

Záchyt CO₂ – technologie, projekt TAČR.

Ústav energetiky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze

L. Pilař



Obecný popis CCS/CCUS

Obecný řetězec pro zachyt a ukládání/využití CO₂:

- **CC** – zachycení (separovat, vyčistit, upravit na parametry transportu)
– u zdroje
- **T** – transport
- **U** – využití – u zdroje i mimo něj
- **S** – uskladnění – u zdroje/většinou mimo něj



Obr.: Schéma technologie CCS

(Zdroj: <http://www.powerengineeringint.com/articles/2015/01/top-utilities-pull-out-of-eu-ccs-project.html>)

Základní metody separace CO₂

Post-combustion (po spálení)

- = zachycování CO₂ ze spalin po spalování paliva vzduchem v běžných (stávajících) spalovacích zařízeních.

Oxy-fuel (spalování v kyslíku)

- (oxy-combustion, oxy-firing, oxy-fuel a denitrogenation)

Pre-combustion (před spálením)

- = zachycení uhlíku ve formě CO₂ před spalovacím procesem

Chemical looping

- chemická smyčka; podle provedení v kterákoliv z předchozích

Post combustion technologie

Absorbční procesy

fyzikální a chemické = vypírání kapalným absorbentem (rozpuštědlo nebo chemický reagent)

Adsorpční procesy

fyzikální a chemické = adsorpce na povrchu tuhé látky
fyzikální sorbent – aktivní uhlí, molekulová síta atd.
(chemická vazba – CaO, NaOH a další)

Fyzikální separace

(např. membránová, kryogenní aj.)

Biologický záchyt – fotosyntéza

(řasy, **enzymy**, nanočástice)



Možná průmyslová aplikace

Další nové metody

(např. elektrochemické)



Slibný vývoj spolu s aminy



Post combustion technologie

proces	výhody	nevýhody
absorpce	<ul style="list-style-type: none">• běžně užívaná technologie pro účinné (50-100%) odstranění CO₂ a H₂S ze syntézního plynu• sloučeniny, které vznikají reakcí s SO₂ a NO_x (síran amonný a dusičnan amonný) jsou prodejné produkty, použitelné jako průmyslové hnojivo.• Velký vývoj a vysoká aplikovatelnost – stupeň vývoje TRL9• Nižší vlastní spotřeba elektřiny na úpravu separovaného CO₂.• Vysoký separační faktor až 95%	<ul style="list-style-type: none">• použití fyzikální absorpce vyžaduje vysokou koncentraci CO₂ ve zpracovávaném plynu• chemická absorpce je při nižších koncentracích CO₂ ve zpracovávaném plynu pomalá• Vyžaduje vysoké předčištění plynu. Vlivem koncentrací SO₂ a NO_x dochází k tvorbě tepelně stabilních solí – zamezení regenerace sorbentu.• Degradace pomocí O₂• Nízká teplota absorpce u amoniaku a vysoká teplota desorpce u aminů• Vysoká vlastní spotřeba elektrické energie pomocných systému (chlazení)• Korozivní vlastnosti, toxicita• Vyšší spotřeba vody – chlazení procesní vody• Odpady – v kategorii N – nebezpečný odpad
adsorpce	<ul style="list-style-type: none">• Nižší spotřeba tepla na desorpci• Sorbenty nejsou toxické, korozivní• Pevná fáze – bezpečná manipulovatelnost a skladování• Nízká spotřeba vody• Stupeň vývoje TRL 6 - 7	<ul style="list-style-type: none">• obtížná regenerace reakčního činidla• komplikovanější ohřevu sorbentu - desorpce• nižší stupeň zachytu CO₂, až 80 %• Vyšší vlastní spotřeba elektřiny na kompresy, dle typu využití separovaného CO₂• Nutnost předčištění spalin, zanášení sorbentu.

