

## ADSORPCE CO<sub>2</sub> ZE SPALIN ELEKTRÁREN NA PEVNÝCH SORBENTECH

Jana Smutná<sup>1</sup>, Jiří Štefanica<sup>1</sup>, Karel Ciahotný<sup>2</sup>, Olga Ubrá<sup>1</sup>, Veronika Vrbová<sup>2</sup>, Pavel Machač<sup>2</sup>,  
Lukáš Pilarš<sup>3</sup>, Monika Vítvarová<sup>3</sup>

ÚJV Řež, a. s., Hlavní 130, Husinec-Řež.<sup>1</sup>  
VŠCHT Praha, Technická 5, 166 28 Praha 6<sup>2</sup>  
ČVUT v Praze, Žitná 1903/4, 166 36 Praha 6<sup>3</sup>

*Pro podmínky České republiky byla navržena a testována varianta využití adsorpční metody zachytu CO<sub>2</sub> ze spalin hnědouhelné elektrárny. Navržená technologie byla v pilotním měřítku nejprve otestována pro sorpci CO<sub>2</sub> z modelových spalin a následně ověřována v podmínkách reálných spalin. Výsledky z pilotních experimentů realizovaných v podmínkách reálných spalin byly využity k návrhu technického řešení systému zachytu CO<sub>2</sub> ze spalin pro zadaný elektrárenský blok a zadané tuzemské palivo. Pro navržené technické řešení systému zachytu CO<sub>2</sub> byla provedena optimalizace a integrace do základní výrobní technologie zadaného elektrárenského bloku a byly vyhodnoceny hlavní ekonomické ukazatele bloku s CCS technologií.*

*Klíčová slova: adsorpce, oxid uhličitý, spaliny*

Došlo 12. 2. 2016, přijato 14. 3. 2016

### 1. Úvod

Snižování emisí CO<sub>2</sub> z energetických provozů spalujících fosilní paliva je v současnosti velmi aktuální problematikou z několika důvodů. Světová energetika závisí na fosilních palivech a predikce podílu fosilních paliv na zajištění výroby elektrické energie a tepla je dlouhodobě vysoká. Přechod energetiky od spalování fosilních paliv směrem k obnovitelným zdrojům energie spojeným s nízkými emisemi CO<sub>2</sub> je přitom pozvolný. Očekává se, že pokud nebudou postupně zaváděna opatření ke snižování skleníkových plynů z velkých antropogenních zdrojů těchto emisí, mohou mít změny způsobené nerovnováhou v uhlíkovém cyklu a nárůstem koncentrace skleníkových plynů v atmosféře zásadní dopad na environmentální podmínky života na Zemi.

Technologie zachytu a ukládání CO<sub>2</sub> (dále CCS) vznikajícího z velkých průmyslových zdrojů (energetika, cementárny, ocelárny) umožňují řízeně snižovat emise CO<sub>2</sub>. Předností CCS je možnost jejich implementace jako koncové technologie čištění odpadních plynů, čímž jsou omezeny zásahy do produkční technologie, a variabilita metod zachytu CO<sub>2</sub>, které je možné dané technologií uzpůsobit.

Pro podmínky České republiky byla navržena a testována varianta využití adsorpční metody zachytu CO<sub>2</sub> ze spalin hnědouhelné elektrárny. Navržená technologie byla v pilotním měřítku nejprve otestována v laboratorních podmínkách s modelovými spalinami a následně ověřována v poloprovozních podmínkách s reálnými spalinami. Pilotní testy byly souběžně doprovázeny laboratorním vývojem impregnovaných sorbentů. Výsledky z pilotních experimentů realizovaných v poloprovozních podmínkách byly využity k návrhu technického řešení systému zachytu CO<sub>2</sub> ze spalin pro zadaný elektrárenský blok a zadané tuzemské palivo. Pro navržené technické řešení systému zachytu CO<sub>2</sub> byla provedena optimalizace a integrace do základní výrobní technologie zadaného

elektrárenského bloku a byly vyhodnoceny hlavní ekonomické ukazatele bloku s CCS technologií. Na základě porovnání vybraných technických ukazatelů elektrárenského bloku s integrovanou technologií CCS a téhož bloku bez technologie CCS byly vyhodnoceny dopady zařazení CCS na ekonomii provozu elektrárny a na výrobní cenu elektřiny v podmínkách České republiky.

