



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VYUŽITÍ KOMPENZAČNÍCH METOD PRO SNÍŽENÍ DOPADŮ PRODUKCE CO₂

USE OF OFFSETTING METHODS TO REDUCE THE IMPACT OF CO₂ PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Chmelík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Krišpín

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Ondřej Chmelík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **Ing. Jan Krišpín**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití kompenzačních metod pro snížení dopadů produkce CO₂

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Koncentrace CO₂ v atmosféře se v posledních staletích neustále zvyšuje a jelikož se jedná o majoritní skleníkový plyn, podílí se přímo na globálních klimatických změnách. Z tohoto důvodu dochází k rozvoji metod, které dokáží CO₂ zachytávat přímo z provozů během jeho uvolňování nebo kompenzačních metod, které zachytávají CO₂ z atmosféry a kompenzují tak dříve uvolněné CO₂.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je rešerše metod v oblasti zachytu a následného využití CO₂, které mohou být využity jako kompenzační opatření pro stávající či nově budované provozy.

- Popis uhlíkové stopy jejích důsledků,
- Rešerše dostupných kompenzačních metod,
- Popis legislativních podkladů vedoucích k rozvoji kompenzačních metod,
- Analytické stanovení množství zachyceného CO₂ pomocí vybraných kompenzačních metod.

Seznam doporučené literatury:

COSTA, HK de Mereidos, ARLOTA Carolina, 2021. Carbon Capture and Storage in International Energy Policy and Law. 1st Edition. Elsevier. ISBN 9780323852500.

TUCKER, Owain. 2018. Carbon Capture and Storage. IOP Publishing. ISBN 9780750315814.

BENTO, M. Antonio, Ravi KANBUR, Benjamin LEARD. Designing efficient markets for carbon offsets with distributional constraints. Journal of Environmental Economics and Management. 2015, 70, 51-71. DOI: 10.1016/j.jeem.2014.10.003.

BLUM, Mareike, Eva LOVBRAND. The return of carbon offsetting? The discursive legitimation of new market arrangements in the Paris climate régime. Earth System Governance. 2019, 2, 100028. DOI: 10.1016/j.esg.2019.100028.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je posouzení vybraných metod CCS a CCU, jakožto postupů pro zachyt a využití skleníkového plynu CO₂. V práci jsou zhodnoceny legislativní podmínky a příležitosti, díky kterým dochází k rozvoji CCS a CCU. Analytická část práce je zaměřena na zjednodušené posouzení vybraných metod z hlediska jejich využití v podmínkách České republiky.

Klíčová slova

CCS, CCU, CO₂, uhlíková stopa

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to assess the selected CCS and CCU methods as procedures for the capture and utilization of the greenhouse gas CO₂. The thesis assesses the legislative conditions and opportunities that have led to the development of CCS and CCU. The analytical part of the thesis focuses on a simplified assessment of the selected methods in terms of their application in the Czech Republic.

Key words

CCS, CCU, CO₂, carbon footprint

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHMELÍK, Ondřej. Využití kompenzačních metod pro snížení dopadů produkce CO₂. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140405>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Krišpín.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **využití kompenzačních metod pro snížení dopadů produkce CO₂** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2022

Ondřej Chmelík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl mnohokrát poděkovat Ing. Veronice Vavříkové a Ing. Janu Krišpínovi za vedení a podporu při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu po celou dobu mého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1.1 Uhlíková stopa	11
1.2 Dopady uhlíkové stopy	11
1.3 Zmírnění důsledků globálního oteplování	13
1.4 Legislativa a politické nástroje pro snížení emisí	13
1.4.1 Systém EU ETS.....	13
1.4.2 Pařížská dohoda.....	14
1.4.3 European Green Deal	14
2 Metody separace CO ₂	15
3 Technologie CCS.....	16
3.1 Geologické ukládání CO ₂	16
3.2 Minerální karbonace	18
3.3 Mořské ukládání CO ₂	18
4 Technologie CCU	19
4.1 Výroba paliv	20
4.1.1 Výroba metanu	21
4.1.2 Výroba metanolu	21
4.1.3 Výroba paliv z uhlovodíků.....	21
4.2 Výroba chemikálií.....	22
4.3 Zvýšení produktivity při těžbě ropy a plynu.....	22
4.4 Odsolování a výroba vody	23
4.5 CCSU – minerální karbonatace	24
4.6 CCSU – Využití CO ₂ při pěstování rostlin a řas.....	25
4.7 Shrnutí CCS a CCU	25
5 Současný stav CCU a CCS v Evropě	27
5.1 Potenciál využití CCS a CCU v České republice	29
6 Analytické stanovení množství zachyceného CO ₂	30
ZÁVĚR.....	33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	34
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	38
SEZNAM OBRÁZKŮ	39
SEZNAM TABULEK	40

ÚVOD

V roce 1896 seznámil švédský fyzik a chemik Svante Arrhenius lidstvo s účinkem koncentrace CO₂ v atmosféře na teplotu Země. Na základě představeného konceptu vědci začali zkoumat negativní dopady zvyšujících se koncentrací skleníkových plynů na povrchovou teplotu Země. Kvůli zvyšujícímu se počtu obyvatel na planetě a uspokojování jejich potřeb se stupňuje množství vypouštěných emisí do ovzduší. Obavy z důsledků globálního oteplování a změny klimatu vyvolaly mezinárodní snahy o snížení koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Cílem má být odvrácení, respektive zmírnění hospodářských, sociálních a enviromentálních škod. Tuto problematiku si začíná uvědomovat čím dál více organizací i jednotlivců a dochází ke snahám omezit dopady klimatické krize. Z tohoto důvodu se v posledních letech rozvíjejí technologie pro snižování emisí skleníkových plynů a offsetování a kompenzace uhlíkové stopy.

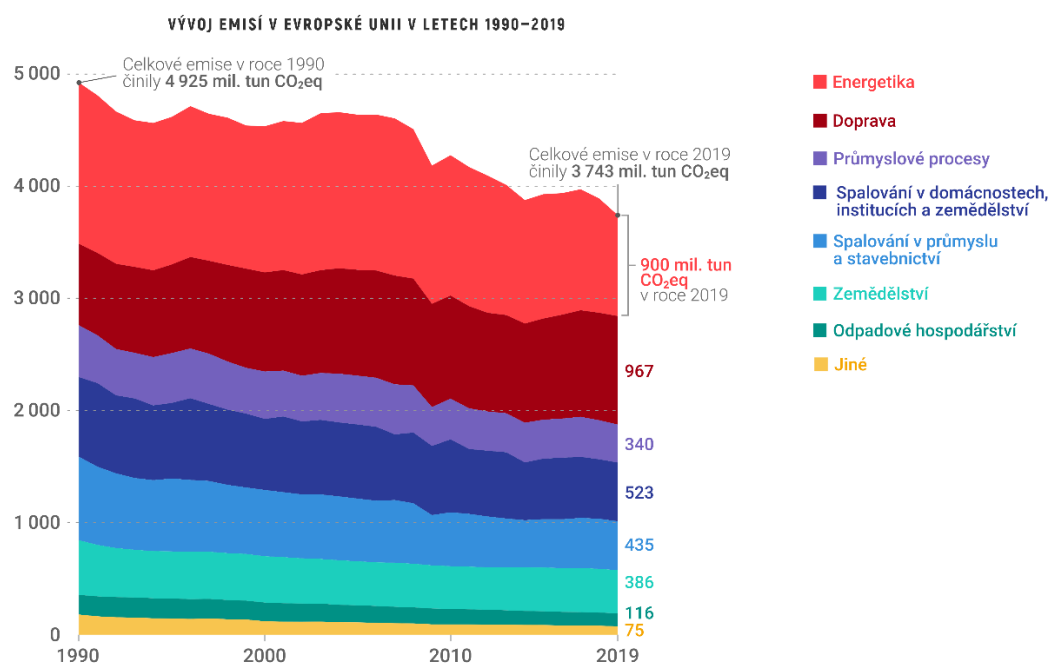
Tato práce se zaměřuje na analýzu a popis technologií pro zachycování, využívání a ukládání CO₂ (CCUS). Cílem těchto metod je snížit vypouštěné emise CO₂ do atmosféry. Dále práce hodnotí současný stav CCS a CCU technologií v Evropě a v České republice. Hodnotí klady a zápory těchto technologií, jejich možnou využitelnost, rozšíření na trhu a výhled do budoucnosti. V analytické části jsou uvedeny zjednodušené modelové příklady vybraných metod, které umožňují záchyt a využití CO₂ ze spalin pocházejících z energetického zařízení na palivový dřevní mix.

1.1 Uhlíková stopa

Uhlíková stopa je pojem, který označuje celkové množství emisí CO₂ a dalších skleníkových plynů způsobených přímo i nepřímo produktem nebo činností. Uhlíková stopa je měřítkem dopadu lidské činnosti na životní prostředí a je možné ji stanovit na různých úrovních (jednotlivec, organizace, město, stát apod.). Nejčastěji bývá vyjádřena v jednotkách CO₂eq¹.

CO₂ je lidstvem nejvíce vypouštěným skleníkovým plynem (představuje cca 80 % z celkové sumy skleníkových plynů) a jeho zvyšující se množství v atmosféře je považováno za důležitý ukazatel změny klimatu.

V Evropské unii má největší podíl na vypouštění skleníkových plynů do atmosféry, vyjádřených jako CO₂eq., doprava (26 % v roce 2019) a energetika (24 % v roce 2019), viz obr. 1.1, ze kterého zároveň vyplývá, že celkové emise skleníkových plynů klesly od roku 1990 o 24 %.

