

## POSUZOVÁNÍ ŽIVOTNÍHO CYKLU TECHNOLOGIE ZÁCHYTU CO<sub>2</sub> VYSOKOTEPLTNÍ KARBONÁTOVOU SMYČKOU

Kristína Zakuciová<sup>a,b</sup>, Vladimír Kočí<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Vysoká škola chemicko-technologická, Ústav technologie ochrany životního prostředí,

<sup>b</sup>Centrum Výzkumu Řež, s.r.o., Husinec-Řež  
zakuciok@vscht.cz

*Príspevek je zaměřen na aktuální výsledky studie posuzování životního cyklu karbonátové smyčky. Karbonátová smyčka je technologický postup mající za účel záchyt emisí CO<sub>2</sub> ze spalin generovaných tepelnou elektrárnou. V příspěvku jsou představeny výstupy z metody posuzování životního cyklu (Life Cycle Assessment) karbonátové smyčky v návaznosti na 250 MWe elektrárenský blok.*

*Klíčová slova: Posouzení životního cyklu, záchyt CO<sub>2</sub>*

Došlo 14. 07. 2017, přijato 12. 09. 2017

### 1. Úvod

Cílem nízkouhlíkové ekonomiky je vhodným způsobem propojit technologie s nízkou produkcí skleníkových plynů napříč všemi průmyslovými sektory. V rámci SET plánu (Strategy Energy Technology Plan) Evropské komise bylo navrženo několik základních cest vedoucích k dosažení nízkouhlíkové ekonomiky. Jednou z navržených cest je rozvoj a dosažení konkurenceschopnosti technologií záchytu a ukládání CO<sub>2</sub>, tzv. Carbon Capture a Storage (CCS). Tato cesta navazuje na cíl Pařížské konference o klimatu, oficiálně *21st Conference of the Parties (COP)* Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu *United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC*, která představila snížení vlivů lidské společnosti na průměrnou teplotu Země jako jeden ze svých cílů [1]. Úmluva v rámci iniciativy Kjótského protokolu vede k podpoře celkového snižování emisí CO<sub>2</sub>, a to právě inovativními technologiemi CCS.

Metoda posuzování životního cyklu (LCA) je vhodný nástroj hodnocení CCS technologií z pohledu surovinového, environmentálního i socio-ekonomického. Studie LCA jsou mimo jiné doporučovány z toho důvodu, že posuzují daný systém z pohledu jeho očekávané funkce, který definují vždy konkrétní funkční jednotkou. Studie LCA jsou založeny na zhodnocení všech materiálových a energetických vstupů a výstupů posuzovaného systému, čímž je vytvořen obsáhlý model umožňující tvoření alternativních scénářů. Výstupy inventarizačních analýz či hodnocení dopadů životního cyklu umožňují vytýčení slabých míst či zdrojů environmentálních škod daného technologického systému [2]. Co se týče technologií záchytu CO<sub>2</sub>, uvažuje se především na následujících 3 technologiích:

Post-combustion – CO<sub>2</sub> je zachytáván ze spalin až následně po úplném spalení paliva;

Pre-combustion – CO<sub>2</sub> je odstraňován ze spalin ihned po fázi zplynění;

Oxyfuel – palivo je spalováno v prostředí kyslíku, nikoli vzduchu, a tak dochází ke vzniku především CO<sub>2</sub> a vody.

Do současnosti byly z pohledu LCA hodnoceny především technologie post-combustion záchytu CO<sub>2</sub> s použitím sorbentu 2-aminoethanolu. V poslední době však nabývá na významu výzkum zabývající se využitím CaO v karbonátové smyčce. Ve své studii z roku 2016 ukazuje Clarens et al, 2016 [3] CaO v karbonátové smyčce jako smysluplnou alternativu na aminoethanolu založeném schématu záchytu CO<sub>2</sub>. Clarens ve své práci srovnává různé technologie, nevyšlují však potenciální environmentální dopady použití karbonátové smyčky. V tomto příspěvku hodláme prezentovat některé výsledky hodnocení environmentálních dopadů dvou základních scénářů provozu 250 MWe elektrárny v ČR: bez a s aplikací karbonátové smyčky pro záchyt CO<sub>2</sub>.