### 2. Experimentální část

#### 2.1. Laboratorní experimenty

Laboratorní experimenty zahrnovaly návrh a realizaci adsorpčně-desorpční jednotky pro výzkum sorpčních materiálů, vývoj metodik přípravy adsorpčních materiálů a realizaci testů s vybranými komerčně dostupnými a laboratorně připravenými adsorbenty.

Za definovaných podmínek byly připraveny impregnované adsorbenty s využitím různých typů komerčně dostupných adsorbentů a různých impregnačních činidel. Charakteristiky impregnovaných sorbentů byly porovnávány s komerčními vzorky a byly vyhodnocovány jejich změny. Vzorky byly charakterizovány pomocí povrchové analýzy na přístroji Coulter SA3100, na kterém byl stanoven BET povrch a objem pórů a mikropórů. Z výsledků elementární analýzy bylo vyhodnocováno množství navázaného dusíku z impregnačních činidel. Dále byly provedeny statické a průtočné testy sorpční kapacity vybraných vzorků a byla vyhodnocována regenerační schopnost sorbentů.

Pro testování byly použity následující adsorbenty:

- mikroporézní adsorbent Calsit 5A - molekulové síto typu A s efektivním průměrem pórů 0,5 nm, jehož složení je možné popsat vzorcem CaO · Na<sub>2</sub>O · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2 SiO<sub>2</sub>, ve formě extrudovaných válečků o průměru 3 mm, dodavatel Slovaft VÚRUP,
- mikroporézní/mezoporézní adsorbent AP4-50 – aktivní uhlí ve formě válečků o průměru 3 mm, dodavatel Chemviron Carbon,

- mezoporézní adsorbent KC-Trockenperlen H – silikagel s aluminou tvořený 97 % hm. SiO<sub>2</sub> a 3 % hm. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ve formě kuliček o průměru 2 – 5 mm, dodavatel BASF,
- mezoporézní adsorbent Envisorb B+ - kombinovaný adsorbent na bázi silikagelu tvořený > 85 % hm. SiO<sub>2</sub> a >10 % hm. aktivním uhlím, ve formě kuliček o průměru 1 – 6 mm, dodavatel BASF.
- mezoporézní adsorbent SGR50, IPXU 307 425-0 – silika ve formě kuliček, dodavatel Silcarbon Aktivkohle GMBH,
- mikroporézní adsorbent 13X – molekulové síto ve formě kuliček, dodavatel Sigma Aldrich,
- aktivní saze Chezacarb + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + vodní sklo - adsorbent ve formě válečků, připravený ve spolupráci VÚHU Most + VŠCHT v Praze.

Úprava povrchu vzorků impregnací byla provedena s použitím následujících impregnačních činidel:

- ethanolamin (MEA) – NH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH, primární amin/alkohol o čistotě vyšší než 98 %, M=61,08 g/mol, dodavatel Sigma-Aldrich;
- ethylendiamin (ED) – NH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>NH<sub>2</sub>, sekundární amin o čistotě vyšší než 99 %, M=60,1 g/mol, dodavatel Sigma-Aldrich;
- 1,8-diazabicyklo[5.4.0]undec-7-en (DBU) – amidin o čistotě vyšší než 98 %, M=152,24 g/mol, dodavatel Sigma-Aldrich;
- polyethylenimin (PEI) – polymerizovaný ethylenimin (aziridin), 50% roztok ve vodě, M<sub>n</sub>=1200 g/mol, dodavatel Sigma-Aldrich.

Shrnutí nejdůležitějších výsledků z laboratorních testů je uvedeno v kapitole 3.1.