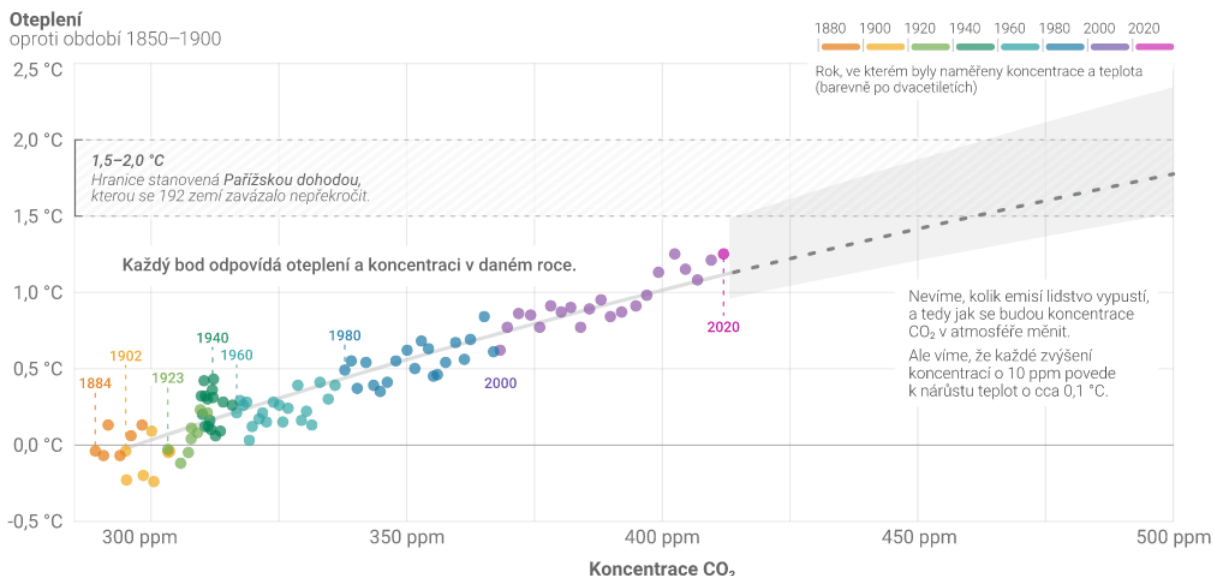


Obr. 1.1 Vývoj emisí v Evropské unii v letech 1990–2019 [51]

1.2 Dopady uhlíkové stopy

Na počátku průmyslové revoluce v roce 1750 byla koncentrace CO₂ v atmosféře přibližně 280 ppm (parts per milion). V dnešní době tato hodnota vzrostla na 419 ppm. Jak vyplývá z obr. 1.2, zvyšující se koncentrace CO₂ jsou dávány do souvislosti s globálním oteplováním planety a se změnou klimatu [1,2].¹

¹ Množství CO₂, které má ekvivalentní příspěvek ke skleníkovému jevu atmosféry jako množství příslušného jiného skleníkového plynu za standardizovanou dobu. Přepočítáno jako množství příslušného jiného skleníkového plynu x GWP koeficient [3].



Obr. 1.2 Souvislost koncentrace CO₂ v atmosféře a globálního oteplování [1]

Jedním příkladem změny klimatu je pokles celosvětové zemědělské produkce v důsledku nízkého množství srážek, kolísání ročních období a zvyšování teploty. V mnoha částech světa se vyskytuje sucho a přestávají zde být podmínky vhodné pro komerční zemědělství. Změny teploty a množství srážek pravděpodobně povedou také k nárůstu degradace půdy. Dále dochází k okyselení oceánů, které zachycují velké množství CO₂, vymírání korálových útesů a díky tomu i celých mořských biotopů, rozšiřování pouští a změně počasí. Očekává se, že změna klimatu přinese zvyšování hladiny moří, silné bouře, zdravotní problémy, migrace a rostoucí hospodářské škody.

Ukazatel uhlíkové stopy je využíván k hodnocení činností a aktivit společnosti a jejich dopadů na životní prostředí. Na základě stanovení a znalosti uhlíkové stopy může konkrétní jednotlivec/organizace/společenství navrhnout opatření, která povedou ke snížení celkové uhlíkové stopy nebo k její kompenzaci za účelem naplnění světových cílů. Znalost uhlíkové stopy má tedy přímý vliv na hodnocení činností a projektů a bude nabývat na významu i z důvodů implementace a posuzování ESG kritérií¹ a taxonomie EU (podrobněji popsáno v kapitole 1.4.1).

Cílem snižování nebo kompenzace uhlíkové stopy jsou nulové vypuštěné emise skleníkových plynů. V odborné literatuře jsou rozlišovány pojmy klimatická neutralita (net-zero emission, climate neutrality) a uhlíková neutralita (net-carbon emission, carbon neutrality). První uvedený pojem se týká všech skleníkových plynů, zatímco druhý pojem zahrnuje pouze emise CO₂. V praxi dochází k zaměňování těchto pojmů a také jednotlivé státy se zavazují k rozdílnému plnění. Např. Evropská unie a Velká Británie zahrnuje do svých plánů klimatické neutrality všechny skleníkové plyny, Nový Zéland se zavázal pouze k uhlíkové neutralitě.

Dále je nutné rozlišovat, zda v hodnocení uhlíkové stopy, respektive klimatické/uhlíkové neutrality dochází k zahrnutí emisí vznikajících pouze v rámci dané činnosti – nejčastěji je v této souvislosti posuzován stát a emise vznikající na území daného

² ESG kritéria = nefinanční kritéria, která hodnotí dopad na životní prostředí (E, environmental), společenskou odpovědnost (S, social) a odpovědný přístup k řízení společnosti (G, governance), spojeno s termínem *udržitelné financování*.

státu (tzv. teritoriální emise), nebo zda jsou zahrnuty emise vyplývající ze spotřeby v daném státě (tzv. emisní spotřeby – emise vzniklé při výrobě dovezených výrobků) [1].

Plány na dosažení uhlíkové/klimatické neutrality pracují s dvěma přístupy. Jedním z nich je přímé snížení emisí CO₂ a dalších skleníkových plynů (např. náhrada uhelných elektráren obnovitelnými zdroji nebo snížení spotřeby). Druhou cestou jsou metody zachycování uhlíku a uhlíkové kompenzace. Tento způsob nachází uplatnění u odvětví, která je obtížné dekarbonizovat, respektive v současné době je dekarbonizace obtížná z hlediska ekonomického a environmentálního. Kompenzační metody jsou dále popsány v kapitole 3 a 4.

1.3 Zmírnění důsledků globálního oteplování

I kdyby se náhle zastavily všechny emise vznikající lidskou činností, klimatické podmínky by se nadále měnily z důvodu setrvačnosti. V dnešní době se čím dál více klade důraz na vývoj technologií, které mají pomoci se snížením CO₂ v atmosféře a tím i zmírněním klimatické krize. S pojmem globální oteplování, respektive klimatická změna jsou spojeny dva základní přístupy – mitigace a adaptace. Cílem adaptivních opatření je vyrovnání se s dopady měnícího se klimatu a mitigační opatření si kladou za cíl předcházet ve smyslu zmírnění či zpomalení změny klimatu. Příkladem mitigačních opatření jsou metody „Carbon Capture Storage“ (dále jako CCS, záchyt a uložení CO₂) a „Carbon Capture Utilisation“ (dále jako CCU, záchyt u využití CO₂).

Státy po celém světě si začaly uvědomovat riziko tohoto problému a v několika úmluvách se zavázaly omezovat vnos škodlivých látek do atmosféry. Jedním z významných dokumentů je Pařížská dohoda, v rámci které se státy zavázaly snížit globální emise škodlivých látek tak, aby nárůst teploty nepřekročil hranici 1,5 °C oproti hodnotám před průmyslovou revolucí. Nejnovější iniciativou, představenou v roce 2019 je Green Deal (dále jako GD, Zelená dohoda pro Evropu), jejíž hlavním cílem je dosažení klimaticky neutrální Evropy do roku 2050.

1.4 Legislativa a politické nástroje pro snížení emisí

V této kapitole jsou shrnuty současné nejvýznamnější legislativní nástroje vedoucí k omezení vnosu skleníkových plynů do atmosféry.

1.4.1 Systém EU ETS

Systém EU pro obchodování s emisemi (angl. Emissions trading system – ETS) je základním kamenem politiky EU v boji proti klimatickým změnám a jejím klíčovým nástrojem pro nákladově efektivní snižování emisí skleníkových plynů. Tento systém byl a je majoritní trh s uhlíkem na světě.

Cílem systému EU ETS je omezit objem skleníkových plynů, které vypouští určitá odvětví průmyslu. ETS byl uveden v platnost v roce 2005. Část povolenek je vybraným průmyslovým odvětvím přidělena bezplatně a část si firmy musí kupovat v dražbách a cena se mění podle pravidel nabídky a poptávky. To motivuje firmy k technologické obměně a tím pádem i k vypouštění méně emisí. Aby se zvýšilo tempo snižování emisí, začal celkový počet emisních povolenek od roku 2021 klesat tempem 2,2 % ročně oproti předchozím 1,74 %. V posledních letech byl v ETS přebytek povolenek a kvůli ochraně proti nadměrné nabídce se přebytečné povolenky ukládají do tzv. rezervy tržní stability.