### 2. Experimentální část

#### 2.1. Technologický popis modelové elektrárenské jednotky

Za modelovou elektrárenskou jednotku se považuje zmodernizovaný 250 MWe blok Pruněrovské elektrárny. Elektrárny Pruněrov jsou největším uhelným elektrárenským komplexem v České republice. Předpokládá se průtlačný parní kotel s přehříváčem páry ve dvoutahovém uspořádání. Kotle mají výkon 660 t/h páry, jejíž parametry jsou 18,3 MPa/575 °C. Jsou bubnové, s přirozenou cirkulací, granulační, s přímým foukáním prášku do spalovací komory, s membránovými stěnami, přihříváním páry a s předehřevem spalovacího vzduchu v rotačních ohříváčích typu Ljungström. Parní turbíny 210 MW jsou akční, kondenzační, jednohřídelové, třítělesové, se sedmi neregulovanými odběry pro regenerační ohřev kondenzátu, ohřívání vzduchu pro kotel a vody pro vytápění objektů elektrárny a dodávku do okolí.

Přes blokové transformátory 240 MVA, 15,75/400 kV se výkon elektrárny vyvádí dvěma linkami 400 kV. Vzhledem k tomu, že se s plným provozem obou energetických celků počítá i v dalších letech, byly elektrárny Pruněrov I a Pruněrov II odsířeny. U obou byla použita metoda mokré vápencové vypírky. V současnosti

se připravuje modernizace Elektrárny Pruněrov II. Navazuje na první vlnu ekologizace provedenou v 90. letech. Předpokládá modernizaci tří současných bloků a zvýšení jejich jednotkového výkonu na 250 MWe.

## 2.2. Posuzování životního cyklu

Metoda posuzování životního cyklu (Life Cycle Assessment - LCA) je nástrojem umožňujícím posuzovat potenciální environmentální dopady různých produktů, služeb či technologií. Touto metodou je tedy možné posuzovat environmentální aspekty výroby elektrické energie či spalovacích procesů. Mezinárodní normy ČSN ISO 14040 and ČSN ISO 14044 charakterizují metodu LCA jako analýzu od kolébky do hrobu, která zahrnuje všechny fáze životního cyklu produktu a umožňuje tak holistické hodnocení daného produktu či technologie a to především z environmentálního hlediska. Metoda LCA se dělí na čtyři následující fáze: definice cílů a rozsahu, inventarizační analýza, hodnocení dopadů a interpretace životního cyklu. Více podrobností o metodě LCA ve vztahu k CCS technologiím lze získat v následující publikaci [4]. Ve studii byly využity dvě hlavní metody hodnocení, a to CML 2001 a ReCiPe. Obě metody jsou definovány různými kategoriemi dopadu na životní prostředí. Pro CML metodu uvažujeme:

- Úbytek fosilních surovin – anglicky „abiotic depletion of fossils“ (ADP fossils) [MJ];
- Acidifikace- anglicky „acidification potential“ (AP) [kg SO<sub>2</sub>-Equiv.];
- Globální oteplování – anglicky „global warming potential“ (GWP) [kg CO<sub>2</sub>-Equiv.].

Jednotlivé kategorie dopadu jsou popisovány charakterizačními jednotkami. Například pro kategorii GWP je to kg-CO<sub>2</sub> Equiv.

Pro ReCiPe metodu uvažujeme kategorie dopadu, které jsou charakterizovány indikátory dopadu (měřitelná veličina s jasně definovanými jednotkami) na midpointové úrovni (potenciální škodlivost indikátoru na základě jeho chemicko-fyzikálních biologických vlastností). Hlavní uvažované kategorie dopadu jsou:

- Půdní acidifikace – anglicky „terrestrial acidification“ (TA) [kg SO<sub>2</sub> eq];
- Změna klimatu - anglicky „climate change“ (CC) [kg CO<sub>2</sub>-Equiv.];
- Úbytek fosilních surovin – anglicky „fossil fuel depletion“ (FD) [kg oil eq].