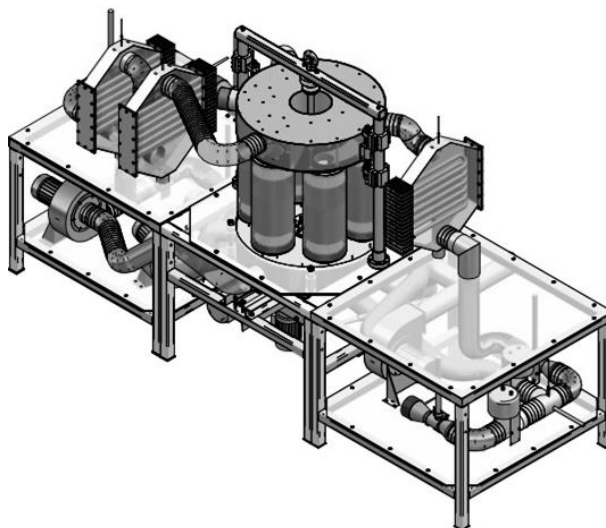
## 2.2. Pilotní experimenty

Pilotní experimenty zahrnovaly návrh koncepce pilotního experimentálního zařízení, vývoj konstrukční a výrobní dokumentace a výrobu komponent zařízení, vlastní výstavbu zařízení a oživení a odzkoušení zařízení s použitím modelových a následně reálných spalin.

Pilotní zařízení bylo navrženo jako rotační adsorbér pro následující provozní podmínky:

- Provozní výkon: 140 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> plynu, rychlost proudění cca 0,1 m s<sup>-1</sup> (zpracovaný objem plynu odpovídá cca 0,1 promile z celkové produkce elektrárenského bloku 250 MW)
- Teplota při adsorpci: 60 – 80 °C
- Teplota při desorpci: 120 – 200 °C
- Tlak: atmosférický, příp. mírný přetlak nebo podtlak (dáno ventilátory)
- Obsah korozivních složek: aparatura navržena s ohledem na přítomnost kyselých plynů
- Obsah vlhkosti: uvažován až do 100 % rel. vlhkosti
- Obsah pevných částic: minimální

Ústřední část pilotního zařízení tvoří rotační adsorbér, na který jsou napojeny periferní části – trať pro přívod a odvod plynu, topení, ventilátory a měřicí elementy (tlaková čidla, teploměry, průtokoměry). Původně byl rotační adsorbér navržen jako kompaktní kolo definovaného průměru a výšky, které se kontinuálně otáčí kolem své osy a je rozdělené na výseče (segmenty) přepážkami. Z konstrukčních důvodů však byla zvolena náhrada celistvého kola jednotlivými válcovými adsorbéry umístěnými po obvodu kola. Dispozice pilotního zařízení je uvedena na obr. 1.



**Obr. 1** Dispozice pilotního zařízení  
**Fig. 1** Illustration of pilot scale equipment

Ústřední částí pilotního zařízení je rotační adsorbér. Rotační adsorbér je tvořen nepohyblivým distributorem, kolektorem plynu a pohyblivou střední částí, na které je po obvodu hřídele rozmístěno 6 válcových kolon. Proces je rozdělen na 4 kroky: adsorpci, desorpci a dva stupně chlazení. První segment chlazení měl původně sloužit pro vymývání plynu a jeho vedení zpět na vstup do adsorpce v případě, že by koncentrace CO<sub>2</sub> ze segmentu vymývání byla významná. Tento předpoklad se během testů nepotvrdil, proto byl segment vymývání upraven pro chlazení. Provedená změna pomohla lépe chladit adsorbent před vstupem na adsorpci.

Během měření v podmínkách reálných spalin byla stanovena sorpční kapacita pro CO<sub>2</sub> v jednotlivých časových krocích otáčení adsorbéru, vyhodnocena účinnost záchytu CO<sub>2</sub> a provedena orientační měření adsorpce konkurenčních sorbujících se složek ze spalin.

