



Vysokoteplotní elektrolýza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze

Intenzivní využívání obnovitelných zdrojů energie přináší kromě nesporných pozitiv i nové výzvy. Výkyvy produkce elektrické energie, které jsou typické pro větrné či sluneční elektrárny, je třeba vyrovnávat, aby byla zachována stabilita distribuční sítě. Vodík představuje perspektivní způsob, jak nadbytečnou energii ukládat a následně rekuperovat či jinak efektivně využít.

► MARIE KOLMANOVÁ, VŠCHT PRAHA

Vodíková ekonomika

Nejlehčí a vysoce reaktivní plyn – vodík – není zdrojem energie, ale jejím nosičem. Může být vyráběn z různých zdrojů, přičemž stále domínuje produkce z fosilních paliv. Čistou metodu výroby vodíku představuje zejména elektrolýtický rozklad vody, kdy dochází k uvolnění kyslíku a vodíku za pomoci okamžitých přebytků elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Na elektrolýzu obecně dnes připadají zhruba 4 % světové produkce vodíku.

Vyrobený vodík může být využit různými způsoby, například spalováním v motoru či turbíně, metanizací, nebo ke zpětné přeměně na elektrickou energii v palivových článcích. Nižší uvedené schéma znázorňuje možnosti, které skýtá tzv. vodíková ekonomika. Masovému využívání vodíku jako nosného prvku energetické sítě doposud brání technické problémy i absence nezbytné infrastruktury. V posledních letech je však patrný posun jak ve výzkumu a vývoji vodíkových technologií, tak na poli strategicko-politickém.

Elektrolýza vody

Elektrolýza je v současné době považována za nejslibnější metodu výroby vodíku rozkladem vody, a to zejména díky vysoké efektivitě konverze, intenzitě a technologické jednoduchosti procesu v porovnání s alternativními způsoby (termochemickými procesy či fotokatalýzou). Zkoumány jsou především tři základní varianty tohoto procesu: nízkoteplotní alkalická elektrolýza s kapalným bazickým elektrolytem, která je již delší dobu komerčně provozována. Její výhodou je relativně nízká investiční náročnost a robustnost, nevýhodou pak nižší účinnost a flexibilita, proto nachází uplatnění především ve velkokapacitních stacionárních systémech.