### 2.2.1 Definice cílů a rozsahu

Hlavním cílem studie bylo porovnat environmentální dopady zachytu CO<sub>2</sub> z emisí vznikajících v typické provozované 250 MWe elektrárně v ČR. Posuzovaný environmentální profil zahrnuje dva hlavní scénáře: 1) hodnocení environmentálních dopadů ročního provozu elektrárny bez zachytu CO<sub>2</sub>; 2) hodnocení environmentálních dopadů ročního provozu elektrárny se zachytem CO<sub>2</sub> pomocí karbonátové smyčky.

### 2.2.2 Funkční jednotka

Zvolenou funkční jednotkou pro posuzování systému byl energetický výstup pro danou energetickou jednotku 250 MWe.

### 2.2.3 Hranice systému

Hranice systému zahrnují celý řetězec získávání paliva a končí produkcí elektrické energie. Zahrnuty jsou procesy získávání primární suroviny, produkci hnědého uhlí, spalování a odsiřování. Co se týče adsorbentu, do posuzovaného systému byl zahrnut celý produktový řetězec produkce adsorbentu: těžba a doprava vápence, jeho užití a nakládání se vznikajícími odpadními toky. Co se týče systému zachytu CO<sub>2</sub>, pouze jeho zachyt a separace je součástí posuzovaného systému. Ukládání CO<sub>2</sub> není předmětem studie.

### 2.2.4 Inventarizační analýza

Následující tabulka shrnuje ve studii použité jednotkové procesy. Jedná se o procesy z databáze Professional DB GaBi. Ostatní specifické procesy a toky byly adaptovány na základě výstupů výzkumu UJV Řež [5].

**Tab. 1** Použité jednotkové procesy

**Tab. 1** Used process units

Jednotkové procesy	Databázové procesy
Produkcce hnědého uhlí	Lignit EU-27
Produkcce paliva pro transport	Diesel (rafinace) produkty
Transport	Nákladní vůz, Euro 4 Vlak s nákladem
Produkcce termální energie	Termální energie ze zemního plynu
Produkcce vápence	Produkční mix vápence (těžba a čištění)
Produkcce elektrické energie	Český energetický mix
Produkcce vody	Produkcce procesní vody dle evropských standardů EU-27
Čištění odpadních vod	Technologie čištění odpadních vod dle evropských standardů EU-27

## 2.3. Hodnocené scénáře

Jak už bylo načrtnuto v předcházejících kapitolách, hodnoceny jsou dva základní scénáře, a to samostatná energetická jednotka a energetická jednotka spojená s karbonátovou smyčkou. Druhý scénář se dále dělí na další podscénáře:

- Vápenec se bude zahřívát pomocí energie, která je produkována spalováním hnědého uhlí (scénář 2.1).
- Vápenec se bude zahřívát externím zdrojem zemního plynu (scénář 2.2).
- Vápenec se bude zahřívát externím zdrojem zemního plynu a tepelná energie z karbonatace bude plně využita ve formě páry (scénář 2.3).

## 2.4. Přijaté předpoklady a data pro hodnocené scénáře

Na základě hodnocených scénářů byly přijaty následující předpoklady:

- Efektivita zachytu CO<sub>2</sub> je 90 procent;
- Elektrárnská jednotka bez zachytu je modelována bez odsiřování;
- Pro separaci kyslíku ze vzduchu byl navrhnut proces kryogenní separace;
- CaSO<sub>4</sub> na konci cyklů karbonatace a kalcinace je inertním odpadem, který bude skladován na skládce;
- Termální energie z karbonatace je ve formě páry;
- Transport hnědého uhlí do elektrárny bude zajištěn vlakovou dopravou ve vzdálenosti 100 km;
- Transport zpracovaného vápence do elektrárny bude zajišťován nákladní dopravou ve vzdálenosti 120 km.