Shrnutí hlavních výsledků z pilotních testů je uvedeno v kapitole 3.2.

## 2.3. Vývoj technického řešení záchytu CO<sub>2</sub> adsorpcí

V rámci vývoje technického řešení byly provedeny základní návrhové tepelné a bilanční výpočty, upřesněny parametry komponent a stanoveny spotřeby pracovních a pomocných látek a spotřeby energie. Po začlenění navrženého systému záchytu CO<sub>2</sub> do procesní technologie

elektrárny byly provedeny optimalizační výpočty tepelného oběhu včetně výpočtu čisté účinnosti výroby elektrické energie.

Pro separaci CO<sub>2</sub> ze spalin byl navržen rotační adsorbér o průměru 60 m a výšce adsorpční vrstvy 0,8 m. Hmotnost sorbentu v celém adsorbéru je přibližně 760 t. Plocha adsorbéru je rozdělena do adsorpční, desorpční a chladicí části v poměru 2:1:1.

Teplota spalin na vstupu do adsorpce je přibližně 60 °C. Složení spalin na výstupu z adsorpce je proměnlivé a pohybuje se v následujících rozmezích:

- obsah N<sub>2</sub>: 89 – 91 %,
- obsah CO<sub>2</sub>: 2,5 – 4,5 % obj.,
- obsah SO<sub>2</sub>: 50 – 160 mg m<sup>-3</sup>,
- obsah NO<sub>x</sub>: cca 20 mg m<sup>-3</sup>,
- obsah dalších látek je nevýznamný.

Množství potřebného tepla k ohřátí desorpčního plynu závisí na počáteční teplotě des. plynu, při 50 °C to bude cca 55000 MJ h<sup>-1</sup>. Teplota a tlak desorpčního plynu na vstupu do desorpce je 180 °C a 80 kPa. Teplota desorpčního plynu na konci desorpce je 45 – 50 °C.

Požadované množství chladicího vzduchu je 340000 Nm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> při maximální teplotě vzduchu 30 °C. Teplota vzduchu na konci chlazení sorbentu je proměnlivá v rozmezí 60 – 160 °C.

Čistota výstupního CO<sub>2</sub> je cca 95 %, zbytek tvoří vodní pára, SO<sub>2</sub>, HCl a HF.

Při návrhu technologie byly uvažovány spaliny uvedené v tab. 1. Jedná se o reálné (projektové) spaliny pro moderní blok 250 MWe spalující hnědé uhlí, jehož parametry jsou uvedeny v tab. 2. Pro odsíření je použita mokrá vápencová vypírka s požadavkem na odsíření spalin pod 150 mg Nm<sup>-3</sup> SO<sub>2</sub> (suché sp., 6 % obj. O<sub>2</sub>) na výstupu z adsorbéru. Pro emise NO<sub>x</sub> je požadovaný limit 200 mg Nm<sup>-3</sup>. Takovéto nebo velmi podobné spaliny pak představují vstup do případné následné technologie post-combustion záchytu CO<sub>2</sub>.

**Tab. 1** Složení spalin

**Tab. 1** Flue gas composition

Parametr	Hodnota	Jednotka
Suché spaliny	766 045	Nm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
CO <sub>2</sub>	13,94	% obj
O <sub>2</sub>	5,44	% obj
N <sub>2</sub>	80,62	% obj
SO <sub>2</sub>	155,6	mg Nm <sup>-3</sup>
SO <sub>3</sub>	12,44	mg Nm <sup>-3</sup>
HCl	2,07	mg Nm <sup>-3</sup>
HF	4,15	mg Nm <sup>-3</sup>
NO <sub>x</sub>	207,5	mg Nm <sup>-3</sup>
TZL	10,4	mg Nm <sup>-3</sup>
Pára	218 493	Nm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Voda (unášené kapky)	80	kg h <sup>-1</sup>
Teplota	62	°C