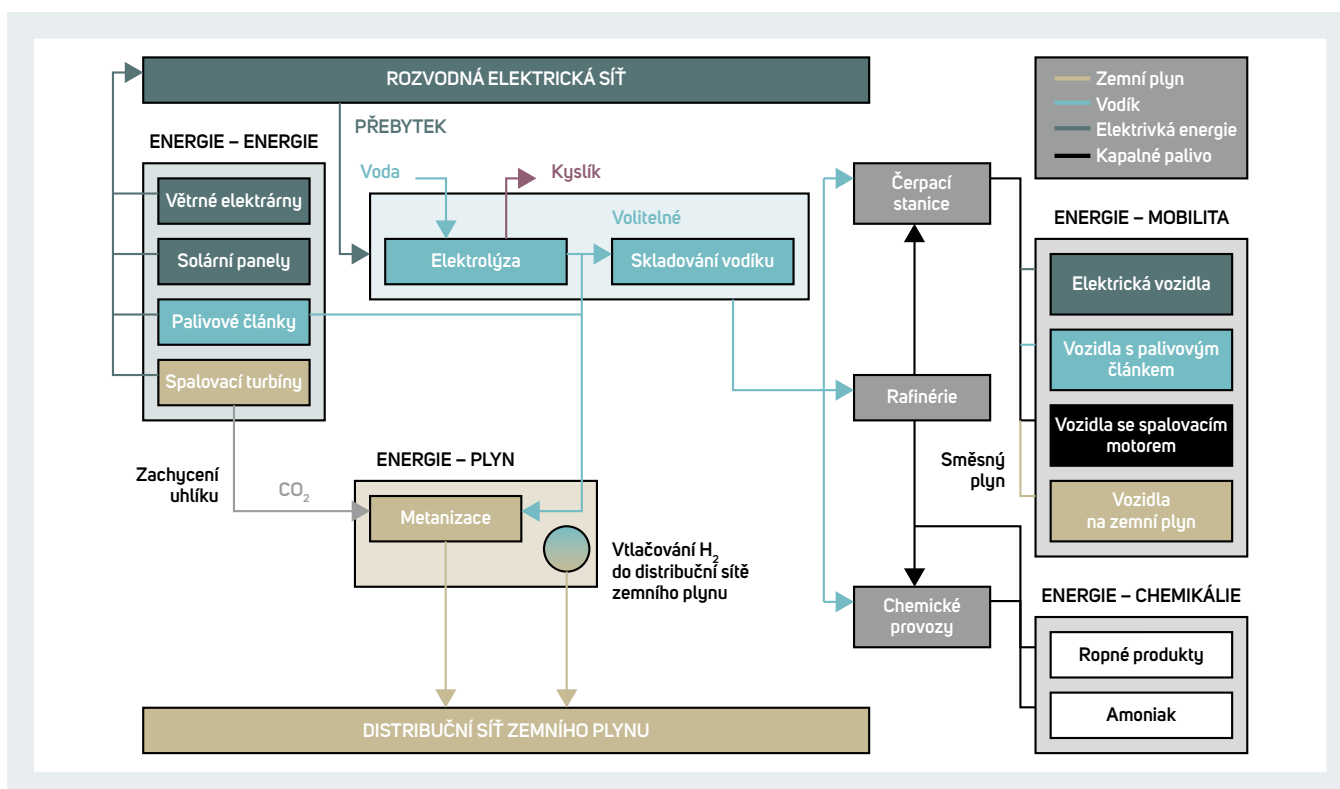
Vysoce flexibilní a účinná je naopak tzv. kyselá elektrolýza (nazývaná také PEM elektrolýza), která je nejvhodnějším řešením pro mobilní jednotky. Hlavní nevýhodou této varianty je vysoká cena spojená s nutností použít platino-

vé kovy jako elektrokatalyzátory a nákladný polymerní elektrolyt na bázi fluorové chemie. Nízkoteplotní PEM elektrolýza již dospěla do stádia komerčně dostupných velkokapacitních jednotek.

Třetí variantou je vysokoteplotní elektrolýza vody s pevným elektrolytem, která je doposud na nejnižším stupni technického vývoje, na pomezí základního a aplikovaného výzkumu. Příčinou jsou zejména extrémní nároky na použité materiály spojené s provozní teplotou pohybující se kolem 800 °C. Kvůli vysoké teplotě zařízení sice ztrácí do značné míry flexibilitu provozu, získává však výhody, které jej odlišují od dvou předchozích technologií. Vysokoteplotní elektrolýze se proto bude následující text věnovat podrobněji.

Výhody vysokoteplotní elektrolýzy

Hlavní výhodou tohoto procesu je vysoká účinnost konverze. Ta je způsobena právě vysokou provozní teplotou, za níž je kinetika elektrodo-



AUTOR SCHEMATU: MONIKA DRAKSELOVÁ

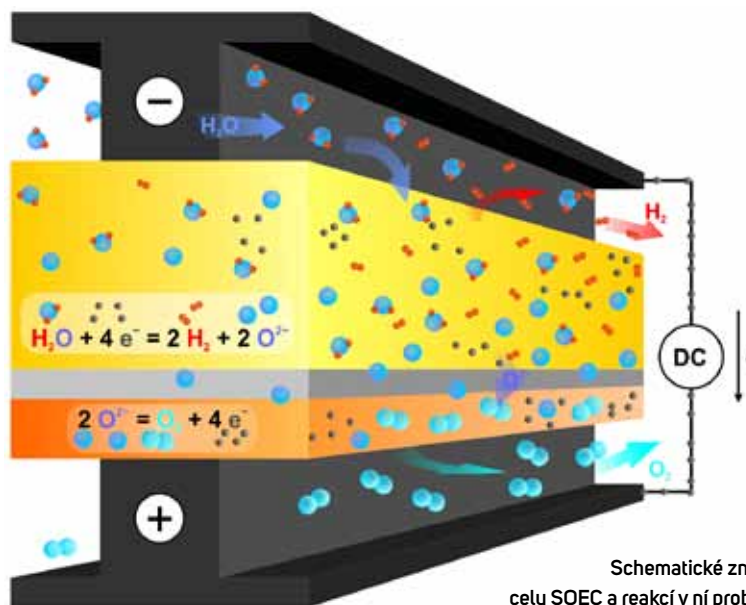
Schéma vodíkové ekonomiky založené na využití přebytků elektrické energie