Sběr dat můžeme rozdělit na tři základní skupiny:

1. Data pro 250 MWe elektrárnskou jednotku.
2. Vstupní data pro karbonátovou smyčku.
3. Vstupní data pro kyslíkárnu.

Následující tabulky znázorňují jednotlivá vstupní data, která jsou popsána v projektové zprávě [5] pro danou energetickou jednotku.

**Tab. 2** Vstupní data pro elektrárnskou jednotku

**Tab.2** Input data for power unit

Vstupy	Hodnoty	Jednotky/rok
Hnědé uhlí	1348200	t
Provozní čas	6300	hod.
Výhřevnost uhlí	16,1	MJ

**Tab. 3** Materiálové bilance pro karbonátovou smyčku

**Tab. 3** Material balance for carbonate loop

Materiál	Hodnoty	Jednotky/rok
CaCO <sub>3</sub>	1198125,00	t
CaO	670950	t
Předpokládaný 90% zachycený CO <sub>2</sub>	1196370	t

**Tab. 4** Materiálové bilance pro kyslíkárnu

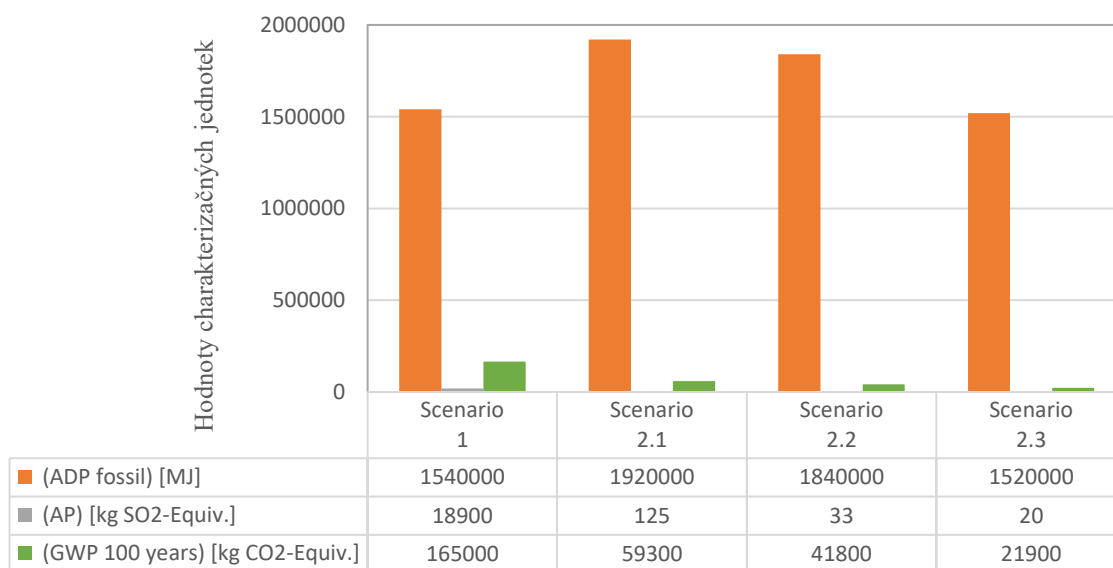
**Tab. 4** Material balance for oxygen unit

Materiál	Hodnoty	Jednotky/rok
Kyslík	1797136,98	t
Vzduch	6013151550,00	t
Voda na chlazení	33284160	m <sup>3</sup>
Dusík	5944594,6	t
Pára	42210	t

