

# Bezuhlíková perspektiva budoucnosti

3.5.2024 - | Fakulta strojní ČVUT v Praze

**V dalším dílu seriálu článků k výročí 160 let počátku strojařského vzdělávání v ČR, připravili odborníci z Ústavu energetiky a Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze článek, který se věnuje dekarbonizaci energetiky a průmyslu ve vazbě na Green Deal 2050, což je v současnosti jedním z hlavních celospolečenských a politických témat.**

Problematika se často nekriticky zužuje na elektrifikaci či vodíkové technologie s vazbou na obnovitelné zdroje energie (ve zkratce OZE), je však potřeba si uvědomit, že potenciál těchto obnovitelných zdrojů je v ČR omezený z důvodu relativně nepříznivých podnebných a geografických podmínek.

Je také potřeba zmínit, že nejvýznamnějším OZE v ČR je paradoxně biomasa, tedy ve svém původu typicky pevný biologický materiál, který musí podstoupit další transformace k zisku užitečné formy energie, které jsou zatížené účinnostmi nezbytných přeměn. Její podíl na výrobě elektřiny z OZE v ČR je cca 50 %, na výrobě tepla v centralizovaných systémech pak cca 90 %. Zvyšování míry jejího využívání se začíná dostávat do střetu s jejím dostupným potenciálem a potravinovou bezpečností.

V médiích se vyskytující pejorativní výklad zkratky OZE jako „občasné zdroje energie“ pro ostatní druhy OZE, typicky zužované na solární a větrnou energii, je ve svém důsledku relativně příležitý a reflekтуje velkou, obtížně predikovatelnou variabilitu těchto druhů OZE a jejich omezený potenciál. Zvyšování podílu OZE na úkor stabilních zdrojů jako prostředek dekarbonizace zejména ve výrobě elektřiny pak nutně znamená vnášení vyššího podílu prvku nestability, který je nutné kompenzovat záložními (fosilními) zdroji, akumulací, popř. importem.

Pokud je skutečně celospolečenským cílem snižovat emise CO<sub>2</sub> do ovzduší, bez ohledu na různá dogmata, je možné k problematice přistoupit i jiným způsobem, aniž by bylo nutné vzdát se dostupných a stabilních energetických zdrojů. CO<sub>2</sub> ve své podstatě pochází z oxidace všech paliv na bázi uhlovodíků (jiná, vyjma výše zmíněného vodíku, ani neexistují), ale také z některých průmyslových procesů, jako je např. výroba cementu.

Smyslem dekarbonizačních technologií z tohoto pohledu je v určité fázi konverze paliva na užitečnou energii nebo v průmyslovém procesu oxid uhličitý zachytit, zpracovat, a následně uložit (CCS), a tím zabránit jeho uvolnění do atmosféry, popřípadě jej dále využít jako surovinu, například pro výrobu chemikalií nebo syntetických paliv (CCU). CO<sub>2</sub> může při energetických konverzích vznikat relativně velké množství. Například z 1 kg severočeského hnědého uhlí vznikne jeho spálením přibližně 1,6 kg CO<sub>2</sub>, z 1 m<sup>3</sup>N zemního plynu je to přibližně 0,7 kg. Jako průmyslový příklad lze vzít výrobu páleného vápna v cementárnách, kde z 1 kg vstupní suroviny (vápence) vznikne přibližně 2,2 m<sup>3</sup>N CO<sub>2</sub> (4,3 kg). Jestliže se např. ročně v ČR energeticky využije cca 2,5 mil. tun hnědého uhlí, znamená to vypuštění do ovzduší asi 2 mil. m<sup>3</sup>N CO<sub>2</sub>, což odpovídá hodnotě asi 3,9 mil. tun.

**Fakulta strojní se k tomuto celospolečenskému cíli ve své každodenní vědecko-výzkumné i vzdělávací činnosti staví odpovědně a takovým způsobem, aby společnosti dokázala poskytnout technologie i lidské zdroje.** Příkladem může být vznik centra Bio-CCS/U v roce 2018, které bylo jedinou integrovanou výzkumnou platformou, jež se v ČR systematickému výzkumu v oblasti CCS/CCU věnovala, a zahrnovalo další partnery mimo fakultu i univerzitu.