vých reakcí dostatečně rychlá, aby se ztráty účinnosti způsobené tímto dějem blížily k nule. Zároveň rychlá kinetika umožňuje pracovat bez použití nákladných katalyzátorů. Díky vysoké pracovní teplotě lze rovněž nezanedbatelnou část elektrické energie potřebné k rozkladu molekuly vody nahradit energií tepelnou, tedy energií méně ušlechtilou a získávanou s vyšší účinností. Zvláště v případě, kdy se využívá odpadní teplo, je tato alternativa energeticky velice výhodná. Výhodou tohoto přístupu je i možnost spojení elektrolýzy s další žádanou chemickou přeměnou. Mezi nejčastěji diskutované patří redukce CO₂ za přítomnosti vodní páry na syntézní plyn. Zkoumána je rovněž přímá redukce CO₂ až do úrovně metanu, který může být následně například vtačován do infrastruktury pro distribuci zemního plynu, čímž dojde k jeho využití ke zpětnému získání energie.

Reakce probíhající ve vysokoteplotním elektrolýzáru (SOEC – solid oxide electrolyser cell) je reverzní k reakci probíhající v palivových článcích s pevnými oxidy (SOFC – solid oxide fuel cell), kde dochází ke zpětné přeměně energie chemické vazby na energii elektrickou. Na rozdíl od vysokoteplotní elektrolýzy jsou palivové články již několik let komerčně testovány, například jako kogenerační jednotky pro současnou výrobu elektrické energie a tepla ze zemního plynu. „Elektrolýza je obecně výrazně náročnější na materiál než palivové články, protože jde opačným potenciálovým směrem,“ vysvětluje prof. Karel Bouzek, vedoucí Ústavu anorganické technologie VŠCHT Praha, jehož tým je v České republice průkopníkem ve výzkumu této technologie. „Velkou výhodou vysokoteplotní elektrolýzy je i skutečnost, že identický článek může být používán jak v režimu SOEC, tak SOFC, což je možné díky tomu, že téměř úplně odpadají kinetické bariéry. Nizkoteplotní články obousměrný režim dosud ve srovnatelném měřítku neumožňují,“ dodává Karel Bouzek.

Výzkum vysokoteplotní elektrolýzy

Výše uvedený schematický obrázek znázorňuje reakci probíhající ve vysokoteplotním elektrolýzáru s nosnou vrstvou vodíkové elektrody (katody). Vysokoteplotní článek obsahuje pevný elektrolyt na bázi keramiky, který se používá ve formě membrány a plní dvě funkce: vedle iontového kontaktu zároveň zabezpečuje separaci plynů vznikajících na elektrodách. V SOEC článcích bývá jako elektrolyt využíváno prakticky výhradně tzv. ytřiem stabilizované zirkonium (YSZ). Vedle relativní ekonomické výhodnosti nabízí dobrou iontovou vodivost a mechanickou stabilitu. Materiál a struktura katody (elektrody, na které probíhají redukční děje) musí zajistit dostatečně intenzivní transport vodní páry do elektrody a účinný odvod vyvíjejícího se vodíku. Nejčastěji se pro katodu používá materiál na bázi niklu. Na rozdíl od katody je anoda (elektroda, kde probíhají oxidační děje) vystavena silně