Celkové výnosy z aukcí z prodeje emisních povolenek činily v letech 2012–2019 přibližně 50 miliard eur (z toho 14 miliard byly výnosy v roce 2019, kdy byla cena povolenek nejvyšší). Dražba probíhá v rámci každého ze zapojených států – ty také rozhodují o konkrétním využití prostředků, které se aukcí vyberou. Z celkového obnosu bylo vynaloženo na klimatické a energetické účely 78 %, a to především na energii z obnovitelných zdrojů, zvyšování energetické účinnosti a udržitelnou dopravu [1].

1.4.2 Pařížská dohoda

Pařížská dohoda je právně závazná mezinárodní smlouva o změně klimatu. Byla přijata 196 smluvními stranami na konferenci o změně klimatu (COP 21) v Paříži 12. prosince 2015 a vstoupila v platnost 4. listopadu 2016. Jejím cílem je omezit globální oteplování výrazně pod 2, nejlépe na 1,5 °C ve srovnání s předindustriální dobou.

Aby bylo tohoto dlouhodobého teplotního cíle dosaženo, usilují státy o co nejrychlejší dosažení celosvětového vrcholu emisí skleníkových plynů, aby bylo možné do poloviny století dosáhnout klimatické neutrality.

Pařížská dohoda je milníkem v mnohostranném procesu změny klimatu, protože poprvé závazná dohoda spojuje státy, které tuto dohodu podepsaly, do společné aktivity, aby vyvinuly ambiciózní úsilí v boji proti změně klimatu a přizpůsobily se jejím dopadům. Provádění Pařížské dohody vyžaduje hospodářskou a sociální transformaci založenou na nejlepších dostupných vědeckých poznatcích. Pařížská dohoda funguje na základě pětiletého cyklu stále ambicióznějších opatření v oblasti klimatu prováděných jednotlivými zeměmi.

1.4.3 European Green Deal

European Green Deal neboli Zelená dohoda pro Evropu představuje evropský akční plán, který má podpořit efektivní využívání zdrojů přechodem na čisté, oběhové hospodářství a obnovit biologickou rozmanitost a snížit znečištění.

Jedná se o novou strategii růstu, jejímž cílem je transformovat EU na spravedlivou a prosperující společnost s moderní a konkurenceschopnou ekonomikou efektivně využívající zdroje, která v roce 2050 nebude produkovat žádné emise skleníkových plynů a ve které bude hospodářský růst oddělen od využívání zdrojů [4]. Green Deal byl představen v roce 2019 a v roce 2021 nabyl účinnosti právní rámec pro klima (evropský klimatický zákon), který činí dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050 právně závazný.

Evropská zelená dohoda se vztahuje na všechna odvětví hospodářství, zejména na dopravu, energetiku, zemědělství, budovy a průmyslová odvětví, jako je ocelářství, cementářství, informační a komunikační technologie, textilní a chemický průmysl.

Do GD spadá "Fit for 55", což je klimatický balíček, který EU přijala. Úkolem balíčku je připravit cestu ke klimatické neutralitě EU v roce 2050. Obsahuje opatření, která mají vliv na lesnictví a dřevařství, energetiku, paliva, využívání půdy nebo obchodování s emisními povolenkami (EU ETS).

Jeden z klíčových prvků legislativního balíčku Fit for 55 je „uhlíkové clo“ oficiálně pojmenované jako mechanismus uhlíkového vyrovnání na hranicích (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM). Nové clo se má vztahovat na emisně náročné produkty dovážené do EU. Clo má zamezit tzv. úniku uhlíku, což popisuje situaci, kdy společnosti přesouvají výrobu mimo EU do zemí s mírnějšími emisními pravidly (protože vysoké emisní standardy zvyšují cenu výrobních nákladů). Do mechanismu budou zařazeny produkty z hutního a ocelářského průmyslu, dále potom produkty z cementářského průmyslu či hnojiva a hliník. Kromě vybraných průmyslových sektorů se bude nové uhlíkové clo vztahovat také na elektřinu dovezenou do EU.

Funkčním nástrojem k implementaci GD do praxe je Evropská taxonomie, která představuje pravidla pro financování projektů. Taxonomie EU je nástrojem, který pomáhá investorům, společnostem, emitentům a předkladatelům projektů při přechodu na daňový systém. nízkouhlíkové, odolné a zdrojově efektivní ekonomiky [5]. Metody pro záchyt CO₂ jsou schválené jako zelené investice a plnění požadavků taxonomie má tak zásadní vliv na rozvoj těchto metod [6].

2 Metody separace CO₂

Prvním krokem v procesu CCS a CCU je zachycení, respektive separace CO₂ z plynného proudu. V literatuře [7] jsou popsány 3 základní principy:

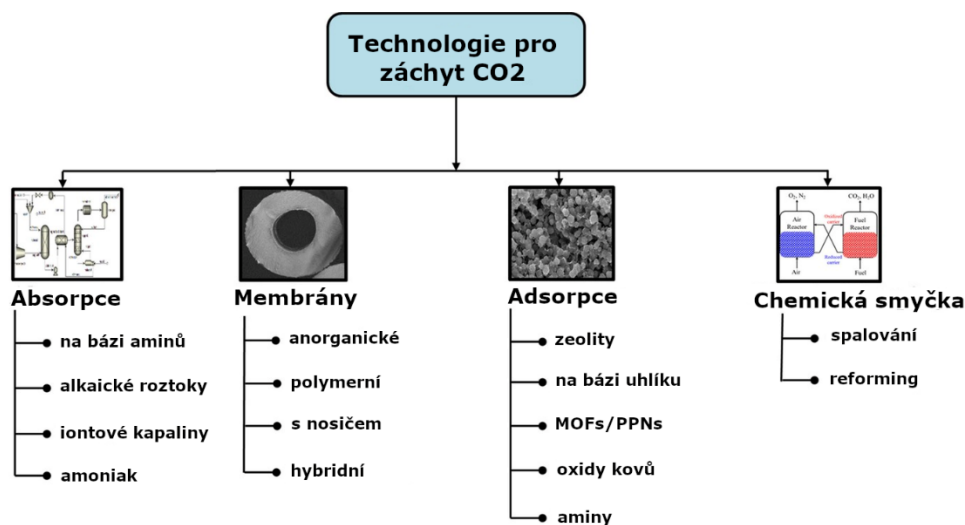
- Separace CO₂ před procesem spalování (pre-combustion)
- Separace CO₂ po procesu spalování (post-combustion)
- Separace CO₂ při spalování v kyslíkové atmosféře (oxy-fuel combustion)

Separace CO₂ před procesem spalování funguje na principu zplyňování fosilních paliv, jelikož CO₂ vyskytující se v palivu není před spalováním běžně k dispozici pro zachycení. Při procesu dochází k oddělení CO₂ ještě před spálením paliva. Získáváme zde „čistý“ CO₂ bez znečišťujících látek, které vznikají při spalování (např. NO_x, SO_x).

Separace CO₂ po procesu spalování spočívá v přímém odstraňování CO₂ z proudu spalin za pomoci fyzikální separace, absorpce, adsorpce, biologických metod apod. Tato metoda separace je energeticky náročná. Zároveň se snižuje tepelná účinnost celého oběhu, a proto je potřeba spalovat větší množství paliva k dosažení stejného výstupu energie [8].

Pro separaci CO₂ při spalování v kyslíkové atmosféře používáme buď atmosférické kyslíkové spalování nebo tlakové kyslíkové spalování. Tato technologie je využitelná v provozech, kde dochází ke spalování paliv s tím rozdílem, že spalování probíhá v přítomnosti čistého O₂ (o koncentraci přibližně 98 %), na místo vzduchu, který obsahuje 21 % O₂. Výsledkem je menší objem spalin s vyšší koncentrací CO₂, čímž dochází ke snížení nákladů na jeho separaci. Na druhou stranu, získávání čistého kyslíku a separace z výstupního proudu je rovněž energeticky náročný proces [9].

Základní přehled technologií separace CO₂ je uveden na obr. 2:

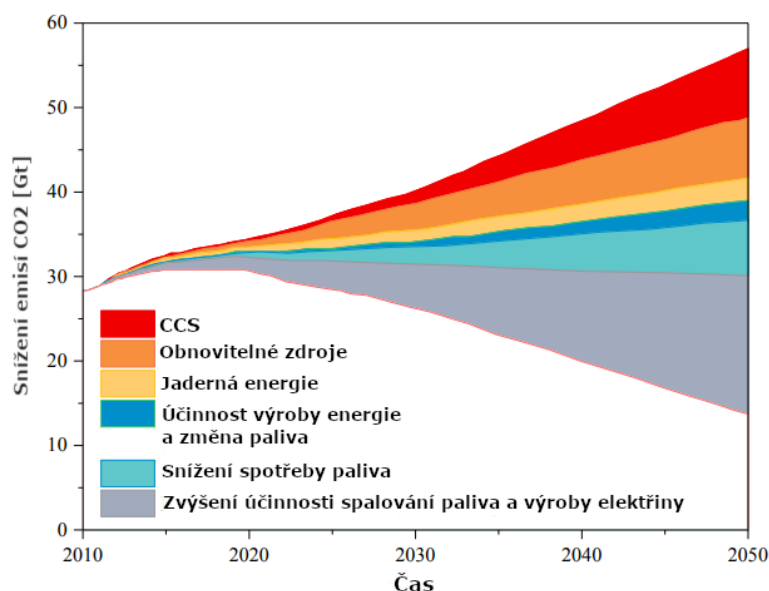


Obr. 2 Technologie pro zachycování CO₂, upraveno dle [10]

Jelikož se práce zabývá možností uložení nebo využití CO₂ již zachyceného z plynného proudu, nejsou zde principy metod separace CO₂ blíže popsány. Bližší popis metod je uvedený např. v práci [11] nebo [12].