## 3. Výsledky a diskuse

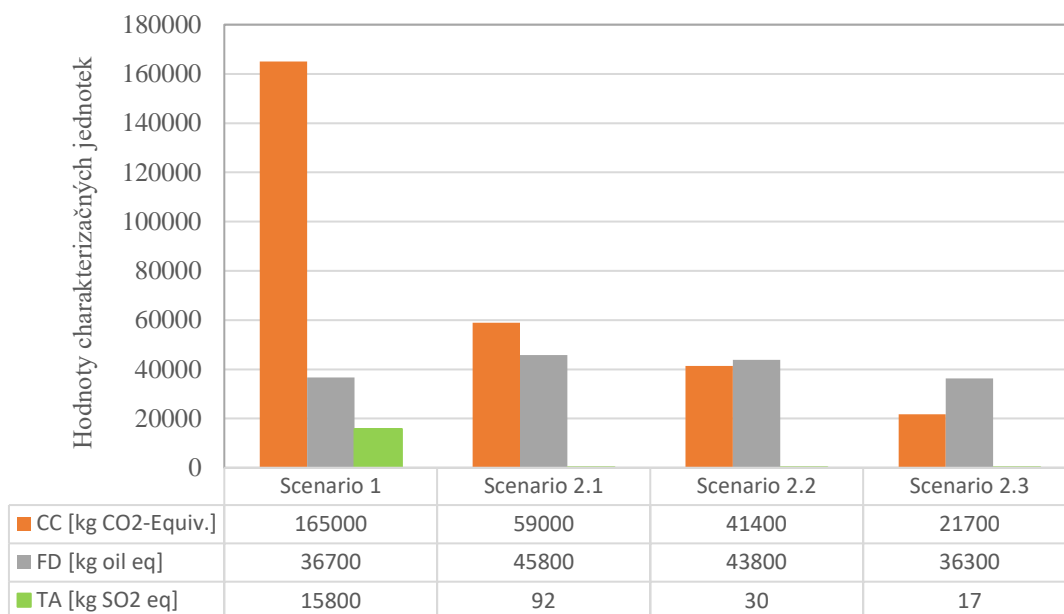
Výsledky charakterizace pro CML metodu a Re-CiPe jsou graficky uvedeny v následujících grafech (obr. 1 a obr. 2). Výslední hodnoty jsou zobrazeny ve formě charakterizačních jednotek.

CML metoda vykazuje nejvyšší hodnoty pro tři fundamentální kategorie dopadu, a to ADP, GWP a AP. Nejvyšší hodnoty jsou vykazovány v rámci ADP kategorie a konkrétně pro scénář 2.1. V rámci GWP nejvyšší hodnoty jsou v rámci scénáře 1. Hodnotově menší kategorie AP s velkým rozdílem oproti zmíněným kategoriím vykazuje signifikantně nejvyšší hodnoty ve scénáři 1.