Schematické znázornění cely SOEC a reakcí v ní probíhajících

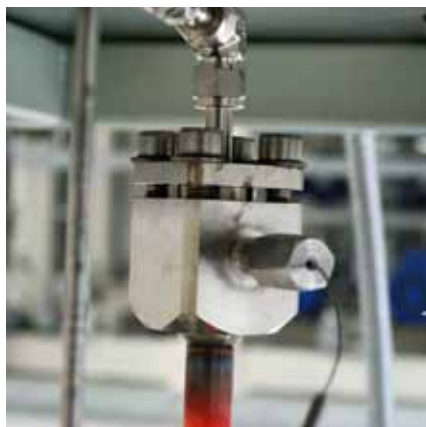
oxidačnímu prostředí v čisté kyslíkové atmosféře. Osvědčeným materiálem jsou elektronové a současně iontově vodivé směsné oxidy, například oxidy manganu s příměsí lanthanu (LSM).

Experimentálním výzkumem vysokoteplotní elektrolýzy vody se v České republice začaly před pěti lety intenzivně zabývat týmy VŠCHT Praha ve spolupráci s ÚJV Řež, které tak navázaly na dlouholeté zkušenosti s vývojem jiných typů elektrolýzérů. Financování výzkumných projektů podpořených z programu Ministerstva průmyslu a obchodu a Technologické agentury ČR významně napomohlo k tomu, že jsou dnes jejich výsledky srovnatelné se špičkovými akademickými pracovišti ve světě.

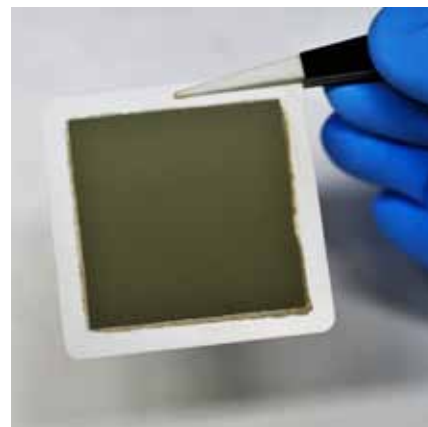
„Naše skupina pracuje na výrobě vlastních materiálů pro elektrolytické články, které můžeme následně optimalizovat a měnit jejich složení. Vyvíjíme metodiky testování, které poskytnou hodnověrná data a nebudou iniciovat předčasnou degradaci materiálů. Zabýváme se i matematickým modelováním, vyvinuli jsme zásadní sady modelů, které budeme dále rozvíjet,“ říká Karel Bouzek. „Zkoušíme i nové postupy, které umožňují připravovat články

z vodných suspenzí namísto sol-gel systémů založených na nákladných a z hlediska životního prostředí kontroverzních látkách, které jsou pro velkokapacitní výrobu neakceptovatelné,“ pokračuje Karel Bouzek.

Průmyslovým partnerem zodpovědným za realizaci experimentálního zařízení je ÚJV Řež. „V rámci projektu podpořeného z programu TAČR ALFA jsme vyvinuli a testovali funkční zařízení na výrobu vodíku vysokoteplotní elektrolýzou, včetně řídicího a monitorovacího systému. Zkušenosti se nám již podařilo zúročit při realizaci komerční zakázky na sestavení poloprovozního zařízení,“ uvádí Ing. Aleš Doucek, vedoucí oddělení vodíkových technologií v ÚJV Řež. „Tato technologie je pro nás zajímavá zejména v souvislosti s vývojem jaderného reaktoru IV. generace. Vysoká teplota chladiva na výstupu z reaktoru je pro vysokoteplotní elektrolýzu ideální, protože může podstatně snížit spotřebu elektrické energie. Elektrolýza naopak může pomoci udržovat jaderné reaktory v optimálním provozním režimu a vyrovnávat tak výchyly způsobené proměnlivou poptávkou po elektrické energii,“ dodává Aleš Doucek.