3 Technologie CCS

Technologie CCS je základním nástrojem pro zmírnění dopadů změny klimatu. Některé studie považují CCS v současné době jako nejvíce efektivní způsob snižování emisí CO₂ (viz obr 3). Např. podle IEA (International Energy Agency, Mezinárodní agentura pro energii) aplikace CCS může snížit koncentrace CO₂ až o 19 % do roku 2050. Pokud by k této redukci mělo dojít bez CCS, pak by se náklady zvedly o 70 %, což ukazuje důležitost CCS i z hlediska ekonomického [13].



Obr. 3 Odhad dalšího vývoje klíčových technologií pro snižování emisí CO₂, upraveno dle [13]

Rozvoj metod CCS je založen na požadavku bezpečného a dlouhodobého uložení CO₂, k čemuž jsou popisovány postupy cíleného ukládání do geologických struktur nebo minerálních karbonátů. Zvláštním případem je záchyt CO₂ v oceánech (ke kterému dochází i přirozenou cestou).

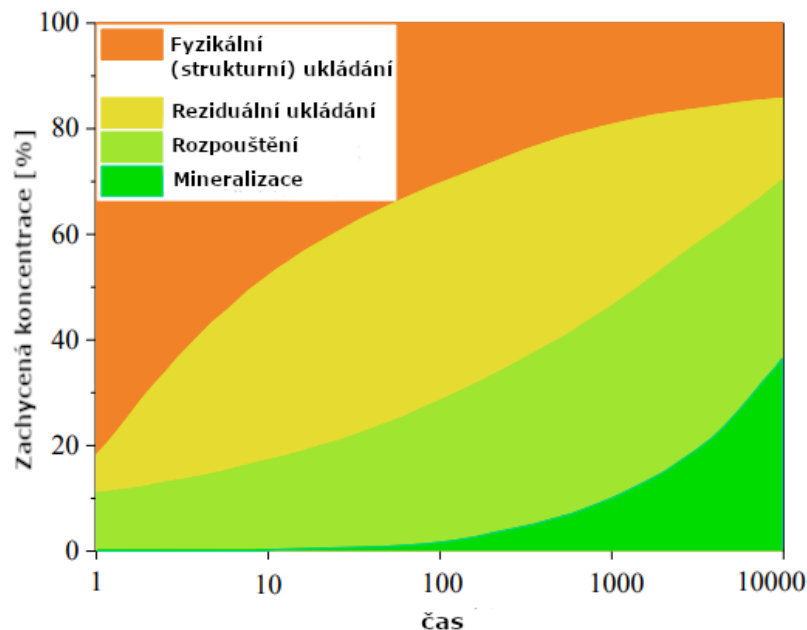
3.1 Geologické ukládání CO₂

Principem geologického ukládání je vtlačení CO₂ za pomoci vysokého tlaku do prostor mezi horninami, které vznikly buď přírodní (např. slané akvifery) nebo lidskou činností (např. vytěžená ložiska ropy a plynu, uhelné doly).

Uložení CO₂ je založeno na následujících principech:

- Fyzikální (označováno také jako strukturální) – dochází k vtlačování CO₂ pod zemský povrch a jeho záchytu pod nepropustnou/minimálně propustnou geologickou strukturou, např. břidlice. Metoda strukturálního ukládání je nejvyspělejší technologií geologického uskladňování CO₂ [14].
- Reziduální (označováno také jako kapilární) – prostupem CO₂ horninou dochází k vytlačení kapaliny z pórů horniny a vyplnění CO₂, které již určitou velikostí pórů neproniká a zůstává zachycen.
- Rozpouštění – k rozpouštění CO₂ může docházet v hlubokých porézních vrstvách hornin, které obsahují slanou vodu (tzv. solanku).
- Mineralizace – dochází ke geochemickým reakcím a přeměně CO₂ obvykle na formu uhličitanů a vzniku imobilní fáze.

Tyto základní principy neprobíhají odděleně, ale v závislosti na podmínkách horninového prostředí dochází k jejich kombinování. Strukturální zachycování hraje zásadní roli v počáteční fázi ukládání CO₂, později převládá reziduální ukládání a ukládání pomocí rozpouštění. Dle obr. 3.1 cca po 100 letech začíná docházet k významné mineralizaci CO₂ a dále v čase již dochází k působení všech principů.



Obr. 3.1 Podíl principů zachycování CO₂ v čase, upraveno dle [13]

Rozhodujícími faktory při geologickém a mořském ukládání CO₂ jsou: potenciál pro vtlačování CO₂, monitorování podle příslušných norem a zajištění proti úniku CO₂.

Pro analýzu geologických míst se používají například techniky modelování, které umožňují předpovídat vytlačování hlubokých podzemních vod, migraci a rozptýl CO₂ a popisují geochemické procesy v horninových formacích a strukturálním prostředí.

Ukládání CO₂ do slaného akviferu je jednou z nejdůležitějších možností vzhledem k obrovské kapacitě úložiště, která se odhaduje na 10 000 Gt CO₂. Nejzásadnějším problémem, který přináší sekvestrace ve slaném akviferu je možné přesouvání uloženého CO₂ do jiného menšího úložiště, kde v důsledku zvýšení tlaku a porušení horninové struktury může dojít k úniku CO₂.

3.2 Minerální karbonace

Minerální karbonace je proces mineralizace uhlíku, který tvoří pevné uhličitanové minerály reakcí CO₂ (plynného, kapalného, rozpuštěného ve vodě nebo nadkritického) s horninami bohatými na alkalické sloučeniny (např. vápník a hořčík).

Metody mineralizace:

- Ex-situ – zdroj alkalitu je dopraven na místo zachycení CO₂, kde je rozemlet na malé kousky a smíchán s CO₂ v reaktoru za vysoké teploty a tlaku.
- Povrchová – zředěný CO₂ reaguje se zdrojem alkalitu
- In-situ – kapaliny nesoucí CO₂ cirkulují v podpovrchových pórech v geologických formacích.

3.3 Mořské ukládání CO₂

K záchytu a uložení CO₂ v oceánech dochází i přirozenou cestou díky rozpouštění CO₂ v oceánu. Rozpuštěný CO₂ poté využívá fytoplankton při fotosyntéze.

Vzhledem ke schopnosti oceánu zachytávat CO₂, probíhá výzkum zaměřený na záměrné vstřikování CO₂ do velkých hloubek, kde následně dochází k záchytu CO₂ dle principů popsaných výše. K tomuto účelu může být využita lodní doprava, která dopraví stlačené CO₂ na vhodné místo nebo může být CO₂ vedeno potrubní trasou. Vnos CO₂ může probíhat rozstřikováním do oceánu nebo uložním na dno oceánu (v hloubce 3 km a více má CO₂ díky vyššímu tlaku a nižší teplotě vyšší hustotu než mořská voda a dochází zde ke vzniku tzv. CO₂ jezer). Vzhledem k významné změně hodnoty pH mořské vody v důsledku vstřikování může docházet k okyselení oceánu což má negativní vliv na mořské organismy.

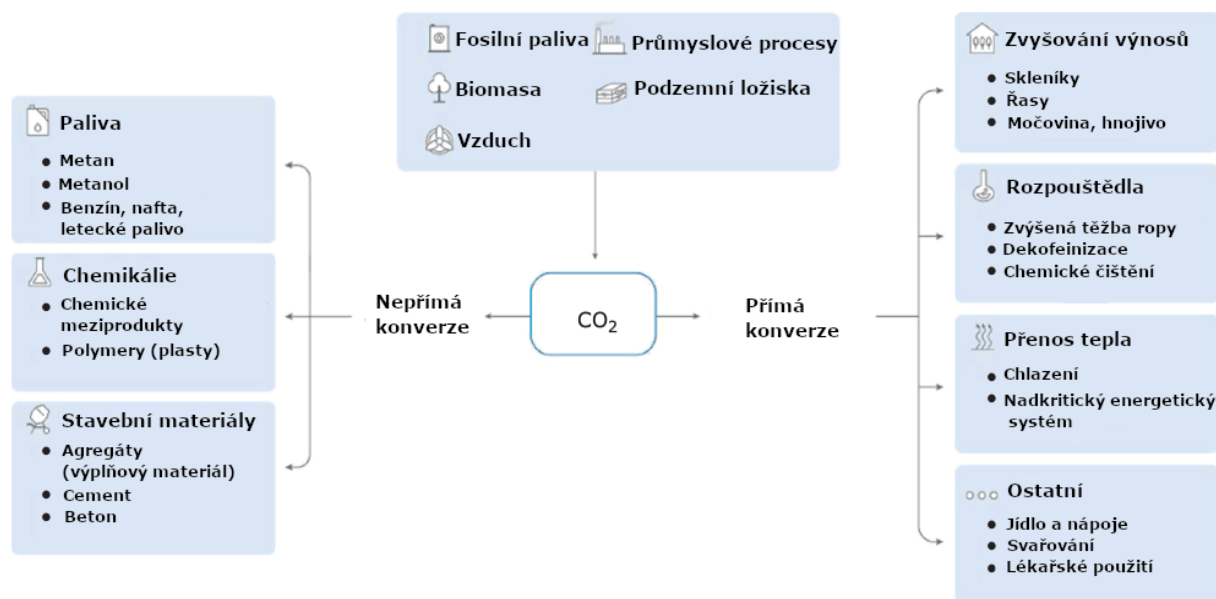
Možnou variantou je ukládání do sedimentů moří a oceánů, která je založena na stejném principu, jako u geologického ukládání. Tato varianta má výhodu v tom, že je zde obrovská kapacita ukládání a že nedochází k poškození mořských ekosystému, jelikož se CO₂ vstřikuje do sedimentů hluboko pod oceánem, a ne přímo do oceánu. Nevýhodou této varianty ukládání je například mnohonásobě vyšší cena ukládání CO₂, než je tomu u pevninských metod ukládání.