**Obr. 1** Výsledky charakterizace pro CML metodu

**Fig. 1** Characterization results for CML method

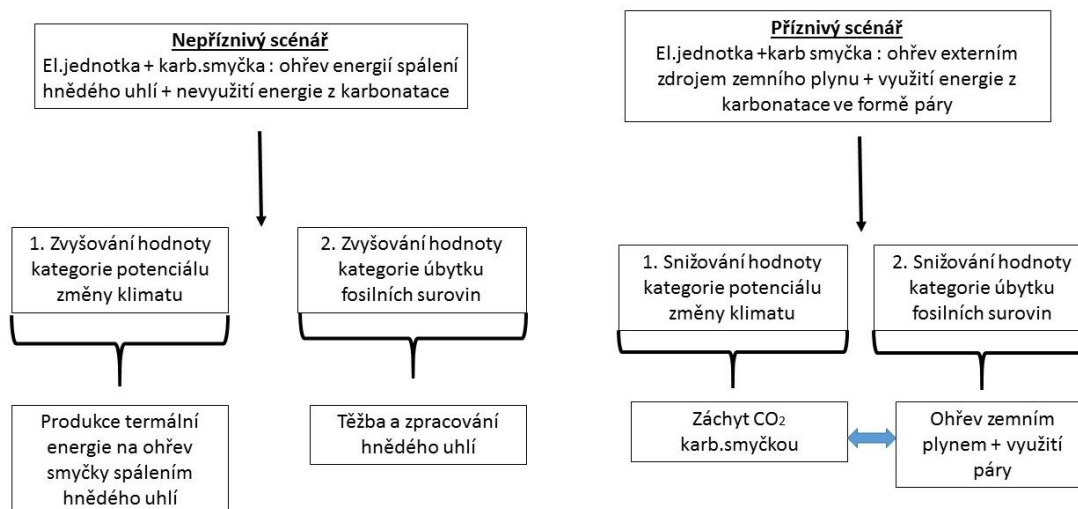


**Obr. 2** Výsledky charakterizace pro ReCiPe metodu  
**Fig. 2** Characterization results for ReCiPe method

Úbytek fosilních surovin představuje při hodnocení CML metodou největší problém, a to hlavně v případě pokud zdrojem pro ohřev vápence by bylo spalování hnědého uhlí. Je to zejména způsobeno intenzivní těžbou uhlí a logistikou, která se vztahuje k managementu těžby a zpracování. Poněkud nižší hodnoty pro úbytek fosilních surovin se vztahují ke scénáři, kde se vápence zahřívá zdrojem zemního plynu a tepelná energie z karbonátové smyčky. V tomto případě se navíc snižují hodnoty pro kategorii potenciálu globálního oteplování kvůli snížení emisí spojených se spalováním hnědého uhlí. Oproti scénáři 1 je však relevantní pokles ve všech scénářích hodnot kg CO<sub>2</sub>-Equiv., což je důkazem primární funkce karbonátové smyčky. V rámci hodnot acidifikace, scénář 1 nezahrnuje desulfurizaci v rámci elektrárenské jednotky. Tento scénář byl navrhnout pro ukázkou, jak by mohla karbonátová smyčka výrazně environmentálně přispět zároveň jako desulfurizační jednotka. Tím by mohla plnit funkci jak pro zachyt CO<sub>2</sub>, tak i desulfurizaci spalín. V souhrnu scénář se zdrojem tepla zemním plynem a využitím odpadního tepla ve formě páry se jeví jako nejšetrnější v rámci dopadů na životní prostředí. ReCiPe metoda (obr. 2) vykazuje nejvyšší hodnoty v rámci kategorií dopadů CC, FD a TA. V rámci klimatických změn, a tedy nárůstu kg CO<sub>2</sub>-Equiv., scénář elektrárenské jednotky bez smyčky vykazuje signifikantní hodnoty a taktéž nejvyšší hodnoty pro acidifikaci. Pro kategorii úbytku fosilních surovin, scénář 2.1 znova potvrzuje nejvyšší hodnoty rovněž jako v případě CML metody. Nejnižší hodnoty pro všechny kategorie dopadu se opět potvrzují pro scénář 2.3 ohřevu vápence zemním plynem a využitím odpadního tepla ve formě páry. ReCiPe metoda potvrzuje výsledky vyhodnoceny CML metodou.

#### 4. Závěr

Technologie karbonátové smyčky má velký potenciál v rámci snižování CO<sub>2</sub> z emisí při spalování uhlí. Při provedených analýzách scénářů je patrné, že technologie karbonátové smyčky ve spojení s elektrárenskou jednotkou vykazují snížení environmentálních dopadů oproti elektrárenské jednotce bez smyčky, a to hlavně v kategoriích acidifikace a snížení potenciálu globálního oteplování. Vzhledem k scénářům elektrárenské jednotky a napojené smyčky můžeme vyhodnotit nejméně příznivý a nejpříznivější scénář (obr. 3). Na obr. 3 je vidět, že změna klimatu, a tedy zvýšení CO<sub>2</sub>, je ovlivněno produkcí termální energie spalováním hnědého uhlí. Úbytek fosilních surovin je také spojen s intenzifikací těžby a zpracováním hnědého uhlí. Logicky je patrné, že přínos karbonátové smyčky v rámci snížení CO<sub>2</sub>, ale i k desulfurizaci, výrazně přispívá k celkovému snížení environmentálních dopadů. Ale v rámci posouzení celého životního cyklu technologie zachytu a elektrárenské jednotky se objevují další environmentální dopady spojené s produkcí hnědého uhlí a jeho spalováním. Otázka zachytu CO<sub>2</sub> by z části vyřešena být mohla, ale hlavním problémem se pak stává samotné využití hnědého uhlí. Proto částečná redukce použití uhlí s náhradou za zemní plyn v rámci ohřevu smyčky by mohla být možností snížení celkového environmentálního dopadu. Dále potenciální využití odpadního tepla ve formě páry by také přispělo k celkovému snížení environmentálních dopadů. Nové technologie a výzkum zachytu CO<sub>2</sub> jsou fundamentálním krokem pro inovaci a udržitelnost. Proto posouzení v rámci LCA je nástrojem pro environmentální složku udržitelnosti a může poukázat na další směr zlepšování v rámci technologické inovace.