Experimentální SOEC elektrolýzáru při teplotě blízce provozní



Elektrolytem nesená SOEC cely – strana katody na bázi niklu

Získané know-how plánují oba partneři dále rozvíjet, společně podali například přihlášku do aktuální výzvy programu MPO Trio s cílem vyvinout malou jednotku pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla.

Potenciál, který má tato technologie pro široké uplatnění v praxi, potvrzují i nedávná investice společnosti ČEZ. Prostřednictvím svého fondu Inven Capital, vyhledávajícího investice do čistých technologií, získal ČEZ loni v listopadu menšinový podíl v drážďanské firmě Sunfire. Tato inovativní společnost, založená před pěti lety, se specializuje na vývoj obousměrných vysokoteplotních článků s pevným elektrolytem, které plánuje komerčně nabízet již v průběhu letošního roku.

Financování výzkumu vodíkových technologií

Jakkoliv slibná technologie se ve stadiu přechodu mezi základním a aplikovaným výzkumem neobejde bez veřejné finanční podpory. Na evropské úrovni je výzkum a vývoj vodíkových technologií podporován prostřednictvím Společného podniku pro palivové články a vodík (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, FCH JU), který byl ustaven v roce 2008 jako partnerství veřejného a soukromého sektoru. Ve své podstatě se jedná o „grantovou agenturu“, která rozděljuje finanční prostředky v rámci otevřené soutěže nejlepším mezinárodním projektům. Celkový rozpočet programu FCH JU na období 2014–2020 je plánován ve výši 1,33 mld. eur a podílí se na něm jak EU, tak průmysl a výzkumné instituce.

FCH JU každoročně vypisuje výzvu pro podávání návrhů projektů v rámci dvou pilířů – doprava a energetika. O projekty se mohou ucházet mezinárodní konsorcia složená z několika mezinárodních partnerů jak z výzkumné,

tak průmyslové sféry. Pro úspěšné ohodnocení návrhu projektu jsou klíčoví průmysloví partneři, kteří jsou schopni vyvíjené technologie následně využít.

„Účast v mezinárodních projektech umožňuje našemu pracovišti spolupracovat se špičkovými mezinárodními laboratořemi, a zejména průmyslovými partnery, kteří prosazují tyto inovativní technologie v rámci volného trhu. Spolupráce je zásadní z pohledu efektivního rozvoje našeho výzkumu a jeho přizpůsobení průmyslové praxi. Zároveň představuje významný přínos pro naše vzdělávací aktivity. Umožňuje nám seznamovat studenty s nejnovějším vývojem na tomto poli a připravit je pro uplatnění v průmyslové praxi způsobem konkurenceschopným vůči významným evropským univerzitám,“ shrnuje Karel Bouzek, jehož tým se zapojil již do čtyř projektů FCH JU.

Nejnovější projekt FCH JU „SElySOs“, na jehož řešení se podílí VŠCHT Praha, byl zahájen v listopadu minulého roku. Zaměřuje se právě na vysokoteplotní elektrolýzu vody, konkrétně na vývoj nových elektrodových materiálů a na lepší pochopení degradačních mechanismů probíhajících v SOEC. Zkoumáno je i zhodnocení CO₂ jeho konverzí na syntézní plyn, tzv. ko-elektrolýza, při které je problém degradace materiálů výraznější než u klasické elektrolýzy. Projekt SElySOs je koordinován řeckým výzkumným institutem Foundation for Research and Technology Hellas. Jedním z průmyslových partnerů projektu je norská firma Prototech AS, která se aplikacím vodíkových technologií věnuje již řadu let. Spolupracuje například s ESA na vývoji elektrolyzérů s pevným elektrolytem, jenž by bylo možné v budoucnu využít na výrobu kyslíku z CO₂ na Marsu.

Grantový program podporující výzkum čistých technologií není pouze záležitostí na ev-

ropské úrovni. Mnohé členské státy EU (jako například Německo či Dánsko) mají specializované národní programy, které zajišťují domácím výzkumným organizacím stabilní zdroj příjmů, a tím nezbytnou kontinuitu pro jejich výzkumnou činnost. V ČR doposud samostatné grantové schéma pro oblast energetiky neexistuje, ačkoliv státní správa tuto možnost zvažuje.

