM elektrolyzérů pro výrobu zeleného vodíku, přičemž životnost jednotlivých jednotek se obvykle pohybuje kolem 20–30 tisíc hodin, maximálně 50 tisíc hodin. Po skončení životnosti bude nutné nakoupit nové jednotky a zároveň nějak naložit se starými. Pokud se podaří zavést spolehlivý a kvalitní proces recyklace membrán a iridiového katalyzátoru, mohou se výrazně snížit investiční náklady. Firmy by pak například mohly nabízet dlouhodobé programy, kdy zákazník dostává nové (recyklované) jednotky a staré vrací k recyklaci.

Proč jsou evropské projekty významné?

Evropské projekty jsou podle mě mimořádně důležité, protože spojují velké množství partnerů a často je více než polovina z nich průmyslových. To nám umožňuje navazovat nové kontakty pro další projekty a zároveň nabízí velkou šanci pro studenty. Díky projektům se mohou dostat na stáže do firem, kde se technologie skutečně vyvíjí a provozuje. Sám jsem měl podobnou zkušenost během

doktorátu a považuji ji za velmi cennou.

Projekty propojují partnery napříč Evropou, se kterými bychom jinak spolupráci navázali těžko – například technologické centrum výzkumu polymerů AIMPLAS nebo výzkumný tým v Saint-Gobain. V našem případě nás do IRIONu přizval německý Fraunhofer ENAS, se kterým jsme předtím tři roky úspěšně spolupracovali na projektu zaměřeném na technologii výroby katalytických vrstev pro palivové články.

Jste kompletní tým nebo sháníte nové studenty?

Nové studenty hledáme průběžně – jak bakaláře, tak magistry i doktorandy. Všechna témata jsou navázaná na běžící projekty a snažíme se studenty zapojovat přímo do jejich řešení. Často provádějí měření, která jdou přímo do projektových výstupů a výzkumných zpráv. Doktorandi se účastní projektových schůzek, plánují výstupy a dostávají se do kontaktu s průmyslovými partnery. Mohou tak přímo vidět, jak technologie vypadá v praxi, co průmysl řeší a jakým směrem je potřeba výzkum posouvat. V neposlední řadě si také vytváří kontakty pro případné budoucí zaměstnání po doktorském studiu.

O zkušenosti z jakých oblastí máte zájem?

Naše PEM skupina je hodně prakticky zaměřená – jde o elektrochemické inženýrství, návrh a konstrukci menších jednotek a stavbu samotných PEM elektrolyzérů v laboratoři. Uvítali bychom i studenty se zaměřením na polymery, protože pracujeme s iontově výměnnými membránami, a také studenty z oblasti koroze, protože degradace iridiového katalyzátoru je v principu korozní proces.

<https://www.vscht.cz/popularizace/rozhovory/martin-prokop-irion-evropsky-projekt>