**Tab. 2** Parametry bloku

**Tab. 2** Working parameters of power station block

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon bloku	250	MWe
Spotřeba uhlí	214	t h <sup>-1</sup>
Teplu v palivu	588	MWt
Vlastní spotřeba	24	MWe
Produkce CO <sub>2</sub>	211	t h <sup>-1</sup>
Emise CO <sub>2</sub> do ovzduší	211	t h <sup>-1</sup>
Výroba elektřiny	226	MWe
Výsledná celková účinnost	38,4	%

Samotný proces záchytu CO<sub>2</sub> ze spalin zahrnuje následující hlavní technologické kroky:

- chlazení spalin,
- dočištění spalin,
- spalinový ventilátor,
- rotační adsorbér,
- vzduchový ventilátor,
- komprese CO<sub>2</sub>,
- okruh chladicí vody,
- hospodářství NaOH.

Vazby mezi výrobním blokem a technologií CCS jsou vedeny přes následující systémy:

- dodávka elektrické energie pro CCS,
- dodávka tepla, páry pro CCS,
- návrat kondenzátu z CCS,
- dodávka chladicí vody pro chlazení spalin,
- dodávka chladicí vody pro chlazení kompresorů CO<sub>2</sub>,
- dodávka čírené vody pro přípravu roztoku hydroxidu sodného NaOH,
- dodávka demineralizované vody pro úpravu parametrů páry.

Shrnutí výsledků z řešení technického návrhu záchytu CO<sub>2</sub> adsorpcí je uvedeno v kapitole 3.3.

#### 2.4. Technicko-ekonomické vyhodnocení

Na základě technologických bilancí bylo provedeno vyhodnocení základních ekonomických ukazatelů zadaného elektrárenského bloku s integrovanou technologií záchytu CO<sub>2</sub> ze spalin na bázi adsorpce a posouzení dopadů integrace záchytu CO<sub>2</sub> do ekonomie elektrárny. Dále byly porovnány ekonomické dopady integrace technologie záchytu CO<sub>2</sub> na bázi adsorpce s technologií záchytu CO<sub>2</sub> na bázi procesu oxyfuel.

Hlavní hodnocená ekonomická kritéria byla následující:

- CAPEX - investiční náklady
- OPEX - roční provozní náklady
- COE - výrobní cena elektřiny
- LCOE - střední měrná výrobní cena elektřiny
- Capture cost - náklady na separovanou tunu CO<sub>2</sub>
- Avoided cost - náklady na emitovanou tunu CO<sub>2</sub>

Ekonomické hodnocení bylo zpracováno pro dvě varianty: referenční blok – uhelnou elektrárnu bez CCS technologie – a uhelnou elektrárnu s CCS technologií na bázi adsorpce na aktivním uhlí.

### 3. Výsledky a diskuse

Během řešení problematiky sorpčního záchytu CO<sub>2</sub> z elektrárenských spalin byla vyvinuta koncepce řešení záchytu CO<sub>2</sub> na tuhých sorbentech na bázi aktivního uhlí, stanoveny hlavní konstrukční a provozní parametry a navržena základní technologie separace. Při návrhu bylo využito procesních dat získaných měření pomocí pilotního experimentálního zařízení v poloprovozních podmínkách na Elektrárně Pruněrov II. Pro návrh technologie byly provedeny základní tepelné a bilanční výpočty, upřesněny parametry a stanoveny spotřeby všech pracovních a pomocných látek a spotřeby energie. Po začlenění navrženého systému záchytu CO<sub>2</sub> do procesní technologie elektrárny byly provedeny optimalizační výpočty tepelného oběhu a výpočet účinnosti.

#### 3.1. Výsledky z laboratorních testů

Z výsledků provedených laboratorních analýz bylo zjištěno, že laboratorně připravené impregnované adsorbenty bez obsahu metanolu vykazovaly vždy nižší sorpční kapacitu než původní vzorek komerčního adsorbentu. U vzorků, které byly připraveny postupem impregnace z roztoku bez následného sušení při vyšší teplotě, totiž nedošlo k dostatečnému odpaření metanolu. Metanol přítomný na povrchu adsorbentu pravděpodobně napomáhal rozpouštění CO<sub>2</sub> a přispíval tak ke zvýšení kapacity některých impregnovaných vzorků oproti původní matici.