4 Technologie CCU

Technologie CCU je jednou z cest ke zmírnění globálního oteplování, a to zejména v krátkodobém až střednědobém horizontu, než dojde k dekarbonizaci ve většině průmyslových odvětví. Metody CCU nevedou k uložení zachyceného CO₂ jako u CCS, ale umožňují zachycený CO₂ opětovně využít nebo přeměnit na cenné látky nebo produkty. Tím dochází k cirkulaci CO₂ v toku materiálů namísto jeho vypouštění do ovzduší. Rozsah využití CO₂ zahrnuje přímé i nepřímé aplikace. Přímé nebo technologické využití zahrnuje aplikace jako je např. extrakce CO₂, chemické čištění a využití v potravinářském průmyslu nebo jako chladivo [15].

V rámci nepřímých aplikací se CO₂ přeměňuje prostřednictvím konverzních procesů na produkty s přidanou hodnotou (termo/elektrochemická a biologická přeměna). Vznikají tak sekundární sloučeniny, které mohou nahradit své konvenční protějšky, jako jsou například stavební materiály, cement, beton, paliva a chemikálie.

Přímé využívání CO₂ závisí na parametrech jako je čistota, velikost trhu s CO₂ a z něj vyrobené produkty a je zde možné zahrnout i marketing vyrobených produktů s využitím CO₂. Přehled přímých i nepřímých způsobů využití CO₂ znázorňuje obr. 4. V následujících kapitolách jsou popsány příklady způsobů CCU, které by mohou v budoucnu představovat nebo už představují potenciál ve výrobě produktů z CO₂, nahrazení používání fosilních surovin apod.



Obr. 4 Cesty pro přímou a nepřímou konverzi procesů CCU a zdroje CO₂, upraveno dle [16]

4.1 Výroba paliv

Přeměna CO₂ na paliva je považována za jeden z nejvýznamnějších způsobů využití CO₂, jelikož tato metoda umožňuje náhradu fosilních paliv, jejichž výroba a použití produkuje CO₂. K rozvoji těchto metod může docházet především z toho důvodu, že palivový trh představuje významný globální sektor, který se stále rozrůstá, a navíc je snaha omezit závislost na fosilních zdrojích. Další výhodou je snadnější přeprava vyrobeného paliva v porovnání se samotnou přepravou CO₂. Pro přepravu CO₂ je potřeba vybudovat infrastrukturu dálkového potrubí, jelikož stávající infrastruktura přepravy CO₂ má nedostačující kapacitu pro rozšíření trhu s CO₂ (silniční a železniční transport pravděpodobně nebude hrát významnou roli s ohledem na očekávaný rozvoj CCS/CCU, který povede k větším objemům zpracovávaného CO₂). Naopak při přeměně CO₂ na palivo existuje potenciál využívat stávající infrastrukturu a alespoň částečně tak snižovat ekonomické nároky pro zavedení metody do praxe. [17].

Konverzí CO₂, jakožto výchozí sloučeniny lze pomocí chemických reakcí získat celou řadu produktů, např. metan, metanol, syntézní plyn. Dále mohou být paliva využita např. v rámci palivových článků, které mohou sloužit jako záloha obnovitelných zdrojů, které by v dané chvíli nebyly schopné uspokojit poptávku [17,18].

Vzhledem k tomu, že CO₂ je kineticky a termodynamicky stabilní molekula, k její konverzi je potřeba dodání velkého množství tepla a přítomnost katalyzátorů [18]. Chemická přeměna CO₂ zahrnuje celou řadu produktů a meziproductů, vždy v závislosti na reakčních podmínkách.

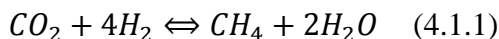
V souvislosti s výrobou paliv ze zachyceného CO₂ je diskutována metoda hydrogenace, během které dochází ke vzniku syntézního plynu, methanu nebo methanolu (a dalších látek, využitelných jiným způsobem než paliva, např. kyselina mravenčí) [19]. Důležitým krokem je přeměna CO₂ na CO, jakožto surovinu či meziproduct pro následnou reakci.

K této přeměně mohou být využity metody redukce CO₂, elektrokatalýza nebo produkce CO pomocí plazmy. Odlišným způsobem využití CO₂ je suchý reforming metanu (DRM), během kterého vzniká syntézní plyn. Vzhledem k energetickým potřebám reakcí jsou tyto postupy ekonomicky a environmentálně životaschopné pouze pokud je potřebná energie dodávána z obnovitelných zdrojů a nedochází k využívání H₂ nebo CH₄ vyrobených z fosilních paliv [19,20].

Cílem bakalářské práce je poskytnout základní přehled o kompenzačních metodách a jejich využitelnosti na území České republiky. Práce se nevěnuje mechanismu výroby, a proto nejsou podrobně popsány chemické reakce u jednotlivých postupů (ty lze najít např. [21]). V následujících kapitolách (4.1.1, 4.1.2, 4.1.3) jsou popsány metody výroby paliv, kterým se v dnešní době věnuje nejvíce pozornosti.

4.1.1 Výroba metanu

Metan (CH₄) je důležitou surovinou pro chemický průmysl. Metan má za normálních podmínek nízkou energetickou hustotu, a proto se nehodí jako zdroj energie využívaný k transportu, ale je možné jej upravit (stlačovat, zkapalňovat) a tak zlepšit jeho energetickou hustotu. Podobně jako při výrobě metanolu lze syntézu metanu provádět s využitím reakce mezi antropogenním CO₂ a H₂ z obnovitelných zdrojů. Podle zjednodušené rovnice (rovnice 4.1.1) vzniká hydrogenací CO₂ metan a voda jako vedlejší produkt (Sabatierova reakce) [22].

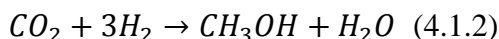


Doposud nebyla hydrogenace CO₂ na metan ve velkém měřítku praktická a vzhledem k nízké ceně a velké dostupnosti metanu ze zemního plynu se tak v blízké budoucnosti nepředpokládá změna, ale strategie EU v oblasti soběstačnosti však může tento stav změnit [23]. V současném okamžiku je primárním cílem výroby „zeleného“ metanu uložení tzv. zeleného H₂, který se vyrobil elektrolýzou za pomoci obnovitelných zdrojů a není využit k okamžité spotřebě.

4.1.2 Výroba metanolu

Metanol (CH₃OH) se obvykle vyrábí přeměnou ze syntézního plynu (směs H₂ a CO a CO₂) získaného přímo z fosilních paliv za přítomnosti katalyzátorů [24]. Pro zvýšení výtěžku a zlepšení energetické bilance se do syntézního plynu obvykle přidává až 30 % CO₂ [25]. Tento postup představuje příležitost k využití odpadního CO₂, který vzniká při výrobě synplynu [23]. V poslední době dochází k rozvoji metody výroby metanolu pomocí katalytické hydrogenace CO₂.

Mechanismus výroby metanolu může probíhat katalytickou hydrogenací CO₂ dle rovnice 4.1.2



Vývoj metody syntézy methanolu z CO₂ by mohl usnadnit přechod k metanolovému hospodářství, v němž se metanol používá buď přímo jako palivo, nebo jako zdroj H₂ [26].

4.1.3 Výroba paliv z uhlovodíků

Vzhledem k tomu, že většina CO₂, který se uvolňuje do atmosféry, pochází ze spalování fosilních paliv, by mohl vývoj metod syntézy paliv z CO₂ vést k uzavřenému uhlíkovému cyklu, v němž bude nárůst koncentrace CO₂ v atmosféře minimální [27]. Toho lze dosáhnout pouze v případě, že elektřina nebo H₂, které se používají ke snižování CO₂, jsou vyráběny v bezuhlíkových zdrojích a že odpadní uhlíkové plyny vzniklé při spalování paliva jsou zpětně zachycovány a znovu využívány [27].

Hlavním účelem tohoto procesu je výroba umělé náhrady ropy. Celý proces funguje na bázi Fischer–Tropschovi syntézy což je chemická reakce za pomoci katalyzátoru, ve které se H₂ a CO pod vysokým tlakem a teplotou cca 300 °C přeměňují na kapalné uhlovodíky.

4.2 Výroba chemikálií

CO₂ lze využít jako surovinu pro výrobu široké škály jemných chemických látek jakými jsou např. močovina, anorganické uhličitany, polyuretan, kyselina akrylová a akryláty, polykarbonáty a alkylenuhličitany [17].

Nejjednodušší produkt redukce CO₂ pomocí H₂O je kyselina mravenčí, která může být využita buď přímo nebo jako meziprodukt pro následné reakce a vznik vyšších uhlovodíků, přičemž selektivita je dána podmínkami reakce. Současně s touto metodou využití CO₂ dochází k „uložení“ H₂ (bez vzniku vedlejších produktů), který může být využitý následně v čase potřeby zpětným rozkladem kyseliny mravenčí (během kterého ale dochází ke zpětnému uvolnění CO₂).