Infrastruktura a normy

Pro plošné využívání vodíkových technologií je nezbytné vybudovat i odpovídající distribuční síť, upravit a sjednotit technické normy a příslušnou legislativu. Evropská zákonodárce přijali v roce 2014 Směrnici o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva, která stanovuje, aby každý členský stát schválil do 18. listopadu 2016 vnitrostátní rámec pro rozvoj alternativních paliv v dopravě. Státy se mohou rozhodnout, zda do svého rámce zahrnou i vybudování vodíkových plnicích stanic. Podle českého Národního akčního plánu čisté mobility z listopadu 2015 se předpokládá vypracování studie proveditelnosti posuzující potenciál pro využití vodíkového pohonu v ČR a podpora výzkumných a pilotních projektů, včetně vybudování vodíkové infrastruktury ve vybraných regionech (alespoň dvě regionální centra v období 2015–2020).

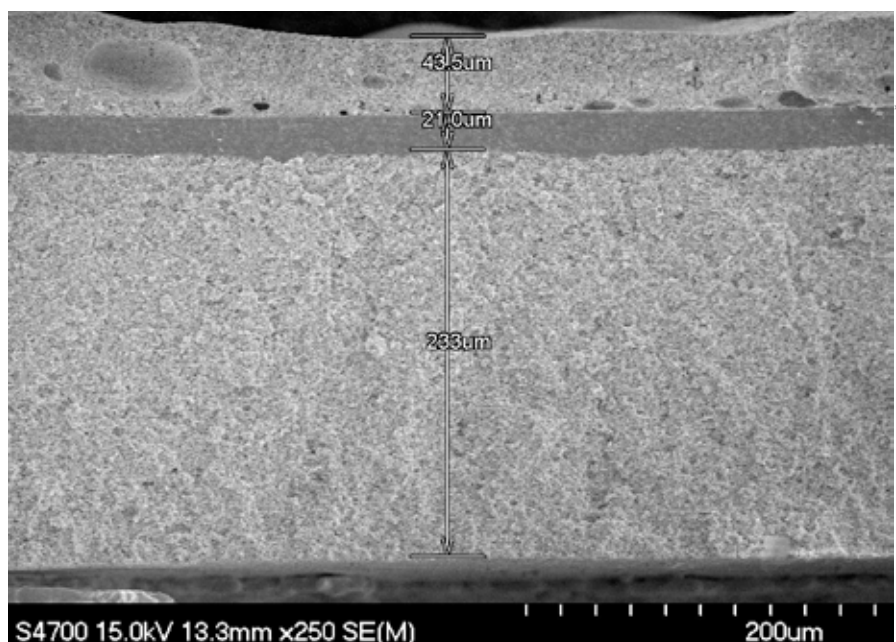
Tento článek vznikl za podpory projektu KOMPAS financovaného z programu EUPRO II MŠMT a projektu SElySOs financovaného FCH 2 JU. ■



UVEDENÉ TECHNOLOGIE JE MOŽNÉ STUDOVAT

v rámci nedávno otevřeného studijního oboru Vodíkové a membránové technologie na Fakultě chemické technologie VŠCHT Praha, který je v České republice svým zaměřením ojedinělý. Studium je prozatím poskytováno v českém jazyce, do budoucna se zvažuje možnost studovat rovněž v angličtině.

Nejnovější poznatky v oblasti výzkumu a vývoje vodíkových technologií, včetně vysokoteplotní elektrolýzy vody, budou diskutovány na mezinárodní konferenci **Hydrogen-days** organizované Českou vodíkovou technologickou platformou 6.–8. dubna 2016 v Praze (www.hydrogen-days.cz). V příštím roce bude Praha hostit též prestižní mezinárodní kongres zaměřený na vodíkové technologie **WHTC 2017** (<http://www.whtcprague2017.cz>).



Snímek průřezu SOEC s nosnou vrstvou vodíkové elektrody