Toto zjištění bylo pro postup práce zásadní, protože v provozních podmínkách by za zvýšené teploty docházelo k těkání metanolu z povrchu adsorbentu. Tedy ani vzorky, které obsahovaly metanol a vykazovaly za podmínek okolí zvýšenou sorpční kapacitu, který pravděpodobně napomáhal rozpouštění CO<sub>2</sub>, by nebylo možné v provozních podmínkách spolehlivě použít. V závěru laboratorních experimentů proto bylo provedeno stanovení adsorpční kapacity a schopnosti regenerace pro vzorky dalších adsorbentů a pro aktivní uhlí AP4-50, které bylo použito v případě většiny impregnačních postupů.

Při provozních zkouškách pilotního zařízení a vlastních pilotních experimentech bylo využíváno právě aktivní uhlí pro případ, že by se podařilo připravit vhodný impregnovaný adsorbent na bázi aktivního uhlí, které bylo z vybraných komerčních sorbentů nejlevnějším materiálem. Ačkoli sorpční kapacita aktivního uhlí pro CO<sub>2</sub> nebyla vysoká, rotační pilotní adsorbér dovolil kompenzovat tuto nevýhodu nastavitelným časovým krokem otáčení, a tedy nastavitelnou dobou adsorpce.

#### 3.2. Výsledky pilotních testů

Pilotní testy na rotačním adsorbéru byly provedeny pro aktivní uhlí AP4-50 s modelovými a následně reálnými spalinami a pro molekulové síto Calsit s reálnými spalinami. Nejlepší dosažené hodnoty adsorpční kapacity (AK) a účinnosti záchytu při daných provozních podmínkách jsou uvedeny v tab. 3.

**Tab. 3** Adsorpce CO<sub>2</sub> na aktivním uhlí a molekulovém sítě na pilotním zařízení

**Tab. 3** CO<sub>2</sub> adsorption at activated carbon and molecular sieve estimated onto pilot scale equipment

Parametr	AU model	AU spaliny	MS spaliny	Jednotka
AK MIN	0,4	0,1	0,2	% hm.
AK MAX	0,56	0,5	0,3	% hm.
Účinnost MIN	58	45	56	%
Účinnost MAX	84	100	91	%
Teplota ADS	50	50	60	°C
Teplota DES	200	200	250	°C
Průtok plynu ADS	10	10	10	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Průtok plynu DES	10	30	40	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Doba rotace	120	120	120	s
Vstupní koncentrace CO <sub>2</sub> - průměrná	11,4	8,05	7,09	% obj.

#### 3.3. Výsledky z návrhu technologie adsorpčního záchytu CO<sub>2</sub>

Z výsledků provedených výpočtů lze soudit, že případná instalace technologie CCS bude mít zásadní dopady do ekonomie provozu elektrárny, a to jak do celkové vlastní spotřeby elektrické energie elektrárnou, tak i do vodního hospodářství i do samotného parního cyklu. Pro výpočtový případ integrace uvedené technologie do bloku 250 MWe Elektrárny Pruněrov II. dochází k snížení účinnosti elektrárenského bloku se záchytem CO<sub>2</sub> o 4,77 procentních bodů oproti účinnosti téhož bloku bez záchytu CO<sub>2</sub>. V porovnání se známými technologiemi záchytu na bázi chemické adsorpce se tento výsledek jeví velmi nadějně. Velkou předností adsorpční technologie oproti adsorpčním technologiím (aminy a amoniak) je malá vlastní spotřeba elektrické energie a netoxicity sorpčního materiálu. Z jediného výpočtového případu nelze však činit závěry o potenciálu adsorpčního záchytu pro komerční průmyslové uplatnění adsorpčního záchytu v energetických provozech. Je třeba vzít v úvahu i tu skutečnost, že přesnost a věrohodnost výsledků výpočtů závisí na přesnosti a věrohodnosti vstupních dat, které jsou z části přebírány z poloprovozních experimentů. Jeví se však velmi žádoucí dále pokračovat ve výzkumu adsorpčního záchytu jako jedné z možných cest technologií post-combustion záchytu CO<sub>2</sub>.