Celkově lze říci, že ačkoli existuje velký trh pro přeměnu zachyceného CO₂ na chemikálie a paliva, navrhované technologie se používají zatím jen v malém měřítku. Důvodem je zčásti to, že dosud zkoumané chemikálie jsou drahé na výrobu a zároveň nejsou chemicky stabilní, a zčásti to, že ve většině případů je míra konverze CO₂ a celkový výtěžek hlavních produktů nízký, a tudíž nesplňuje požadavky na nasazení ve velkém měřítku.

4.3 Zvýšení produktivity při těžbě ropy a plynu

Získávání ropy pomocí vstřikování CO₂ (Enhanced Oil Recovery, CO₂-EOR) patří mezi nejvýznamnější terciální techniky těžby ropy (viz obr 4.5). CO₂ je dobře rozpustný, což způsobuje „bobtnání ropy“, čímž dochází ke snižování její viskozity a hustoty. Tyto procesy závisí na teplotě a tlaku v ložisku. CO₂ může být do horninového prostředí vstřikováno za různých podmínek, přičemž zásadní rozdíl je jeho mísitelnost, respektive nemísitelnost s ropou při určitém tlaku. CO₂ vystupující s ropou je oddělen a znovu dodán do procesu vstřikování. Vstřikování CO₂ je jednou z nejběžnějších a nejúčinnějších metod používaných v EOR [28].

Většina systémů EOR využívá přirozeně se vyskytující CO₂, ale v poslední době se výzkum zaměřuje na využití CO₂ zachyceného z proudů plynů, jako jsou spaliny a jiné průmyslové plynné výpusti [29].

Metoda využití CO₂ pro zvýšení těžby ropy je používána již dlouhou dobu na několika místech světa. Dle IEA bylo v roce 2019 pomocí této metody vytěženo 20 % ropy. Využití CO₂ z antropogenní činnosti představuje prozatím menší podíl na celkové spotřebě CO₂, nicméně předpokládá se, že v blízké budoucnosti se bude podíl využití antropogenního CO₂ zvyšovat [30,31].



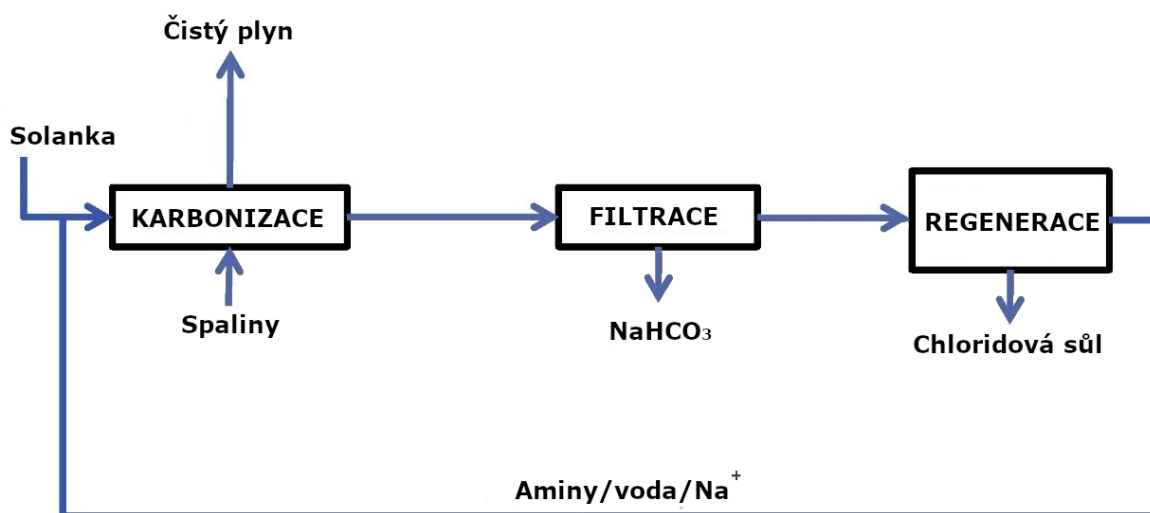
Obr. 4.5 Terciální metoda těžby ropy, upraveno dle [32]

4.4 Odsolování a výroba vody

Dalším slibným způsobem je využití zachyceného CO₂ k přeměně slané vody na vodu pitnou, která může být využita na místech, kde je jí nedostatek. Rozšíření technologie odsolování vody pomocí CO₂ není prozatím ekonomicky výhodné v porovnání s aktuálně používanými metodami, nicméně i v této oblasti dochází k pokroku s cílem využívat CO₂ antropogenního původu.

Příkladem je metoda založená postupu karbonizace, filtrace a regenerace (viz obr. 4.4). V prvním stupni dochází k promíchání plynného CO₂ se slanou vodou (karbonizace), ke které je dávkován NH₃. V důsledku narušení vazeb (NH₃ oslabuje vazbu NaCl) a vhánění CO₂ dochází k rozkladu NaCl a vzniku pevných produktů Na₂CO₃ a NH₄Cl, které se usazují na dně nádoby. K jejich separaci dochází v hydrocyklonech (filtrace). Jedním z problémů, s nimiž se procesy odsolování potýkají je odpadní solanka, která během procesu vzniká ve velkém množství. Navíc vysoká koncentrace solí a zbytky chemických rozpouštědel mají negativní vliv na místní ekosystém. Právě k předcházení těmto problémům je využívána třetí část technologie – regenerace. Pevný produkt NH₄Cl může být termickým procesem regenerován za vzniku NH₃ (vrácen na začátek procesu) a Cl. Tento postup rovněž umožňuje kontrolovat množství chloridů v celém systému (jedná se o korozivní látky, které mohou poškozovat zařízení) [33].

Je nepravděpodobné, že by odsolování proniklo na trh bez výrazné finanční podpory. Odhadované náklady na odsolování jsou v současné době vyšší než náklady na užitkovou nebo pitnou vodu, což činí technologii odsolování na bázi CO₂ méně atraktivní pro řešení trhu s vodou. Jednou z diskutovaných možností je využití odsolování vody pomocí CO₂ pro zemědělské účely. Na druhou stranu jsou zde vysoké požadavky na zajištění kvality, což tento způsob využití komplikuje [10].



Obr. 4.4 Procesní schéma pro odsolování, upraveno dle [34]

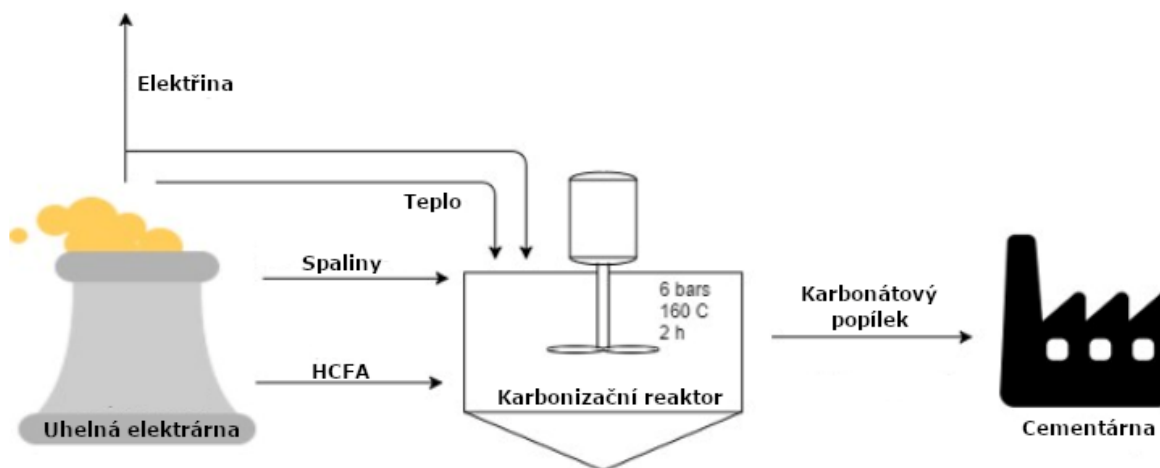
4.5 CCSU – minerální karbonatace

Proces minerální karbonatace (MC) je technologie zachycování a ukládání uhlíku nebo ukládání a využívání uhlíku (CCUS). Za pomoci chemických reakcí dochází k přeměně na stabilní karbonátové produkty. K mineralizaci dochází působením alkalických sloučenin (především hořečnatých nebo vápenatých iontů), přičemž zdrojem mohou být přírodní horniny nebo průmyslové produkty (prach z cementářských pecí, struska, popílek). K mineralizaci CO₂ může docházet několika cestami označovanými *ex-situ*, povrchová mineralizace a *in-situ* (metoda *in-situ* je popsána v kapitole 3.2). Jedná se o jednu z mála alternativ CCSU, které vede k trvalému uložení CO₂ v pevném stavu bez nutnosti dlouhodobého monitorování. Výstupní produkty minerální karbonatace lze použít při výrobě betonu a dalších stavebních materiálů.

Příkladem může být výroba karbonátového popílku (CFA), který vzniká zachytem a smísením CO₂ s popílkem, který se produkuje při spalování uhlí v uhelných elektrárnách. Uhelné elektrárny se začínají nahrazovat novými technologiemi a to např. biomasou či ZEVO (zařízení pro energetické využití odpadu). Zde se bude množství zachyceného popílku lišit dle konkrétního paliva, které se bude spalovat.