Ačkoliv původní realizační fáze centra skončila v roce 2023, výstupy, které v rámci něj vznikly, znamenaly výrazný posun v úrovni technologií CCU. Jedním z nejvýznamnějších úspěchů v realizaci

experimentálních zařízení je fluidní oxyfuel spalovací systém, označovaný pracovně jako „Golem“. Jde o technologii, která umožňuje získat přímo prakticky čistý CO<sub>2</sub> z energetické konverze biomasy i jiných paliv v rámci jednoho procesu. **Systém, navržený a zrealizovaný výzkumným týmem Bio-CCS/U, je jediným v ČR, a patří mezi několik málo velkých výzkumných infrastruktur i v evropském kontextu.** Se svojí velikostí 0,5 MW tepelného příkonu umožňuje validaci laboratorních výsledků na pilotní úrovni, která je ověřovacím předstupněm pro skutečnou realizaci.

Dekarbonizační aktivity pak navázaly v podobě dalších projektů. V oblasti post-combustion technologií, tedy těch určených pro zachycení CO<sub>2</sub> až po realizaci energetické konverze paliva, je to například nízkoteplotní adsorpce. Tyto technologie mají potenciální výhodu v tom, že je lze ke stávajícím energetickým nebo průmyslovým provozům připojit, aniž by bylo do větší míry nutné zasahovat do původní technologie. Významnou nevýhodou je pak to, že pracují s odpadním plynem, kterého je obecně relativně velké měrné množství ve vztahu k množství použitého paliva, a zároveň je v něm relativně nízká koncentrace CO<sub>2</sub>, která typicky nepřekračuje přibližně 15 obj. %, ale velmi často je i podstatně nižší. To vyžaduje sofistikované přístupy k jeho separaci, často vyžadující kombinaci různých technologií.

Významným příspěvkem Fakulty strojní je realizace experimentálního VPSA adsorbéru na úrovni TRL5, který umožňuje proces zkoumat v reálném měřítku s reálným odpadním plynem, a výsledky tak umožní využít v praxi.

Současné výsledky výzkumu a vývoje nabízejí možnosti, jak efektivně snížit množství emitovaného CO<sub>2</sub> prostřednictvím technologií pro jeho záchyt a využití (Carbon Capture and Utilization, CCU). Jen pro představu, roční emise CO<sub>2</sub> do ovzduší z energetiky a zpracovatelského průmyslu se v Česku v roce 2022 pohybovaly okolo 95•106 tun.

Primárním emitentem CO<sub>2</sub> v Česku je energetika s podílem 48 %, následuje doprava se 17 %, zpracovatelský a stavební průmysl s 15 %, budovy s 10 %, zemědělství se 6 % a technologie zpracování odpadu se 4 %. Zachycený emisní CO<sub>2</sub> lze jako surovinu transformovat pomocí různých chemických, elektrochemických, fotochemických nebo biochemických procesů na pokročilá biopaliva (např. metan, etanol a butanol), zelené chemické látky (např. močovinu, metanol a kyselinu mravenčí) nebo stavební materiály (různé typy uhličitanů). Jakákoliv technologie záchytu a využití emitovaného CO<sub>2</sub> se skládá ze tří technologických celků – záchyt CO<sub>2</sub>, transformace CO<sub>2</sub> na biopalivo a zelené chemikálie, separace a zušlechtění produktů. Je nutné si uvědomit, že emitovaný CO<sub>2</sub> je pouze jednou z chemických složek spalin a průmyslových odpadních plynů. Současná technická praxe nabízí možnosti záchytu CO<sub>2</sub> pomocí absorpce, PSA adsorpce, kryogeniky nebo membránové separace, vše v úrovni technické vyspělosti TRL > 6. Cena záchytu CO<sub>2</sub> se běžně pohybuje v desítkách až stovkách eur za tunu CO<sub>2</sub> v závislosti na jeho obsahu v emisním plynu a požadované čistotě CO<sub>2</sub>.

Chemická transformace CO<sub>2</sub>-to-X, biochemická transformace CO<sub>2</sub>-to-X a mineralizace CO<sub>2</sub> patří mezi perspektivní technologie využití emisního CO<sub>2</sub> v průmyslovém měřítku. V kontextu chemické transformace molekula CO<sub>2</sub> reaguje s potřebnými ekvivalenty vodíku, a vzniká tak metan, metanol, kyselina mravenčí, močovina nebo syntetický plyn pro následnou Fischer-Tropsch reakci výroby leteckého paliva (Sustainable Air Fuel).