**Obr. 3** Shrnutí dopadů na životní prostředí podle příznivého a nepříznivého scénáře  
**Fig. 3** Summary of environmental impacts of the most positive and most negative scenario

Jestliže se ale Česká Republika má posouvat k udržitelnému rozvoji v energetice, je potřebné se v budoucnu také zaměřit na ekonomicko-sociální vyhodnocení nových technologií.

### Poděkování

Práce byla realizována s podporou Norských fondů. Prezentované výsledky byly dále finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_008/0000293, která je finančně podporována Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LM2015093 Infrastruktura SUSEN.

### Literatura

1. United Nations. (2015). Adoption of the Paris Agreement, (December), 32. <https://doi.org/FCCE/CP/2015/L.9>
2. Zakuciová, K., Kočí, V., Life Cycle Assessment Of High Temperature Sorption Of CO<sub>2</sub> by high-temperature carbonate loop, Palivá, 8, 2016, s.54–58.
3. Clarens, F., Espí, J. J., Giraldi, M. R., Rovira, M., Vega, L. F. Life cycle assessment of CaO looping versus amine-based absorption for capturing CO<sub>2</sub> in a subcritical coal power plant. International Journal of Greenhouse Gas Control, 46, 2016, s. 18–27.
4. Zakuciová, K., Lapao Rocha, J., Koci, V. Life Cycle Assessment Overview of Carbon Capture and Storage Technologies. <http://hitecarlo.vscht.cz/files/uzel/0014795/i0rMLk3OzC9LjC8oSq1KzStJTE4FAA.pdf> staženo 2017
5. Pilař, L., Slouka, P., 2015: Technický návrh systému zachytu CO<sub>2</sub> adsorpcí a jeho optimální začlenění do elektrárenského bloku, Výzkumná zpráva, Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., Prosinec 2015

### Summary

Kristína Zakuciová <sup>a,b</sup>, Vladimír Kočí <sup>a</sup>

<sup>a</sup>University of Chemistry and Technology

<sup>b</sup> Research Centre Rez, s.r.o, Husinec-Řež

### Life Cycle Assessment of CO<sub>2</sub> capture technology of high temperature carbonate loop

Paper is focused on the current results of the study of life cycle assessment (LCA) of carbonate loop. Carbonate loop is technological system which aim is to capture CO<sub>2</sub> from flue gases generated by the heat power plants. This paper introduces results made from life cycle assessment of carbonate loop with reference to 250MWe power unit. The assessment was made by two LCA methods – CML and ReCiPe in GaBi software. Two main were considered for the assessment: 1. 250MWe power unit without capture unit, 2. 250MWe power unit with capture unit. Scenario 2 is then divided into further three different scenarios : 2.1 Power unit in connection with carbonate loop where calcium carbonate is heated by the energy from the lignite consumption of power unit, 2.2 Power unit in connection with carbonate loop, where calcium carbonate is heated by external source of heat from natural gas, 2.3 Power unit in connection with carbonate loop, where calcium carbonate is heated by external source of heat from natural gas, and heat from carbonation process is used in a form of steam. Both LCA methods are confirming the most negative scenario 2.1 if the carbonate loop is considered. The most positive scenario is 2.3 where steam can be used for further heating in the system. Also further substitution of lignite by natural gas as a source of carbonate loop heating contribute to the better environmental characterization of the whole process.