### 3.4. Výsledky ekonomické analýzy

Na základě ekonomické analýzy bylo vyhodnoceno, že začlenění technologie CCS se záchytem na bázi adsorpce do uhelné elektrárny má vliv na:

- zvýšení investičních nákladů o 27 % oproti investičním nákladům nového bloku bez CCS,
- snížení ročních provozních nákladů o 5 % (zejména díky snížení nákladů na emisní povolenky CO<sub>2</sub>),
- zvýšení výrobní ceny elektřiny o 31 %, respektive střední měrné ceny elektřiny o 22 %,
- náklady za separovanou tunu CO<sub>2</sub>, které odpovídají výši 20 USD za 1 t CO<sub>2</sub>.

Součástí posouzení integrace CCS technologie byla i citlivostní analýza na změnu klíčových technicko-ekonomických parametrů. Hlavní závěry citlivostní analýzy, které nejvýznamněji ovlivňují použitá ekonomická kritéria, jsou:

- výše investičních nákladů pro CCS technologii,
- cena paliva,
- doba ročního využití zdroje,
- doba životnosti zdroje.

V další části řešení byly získané výsledky ekonomického hodnocení a hodnoty ekonomických kritérií porovnány s upravenými ekonomickými parametry technologií analyzovaných v projektu FR-TI1/379, řešeném v ÚJV Řež, a. s. v letech 2010 - 2013. Pro porovnání s navrženou adsorpční technologií byly vybrány tyto varianty:

- uhelná elektrárna s CCS technologií oxyfuel a integrovanou WTA suškou,
- uhelná elektrárna s CCS technologií na bázi adsorpce, konkrétně amoniakové vypírky.

Z důvodu změny některých ekonomických parametrů od doby zpracování studie FRTI1/379 (vliv změny cen, kurzů USD a EUR, inflace atd.) a některých dalších rozdílů bylo nutné vstupní provozně ekonomické parametry odpovídajícím způsobem upravit. Podrobnosti jsou v citované zprávě.

Hlavní závěry z porovnání provedeného podle velikosti hodnot ekonomických kritérií 3 variant CCS technologií jsou následující:

- Ekonomicky nejvyšší výhodnosti dosahuje varianta se záchytem CO<sub>2</sub> na bázi adsorpce. Dosahuje nejnižší hodnoty ekonomických kritérií ve 3 ze 4 případů. Konkrétně dosahuje:
  - nižších výrobních nákladů elektřiny o cca 15 - 18 % ,
  - nižších nákladů na separovanou tunu CO<sub>2</sub> o cca 40 - 45 %
  - nižších CAPEX o cca 12 - 17 % oproti variantám Oxyfuel s WTA a Amoniak.
- Provozně nejehospodárnější, tj. s nejnižší hodnotou kritéria OPEX, je varianta Oxyfuel s WTA.
- Rozdíl hodnot ekonomických kritérií mezi technologiemi Oxyfuel s WTA a Amoniak dosahuje cca 5 % u všech kritérií ve prospěch varianty Oxyfuel s WTA.

Studie naznačuje, že varianta s adsorpčním záchytem má značný ekonomický potenciál. Je dán především:

- nižšími investičními náklady na pořízení a integraci CCS technologie,
- nízkými provozními náklady této technologie, ve srovnání s variantou Amoniak, vlivem:
- nižší ztráty výkonu parní turbíny v důsledku odběru tepla pro technologii CCS,
- nižší vlastní spotřebou elektřiny pomocných zařízení CCS technologie,
- nízkou spotřebou/potřebou doplňování používaného sorbentu,
- relativně nízkou cenou používaných médií pro CCS technologii.