Chemická transformace CO<sub>2</sub>-to-X se v současné době pohybuje na úrovni technické vyspělosti TRL7. Za zmínu stojí technologie The Jupiter 1000 (25 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> e-metan, Fos-sur-Mer, Francie), ETL technology (100 000 t.r<sup>-1</sup> e-metanol, Anyang, Čína) nebo SAF Neste Corporation (100 000 t SAF ročně, Rotterdam, Nizozemsko). Rozvoji chemických CO<sub>2</sub>-to-X technologií v průmyslovém měřítku však brání nízká konverze CO<sub>2</sub>-to-X, nedostatek demonstračních zařízení, nedostatek pobídek ke snižování emisí CO<sub>2</sub> a vysoké výrobní náklady. Biochemická transformace CO<sub>2</sub>-to-X je založena na fotosyntetické fixaci 1,83 t CO<sub>2</sub> do 1 t mikrořas, které jsou nejčastěji kultivovány v korytových,

deskových nebo v trubkových fotobioreaktorech. Typickými mikrořasovými produkty jsou biooleje, proteiny, bioethanol, bioplyn, biovodík, zelené chemikálie, přísady, potraviny a krmiva, hnojiva a paliva v závislosti na druhu řas a čistotě zpracovávaného CO<sub>2</sub>. Jedná se však o energeticky velmi náročnou technologii, která má zároveň velké nároky na zastavěnou plochu. Demo ukázkou TRL7 biochemické konverze CO<sub>2</sub>-to-etanol je LanzaTech (80•106 l EtOH.r-1, Ghent, Belgie). Posledním perspektivním směrem koncepce CO<sub>2</sub>-to-X je minerální karbonizace. Jedná se o proces, při kterém CO<sub>2</sub> reaguje s přírodními rudními minerály za vzniku minerálních uhličitanů, jako je uhličitan vápenatý a uhličitan hořečnatý, které nacházejí své uplatnění ve stavebnictví. K fixaci 1 t CO<sub>2</sub> je zapotřebí 1,6–3,7 t typového minerálu. Průmyslová aplikace mineralizace CO<sub>2</sub> je však limitována nízkou reakční rychlostí, spotřebou a energetickou náročností zpracování minerálů na velikost do 100 µm.

Výše uvedené CO<sub>2</sub>-to-X transformace jsou považovány za perspektivní směry zpracování emisního CO<sub>2</sub> v průmyslovém měřítku. Je třeba si uvědomit, že ne všechny zmíněné způsoby transformace jsou univerzálně použitelné. Vhodná volba zpracovatelské linky CO<sub>2</sub>-to-X musí být udržitelná v kontextu dekarbonizace a cirkulární ekonomiky. Vlastní řešení musí být založeno na vícekriteriálních rozhodovacích procesech. Tj. zda lze laboratorní nebo poloprovozní výsledky výzkumu a vývoje transformovat do úrovně technologické připravenosti TRL 8-9 (systém ověřený v provozním prostředí) při místních klimatických podmínkách, energetické a průmyslové infrastrukturě, a legislativě.

**Výzkumný tým Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní významně přispívá k experimentálnímu výzkumu a průmyslovému vývoji technologií CO<sub>2</sub>-to-X, a to zejména k strojně-technologickému řešení reaktorů a bioreaktorů** (experimentální analýza a modelování přenosu hybnosti, tepla a hmoty v chemických reaktorech, bioreaktorech a fotobioreaktorech pracujících při standardních i extrémních podmínkách, návrh efektivních míchacích systémů, statické a dynamické směšovače). Významný příspěvek je i v oblastech výzkumu hybridních technologií záchrany CO<sub>2</sub> (vzájemné kombinace adsorpce, absorpcie a membrána v TRL4), drcení a mletí (účinný princip rozpojování, analýza rozpojovací energie a konfigurace mlýnu), a projektování zpracovatelských linek CO<sub>2</sub>-to-X (bilancování, dynamické modelování a technicko-ekonomické posouzení).

**prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.**, jan.hrdlicka@fs.cvut.cz, Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze

**doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.**, lukas.kratky@fs.cvut.cz, Ústav procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze

<http://www.fs.cvut.cz/aktuality/2619-212/bezuhlikova-perspektiva-budoucnosti>