Karbonátový popílek je komodita, která nejen trvale zachycuje CO₂, ale má také výhodu, že je doplňkovým cementovým materiálem používaným v betonářském a stavebním průmyslu. Využití popílku má velkou perspektivu pro snížení emisí skleníkových plynů tím, že omezuje těžební činnost a snižuje tvorbu CO₂ při výrobě materiálů, které mohou být nahrazeny popílkem (např. portlandský cement) [35]. Tato metoda může být využita přímo v místě vzniku CO₂ a popílku, což má pozitivní dopady na životní prostředí (omezení přepravy nebezpečného popílku, jeho stabilizace v místě vzniku, omezení uvolňování CO₂ do atmosféry, případně přeprava zachyceného CO₂ k jinému místu uložení nebo využití) [36].

Velkou perspektivu pro využití CO₂ v blízké budoucnosti má cement používaný v betonových materiálech. Důvodem je velký objem těchto komerčně využívaných materiálů a jejich stálost [37]. Proces MC probíhá přirozeně velmi pomalu, a proto je nutné samotný průběh podpořit vhodně zvoleným reakčním prostředím, viz např. obr. 4.5 [38].

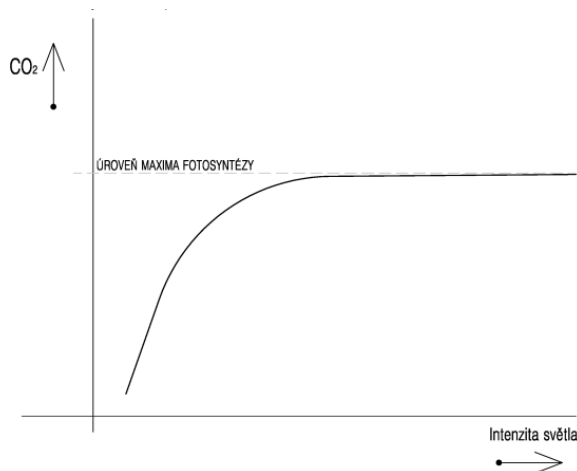


Obr. 4.5 Zjednodušené schéma experimentálního procesu karbonizace CFA, upraveno dle [21]

4.6 CCSU – Využití CO₂ při pěstování rostlin a řas

Dalším způsobem využití CO₂ je jeho přímé dávkování do skleníků za účelem udržení stále koncentrace, respektive zajištění dostatečného množství pro růst rostlin. Tato metoda se používá hlavně v letních měsících, kdy je největší intenzita slunečního záření a tím se zvyšuje potřeba CO₂ až do úrovně maxima schopnosti rostliny vstřebat CO₂ (viz obr. 4.3, který znázorňuje závislost potřeby CO₂ na intenzitě světla). V průmyslových sklenicích se CO₂ zvyšuje uměle, a to přímo dodáním stlačeného CO₂ do skleníku nebo spalováním propanbutanu.

CO₂ lze též využít pro pěstování řas. Tyto řasy se mohou využívat v potravinářském průmyslu (např. krmiva, doplněk stravy) nebo za pomoci biorafinace přeměnit na biopaliva či různé bioprodukty (barviva, léčiva apod.). Pro pěstování řas se využívají tzv. bioreaktory, do kterých se dávkuje CO₂, které je rozpuštěno ve vodě a díky fotosyntéze je zachycováno řasami. Roční přírůstek mikroskopických řas se liší v závislosti na podmínkách jako jsou např. intenzita světla, teplota apod. Při optimálních podmínkách dle zdroje [39], jako jsou světlo (500 nm), koncentrace CO₂ (0,06 – 0,4 %), teplota (15 – 20 °C) a vlhkost, je na 1 kg biomasy je využito asi 2 kg CO₂.



Obr. 4.6 Vliv intenzity světla na spotřebu CO₂ [40]

4.7 Shrnutí CCS a CCU

Jedno z hlavních omezení technologií CCS je nutné financování projektů a zatím obtížně definovatelné ekonomické přínosy pro společnost a firmy. Situaci by významně pomohla kvantifikace ekonomické škody dopadů globálních změn charakterizovaných např. ve formě Kč/t CO₂, která by těmto systémům definovala přidanou hodnotu. Dále by trhu s CCS prospělo financování projektů z dotačních fondů přímo k tomu určených. Problémem jsou také právní podmínky pro ukládání CO₂ a bezpečnostní rizika spojené s únikem CO₂ zpátky do ovzduší. Globální investice do CCS technologií v roce 2021 klesly o 23 % a to i přesto, že byl oznámen rekordní počet nových projektů. EU má v plánu se v následujících letech zaměřit nejen na zachycování CO₂ z průmyslových procesů, jako tomu bylo ve většině případů doposud, ale i na záchyt CO₂ ze vzduchu. U vlád po celém světě roste zájem o technologie CCS, které jim pomohou dosáhnout uhlíkové neutrality, ke které se zavázaly, a proto je pravděpodobné, že v budoucnu dojde ke zvýšení investic do CCS technologií. Názory mnoha odborníků se na CCS liší. Část odborníků v CCS vidí velký přínos, ale druhá část poukazuje na negativa, která jsou s CCS spojená, a to například, že ukládání CO₂ je energeticky náročný proces nebo potenciálně prodloužený provoz uhelných elektráren v případě použití CCS.

Většina z výše zmíněných postupů používání CO₂ je realizována. Nicméně prozatím převažuje využití CO₂, který se produkuje účelně přímo pro daný proces a není zachycován od producentů (elektrárny, ZEVO apod.), kde vzniká jako skleníkový plyn. Odklon od konvenčních procesů bude vyžadovat řadu změn jako jsou například: vzdělání výrobců a spotřebitelů, nové normy, vývoj a výzkum zaměřený na řešení problémů a překážek, vládní financování vývoje a zavádění nových technologií apod. CCU by měl pomoci s přechodem na uhlíkovou neutralitu. Možnou nevýhodou metod CCU je, že se CO₂ na konci životního cyklu výrobku dostane zpět do atmosféry a nedochází tak k trvalému uložení, jako u metod CCS. Tím se CCU řadí mezi uhlíkově neutrální technologie, ale už ne mezi uhlíkově záporné. Výjimkou je např. minerální karbonátce, kde je CO₂ trvale uložen. Na druhou stranu CCU vytváří produkty s přidanou hodnotou a tím přináší ekonomické přínosy využití CO₂.

CCS a CCU bude hrát v budoucnu významnou roli při řešení uhlíkové neutrality. Některé státy (např. Norsko) si tuto skutečnost uvědomují a investují i do zahraničních projektů (viz kapitola 5.1).

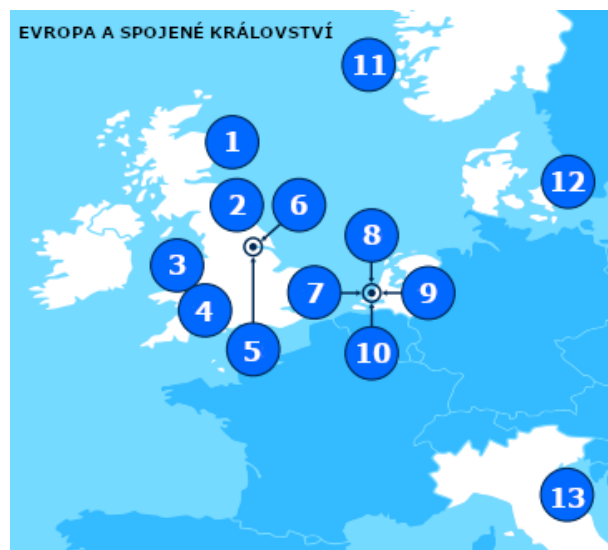
5 Současný stav CCU a CCS v Evropě

Celkové emise CO₂eq EU za rok 1990 činily 4 925 mil. tun CO₂eq/rok. V roce 2019 se emise snížily o 24 % a to na 3 743 mil. tun CO₂eq. Cílem EU je snížit emise do roku 2030 o 55 % a do roku 2050 o 100 % (počet emisí roven 0) v porovnání s rokem 1990.

V současné době je v Evropě a Spojeném království ve vývoji 35 projektů zabývajících se CCS a 28 projektů, které byly dokončeny, ale jen 9 z nich je v provozu z důvodu problémů, jako je např. nedostatek financí, technologické a legislativní problémy (viz obr. 5). Příprava projektů CCS v EU roste. Ze 75 mil. tun CO₂eq/rok na konci roku 2020 vzrostla kapacita rozpracovaných projektů v září 2021 na 111 mil. tun CO₂eq/rok, což činí nárůst o 48 % [41].

Tab. 5a Příklady technologií CCS v Evropě a Spojeném království [42]

č.	Název	Kapacita [Mtpa]	Sektor	Doprava	Uložení
1	Acorn	5 – 10	Zpracování zemního plynu	Potrubí	Hluboké solné formace
2	Net Zero Teesside	0,8 – 6	Zemní plyn, výroba hnojiv	Potrubí	Hluboké solné formace
3	HyNet North West	4,5 – 10	Výroba hnojiv a cementu	Potrubí	Hluboké solné formace
4	South Wales Cluster	9	Produkce vodíku a zemního plynu	Potrubí, lodě	Hluboké solné formace
5	Humber zero	8	Produkce vodíku a zemního plynu	Potrubí	Hluboké solné formace
6	Zero Carbon Humber	až 18,3	Výroba železa a oceli, produkce cementu	Potrubí	Hluboké solné formace
7	AntwerpC	9	Chemická produkce, rafinérie, výroba vodíku	Potrubí	Hluboké solné formace
8	Greensand	3,5	Výroba cementu, spalování odpadu	Potrubí, lodě	Vyčerpané zásobníky ropy
9	Athos	1 – 6	Výroba oceli, vodíku, spalování odpadu	Potrubí	Zvažují se různé možnosti
10	Porthos	2 – 5	Chemická produkce, výroba vodíku	Potrubí	Vyčerpané zásobníky ropy
11	Langskip	1,5 – 5	Výroba cementu, spalování odpadu	Potrubí, lodě	Hluboké solné formace
12	C4 Copenhagen	3	Spalování odpadu a zemního plynu	Potrubí	Hluboké solné formace
13	Ravenna Hub	4	Produkce vodíku a zemního plynu	Potrubí	Vyčerpané zásobníky ropy



Obr. 5 CCS technologie v Evropě a Spojeném království, upraveno dle [42]

Aktuálně se v Evropě nachází 9 CCU technologií, které jsou buď ve výstavbě anebo už jsou spuštěny. Největší podíl má na projektech Norsko, Nizozemsko a Belgie.