Post combustion technologie

proces	výhody	nevýhody
membránová separace	<ul style="list-style-type: none"> • jednoduché, levné řešení • prostorově nenáročné • relativně vysoká účinnosti separace (až 90%) • vysoká čistota výstupního CO₂ až 95% • nízká spotřeba vody (chlazení) • Stupeň vývoje TRL 6 - 7 	<ul style="list-style-type: none"> • nutná tlaková diference spalin/plynu/syngasu • část procesu pracuje v podtlaku • nižší účinnost při obsahu CO₂ nižší než 5% • nutnost doplnění technologie předčištění spalin (zejména separace vody a pevných částic) • silná závislost mezi návrhovými parametry membrán (selektivita x permabilita)
kryogenní separace	<ul style="list-style-type: none"> • kapalný produkt na výstupu z procesu • vysoká čistota CO₂ (až 99%) • energeticky efektivnější separační procese pro spaliny/syngas/plyn s vysokým obsahem CO₂ (vyšším než 70%) • variabilita výstupních parametrů při zachování nízkých energetických nároků (čerpadla – tlaky/teploty/čistota média). • nepotřebuje dodatečnou čistící technologii 	<ul style="list-style-type: none"> • energeticky velmi náročné • omezený/limitní separační faktor (max. 85% CCR) • omezený scale-up v závislosti na požadovaném separačním faktoru (nutnost úpravy celého konceptu separačního procesu) • složitost systému (při integraci rekuperace tepel za účel úspory chladicího výkonu) • ve srovnání s ostatními technologiemi pracuje při vyšších tlacích • Stupeň vývoje TRL 5

Přehled dostupných technologií

Hodnotící parametr/Firma	Aker	C-Capture	Svante	Saipem Canada Inc	Air Products
TRL	9	7-8	8-9	9	7
Země licencování	EU/Norsko	EU/Norsko	Kanada/USA	Kanada/USA	USA/EU/Norsko
Spotřeba ex. tepla	ANO (~130 °C)	ANO (~130 °C)	ANO (~80 °C)	ANO (~80 °C)	NE
Spotřeba el.	ANO (nízká)	ANO (nízká)	ANO (nízká)	ANO (nízká)	ANO (střední)
Variabilita výstupního produktu	ANO (střední)	ANO (střední)	ANO (nízká)	ANO (střední)	ANO (vysoká)
Provozní zkušenosti	ANO*	NE	ANO	ANO	ANO
Modulární uspořádání	ANO	ANO	NE	NE	ANO
Provozní náklady (spotřeby médií)	střední	střední	nízké	nízké	velmi nízké
Kapacita modulů	25 až 273 tCO ₂ /d	až 273 tCO ₂ /d	30 až 3000 tCO ₂ /d	1 až 30 tCO ₂ /d	1 až 5 tCO ₂ /d (návrhy i pro 2000 tCO ₂ /d)

Projekt CCS - TAČR

Název: Nízkoemisní technologie energetického využití biomasy a alternativních paliv

Cíle projektu:

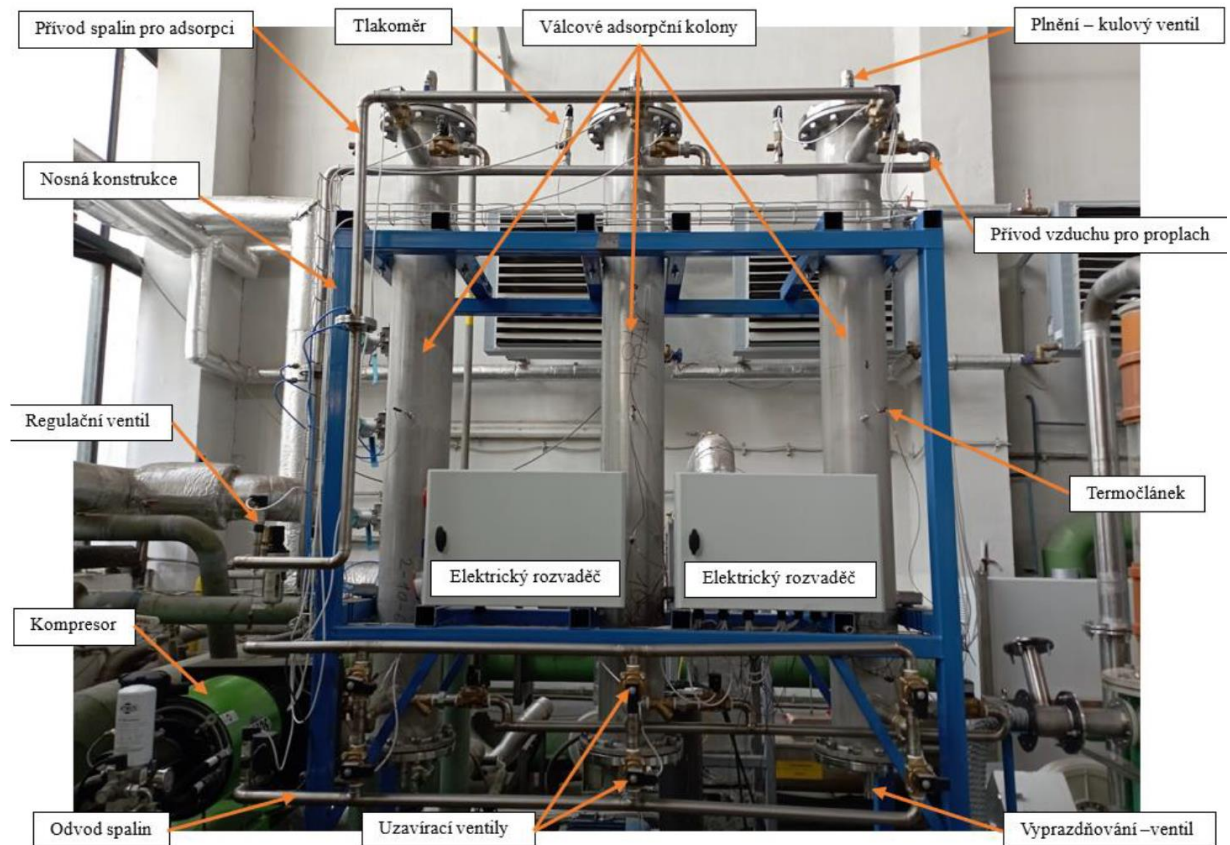
- Realizovat pilot-scale demonstrativní jednotku pro biopaliva a alternativní paliva
- výzkum vhodných (levných) alternativních adsorbentů.