Získané hodnoty ekonomických kritérií naznačují, že CCS technologie na bázi procesu adsorpce, realizovaná v podmínkách ČR se specificky nízkou cenou uhlí, má vysoký potenciál dosáhnout cíle stanoveného zahraničními výzkumnými týmy pro separační proces. Za přijatelné je považováno, pokud integrace CCS technologie do uhelné elektrárny bude mít za důsledek navýšení střední výrobní ceny elektřiny maximálně o 35 % a náklady na separovanou tunu CO<sub>2</sub> budou činit maximálně 1,5 násobku ceny emisní povolenky CO<sub>2</sub> na trhu při separačním faktoru CO<sub>2</sub> rovném 90 % a vyšším.

## 4. Závěr

Na základě poznatků získaných při řešení problematiky separace CO<sub>2</sub> z elektrárenských spalin v podmínkách ČR je žádoucí podpořit další výzkum záchytu CO<sub>2</sub> ze spalin technologiemi na bázi adsorpce. V porovnání s ostatními technologiemi záchytu CO<sub>2</sub> ze spalin elektráren se jeví adsorpční technologie ekonomicky příznivější, a tedy perspektivní. Výběr nebo příprava vhodných adsorpčních materiálů pro navrženou technologii je přitom klíčovou problematikou.

## Poděkování

Práce byla realizována s podporou Technologické agentury ČR formou dotačního projektu TA 02020205 (2011 – 2015).

## Literatura

1. International Energy Agency. IEA Statistics - CO<sub>2</sub> Emissions from Fossil Fuel Combustion: Highlights. 1. vyd. Luxembourg: International Energy Agency, 2011 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf>
2. U. S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2011. 1. vyd. Washington: EIA, 2011.
3. Olajire, A. A. CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review. Energy 2010, 35 (6), 2610-2628.

4. Bezzera, D. P.; Oliveira, R. S.; Vieira, R. S.; Calvalcante., C. L.; Azevedo, D. C. S. Adsorption of CO<sub>2</sub> on nitrogen-enriched activated carbon and zeolite 13X. *Adsorption* 2011, 17 (1), 235-246.
5. Chatti, R.; Baniswal, A. K.; Thote, J. A.; Kumar, V.; Jadhav, P.; Lokhande, S. K.; Biniwale, R. B.; Labhsetwar, N. K.; Rayal, S. S. Amine loaded zeolites for carbon dioxide capture: Amine loading and adsorption studies. *Microporous and Mesoporous Materials* 2009, 121 (1-3), 84-89.
6. Vávrová, J.; Cíahotný, K. Příprava a charakterizace adsorbentů pro záchyt CO<sub>2</sub> z modelových plynů. *Paliva* 2011, 3 (4), 126-132.

### Summary

*Jana Smutná<sup>1</sup>, Jiří Štefanica<sup>1</sup>, Karel Cíahotný<sup>2</sup>,  
Olga Ubrá<sup>1</sup>, Veronika Vrbová<sup>2</sup>, Pavel Machač<sup>2</sup>,  
Lukáš Pilař<sup>3</sup>, Monika Vitvarová<sup>3</sup>*

*ÚJV Řež, a. s.<sup>1</sup>  
VŠCHT Praha<sup>2</sup>  
ČVUT v Praze<sup>3</sup>*

### ***Adsorption of CO<sub>2</sub> from Power Plant's Flue Gas on Solid Sorbents***

Adsorption-based separation of CO<sub>2</sub> from flue gas originating from lignite power plant was designed considering conditions of the Czech Republic. The technology was tested in pilot scale with model gas mixture and then was operated with real flue gas. The results obtained from pilot-scale experiments were used for technical design of CO<sub>2</sub> adsorption from flue gas for a given power plant and local fuel. Then, optimization and integration with power plant was carried out and main economic criteria of power plant with CCS were evaluated.