Doba řešení projektu: 01/2020 – 12/2025

Projekt CCS - TAČR

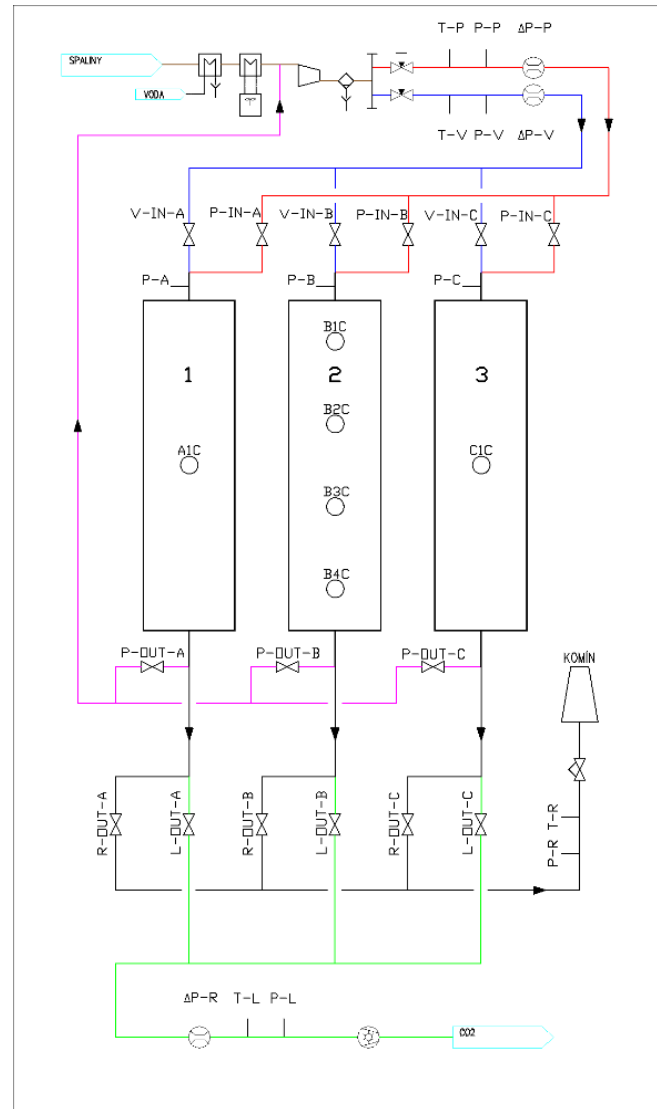
Adsorpční jednotka záchytu CO₂ – VPSA

- Napojení za LF a SCR – „tail end“ – Ti/V
- 5 – 50 m³/h, 5 bar přetlak, teplota spalin 5°C



Projekt CCS - TAČR

Adsorpční jednotka záchytu CO_2 – VPSA



Projekt CCS - TAČR

Stav řešení projektu:

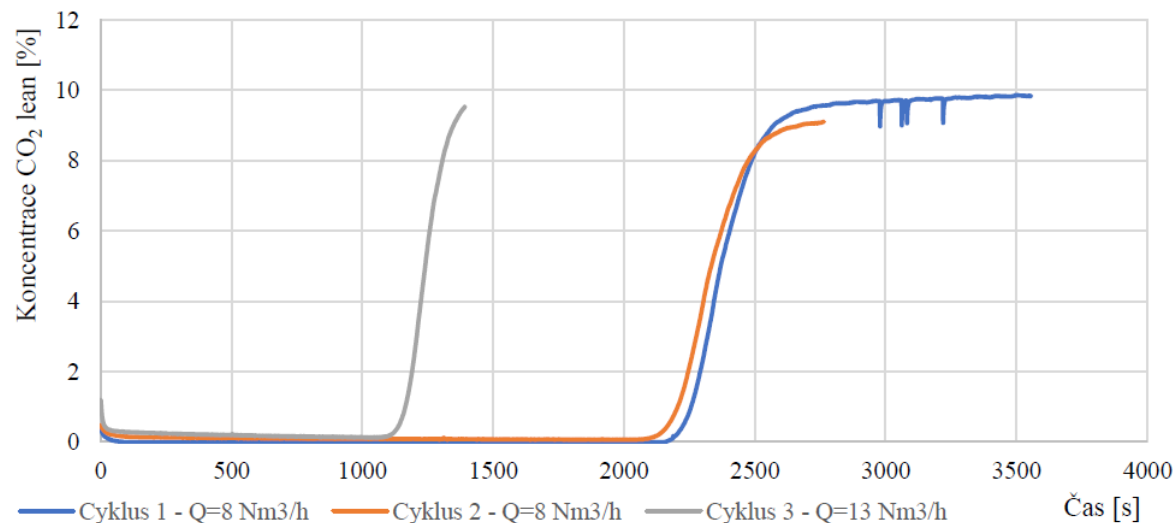
- Pilotní jednotka pro záchyt CO₂ – **v provozu**
- Otestována adsorpce – **Zeolit 13X** – průmyslově aplikovaný sorbent
- Testy na dřevních peletách
- Provedení stanovení sorpční kapacity v laboratoři se sorbenty na bázi syntetického zeolitu, kaolínu a metakaolínů.
- Pokus o granulaci experimentálních adsorbentů

Projekt CCS - TAČR

Výsledky – Provedeno několik testů se zeolitem 13X – vstup

Vstupní hodnoty měření

Cyklus		1	2	3
Přebytek kyslíku ve spalinách	O_2 [%]	7,223	7,903	7,412
Přebytek vzduchu	α [-]	1,524	1,603	1,545
Koncentrace CO_2 ve spalinách	φ_{CO_2} [%]	12,207	11,516	11,987
Průtok spalin	Q_V [Nm ³ /h]	8	8	13,5
Průměrný adsorpční tlak v koloně	p_{ads} [bar]	3,937	3,918	3,873
Parciální tlak CO_2	p_{CO_2} [bar]	0,481	0,451	0,464
Průměrná teplota v adsorbéru	t_{ads} [°C]	28,78	28,29	27,62



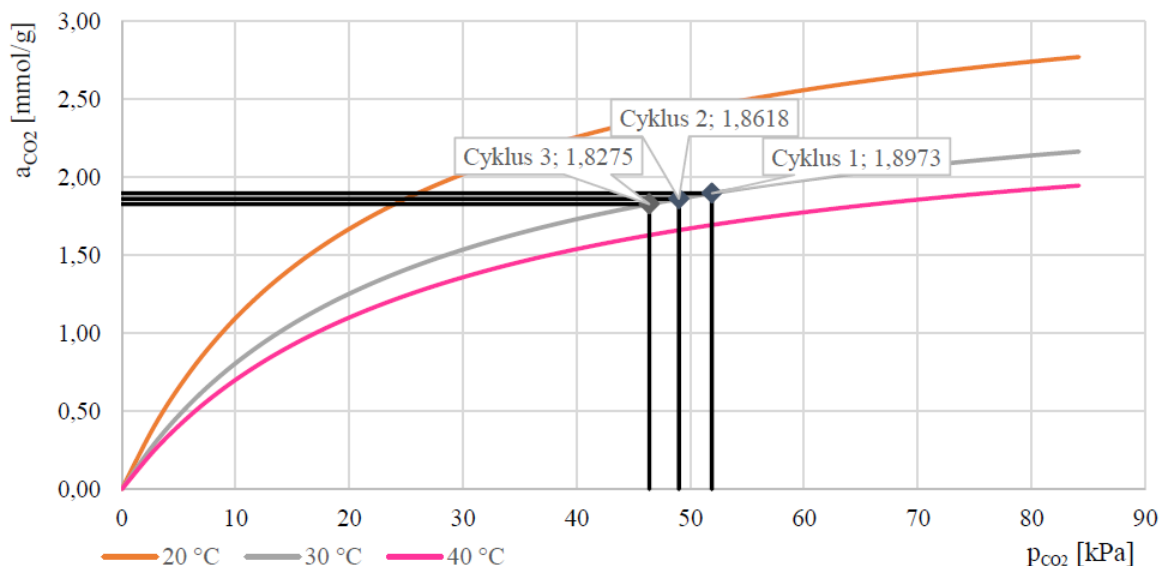
Projekt CCS - TAČR

Výsledky – Provedeno několik testů se zeolitem 13X – výstup

- Maximální obsah CO₂ ve výstupním plynu byl **46 %**

Vyhodnocení experimentálních dat

Cyklus		1	2	3
Odečítaná izoterma	t [°C]	30	30	30
Parciální tlak CO ₂	p_{CO_2} [bar]	0,481	0,451	0,464
Rovnovážná adsorpční kapacita	a_e [mg/g]	83,52	81,96	80,44
Max. hmotnost zachyceného CO ₂	$m_{CO_2}^{max}$ [kg]	3,34	3,28	3,22
Zachycený objem CO ₂	$Q_{CO_2}^{měř}$ [Nm ³]	0,712	0,616	0,563
Hmotnost CO ₂ zachycená do průrazu	$m_{CO_2}^{průraz}$ [kg]	1,141	1,021	0,93
Skutečná hmotnost zachyceného CO ₂	$m_{CO_2}^{měř}$ [kg]	1,389	1,202	1,098



Projekt CCS - TAČR

Závěr

- Jednotka VPSA byla zprovozněna, provedeny první testy.
- Referenční sorbent byl otestován Zeolit 13 X – průmyslově ověřený sorbent
- Výsledky testů ukazují **38 – 46 %** čistotu CO₂.
- Klíčovými parametry je tlak adsorpce, čím vyšší tím vyšší záchyt, ale tím vyšší spotřeba energie a následně desorpce, nutný nízký tlak.
- Je nutné minimalizovat přisávání vzduchu a optimalizovat proces desorpce.

Děkuji za pozornost

lukas.pilar@fs.cvut.cz