Tab. 5b Příklady technologií CCU v Evropě [43]

č.	Název	Kapacita [Mtpa]	Sektor	Využití CO ₂	Stát
1	CCU Lighthouse Carboneras	0,7	Výroba cementu	Zvýšení produkce plodin	Španělsko
2	Port Jérôme CO ₂ Capture Plant	0,1	Výroba vodíku reformingem zemního plynu	Konzervace a zmrazování potravin	Francie
3	Flite	–	Výroba železa	Výroba bioetanolu	Belgie
4	AVR-Duiven	0,1	Zpracování zbytkového odpadu	Zvýšení produkce plodin	Nizozemsko
5	Westküste100	–	Výroba cementu	Výroba metanolu	Německo
6	Norsk e-fuel	–	Přímé zachycování CO ₂ ze vzduchu	Výroba e-paliva pro letadla	Norsko
7	Twence Waste-to-Energy CO ₂ Capture and Utilisation	0,1	ZEVO	Zvýšení produkce plodin	Nizozemsko
8	North-CCU-Hub	–	Výroba vodíku reformingem zemního plynu	Výroba metanolu	Belgie
9	Project AIR	0,5	Chemický průmysl	Výroba metanolu	Švédsko

5.1 Potenciál využití CCS a CCU v České republice

Celkové emise ČR za rok 1990 činily 200 mil. tun CO₂eq. V roce 2018 se emise snížily na 123 mil. tun CO₂eq. Do roku 2030 má ČR snížit emise o 55 % oproti roku 1990 což je o 90 mil. tun CO₂eq na hodnotu 110 mil. tun CO₂eq a do roku 2050 by měla být ČR uhlíkově neutrální. Podle výpočtu by tak měla ČR ročně snižovat emise o cca 4,5 Mt což se rovná ročním emisím uhelné elektrárně Počerady, která za rok 2020 vypustila přes 4,5 Mt CO₂ a je tak největším producentem emisí v ČR.

V České republice zatím žádný z CCS projektů není spuštěný. V roce 2024 je v plánu dokončení pilotního projektu, který nese název „CO₂ SPICER“. Na projektu se podílí česká geologická služba, Norsko a společnost MND. Projekt se zabývá uložením CO₂ do vytěžených ropných vrstev po společnosti MND. Kapacita vytěžených ložisek ropy a plynu je v ČR poměrně nízká. Větší potenciál má geologické ukládání CO₂ – dle české geologické služby byla úložná kapacita hlubokých akviferů předběžně odhadnuta na 760 až 2860 milionů tun, což významně přesahuje vypouštěné emise CO₂.

Další metoda, která má na území ČR potenciál, je využití zachyceného CO₂ ve sklenících, které postupně nabírají na popularitě a jejich počet roste. Příkladem úspěšné realizace je projekt nizozemské společnosti AVR, která provozuje ZEVO a ze spalin zachytává až 85 % CO₂, které je následně přepraveno v cisternách a využíváno ve sklenících. Tento projekt zároveň naznačuje další možnost aplikace CCS/CCU na území ČR. Kvůli ukončení skládkování v roce 2030 je předpoklad, že budou připraveny projekty na výstavbu ZEVO. Přidáním CCS do ZEVO má potenciál učinit z odpadu zdroj energie s nulovými nebo dokonce zápornými emisemi, v závislosti na původu využívaného odpadu. Výhodou je, že CCS/CCU může být instalováno za systém čištění spalin a není tak nutné upravovat stávající zařízení. Omezení může představovat nižší koncentrace CO₂ ve spalinách.

Velký potenciál CCUS má ČR v ZEVO. Kvůli ukončení skládkování v roce 2030 se odpadové hospodářství stále více zaměřuje na projekty výstavby nových ZEVO. Další výhoda u ZEVO je využití separace CO₂ po spalování. Tuto metodu je možné využít u stávajících zařízení bez potřeby úprav stávajícího zařízení. Bohužel v ČR se zatím na žádném projektu, který by propojil ZEVO s CCUS, nepracuje. V roce 2012 byl přijatý zákon č. 85/2012 Sb. o ukládání CO₂ do přírodních horninových struktur, který například určuje podmínky pro povolování úložišť CO₂, povinnosti při provozu a po jeho uzavření. V ČR legislativa zatím povoluje ukládat maximální množství 1 MtCO₂ za rok.

6 Analytické stanovení množství zachyceného CO₂

Na základě přehledu CCS a CCU a jejich potenciální využitelnosti na území ČR jsou v této kapitole provedeny ukázkové výpočty vybraných technologií CCSU. Analytické stanovení množství zachyceného CO₂ vychází ze zadaných parametrů složení spalin z energetického zařízení na palivový dřevní mix (poskytnuto společností EVECŮ Brno) a předpokládané účinnosti vybrané metody. Jedná se o zjednodušenou ukázkou použitelnosti CCSU, která neslouží k definitivnímu porovnání výhodnosti metod, jelikož se jedná o komplexní problematiku, vždy závislou na místních podmínkách a možnostech.

Parametry spalin pro modelové příklady:

Průtok spalin Q	8 100 Nm ³ /h
CO ₂	9 % obj.
Popílek	30 kg/h

Hmotnostní průtok CO₂

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{Q \cdot V_{CO_2}}{V_{m,ideal}} \cdot M_{CO_2} = \frac{8100 \cdot \frac{9}{100}}{22,414} \cdot 44 = 1431 \text{ kgCO}_2/\text{h} = 12536 \text{ tCO}_2/\text{rok} \quad (6.1)$$

\dot{m}_{CO_2} hmotnostní průtok CO₂ za hodinu [kgCO₂/h]

Q průtok spalin [Nm³/h]

V_{CO₂} objemová koncentrace ve spalinách [%]

V_{m,ideal} molární objem ideálního plynu [m³/kmol]

M_{CO₂} molární hmotnost CO₂ [kg/mol]

Z výpočtu (rovnice 6.1) vyplývá, že energetické zařízení na dřevěný mix vyprodukuje přibližně 12536 tunCO₂/ročně. Srovnání vybraných CCU technologií pro dané zařízení:

Využití CO₂ ve sklenících

Ve sklenících v ČR se spotřebuje přibližně 250 tun CO₂ ročně na 1 ha skleníku. Největší množství CO₂ je dodáváno v letních měsících, tzn. potřebná dodávka CO₂ do skleníku není po celý rok nerovnoměrná.

$$S_{sk} = \frac{\dot{m}_{CO_2,rok}}{x_s} = \frac{12536}{250} = 50 \text{ ha} \quad (6.2)$$

S_{sk} plocha skleníku

$\dot{m}_{CO_2,rok}$ hmotnostní průtok CO₂ za rok [tCO₂/rok]

x_s spotřeba CO₂ na 1 ha skleníku

Z rovnice 6.2 vyplývá, že 12536 tun CO₂ lze využít ročně pro přibližně 50 ha skleníků. V roce 2021 celková výměra skleníků v ČR pro rychlou zeleninu (např. rajčata, okurky) činila 99 ha. CO₂ zachycený z energetického zařízení na palivový dřevěný mix tedy může potenciálně pokrýt přes polovinu poptávky po CO₂ do skleníků.

Využití CO₂ v bioreaktorech

Dle dostupných dat je známé, že 1 kg „teplomilných“ řas spotřebuje okolo 2 kg CO₂ při optimální teplotě kolem 30 °C [44,45]. V příkladu je uvažovaný typ uzavřeného mikrořasového bioreaktoru. Na základě výpočtu z rovnice 6.3 je možné vypočítat kolik mikrořasové biomasy zvládneme vypěstovat ze získaného CO₂.

$$m_{\dot{r}} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{k} = \frac{1431}{2} = 716 \text{ kg/h} = 6268 \text{ t/rok} \quad (6.3)$$

$m_{\dot{r}}$ produkované množství mikrořasové biomasy [kg/h]

\dot{m}_{CO_2} hmotnostní průtok CO₂ za hodinu [kgCO₂/h]

k koeficient pro převod množství CO₂ na množství biomasy [-]

Dle rovnice 6.4 je vypočítaný potřebný objem bioreaktoru a tedy i kultivačního média, který je potřeba pro produkci 716 kg/h mikrořasové biomasy.

$$V_{reaktor} = \frac{m_{\dot{r}}}{k_{prod}} = \frac{716}{0,021} = 34095 \text{ m}^3 \quad (6.4)$$

$V_{reaktor}$ celkový objem kultivačního systému [m³]

$m_{\dot{r}}$ produkované množství mikrořasové biomasy [kg/h]

k_{prod} koeficient produktivity produkce biomasy [kg/m³·h]

Potřebná plocha pro výstavbu kultivačního systému je:

$$S = \frac{V_{reaktor}}{k_{rp}} = \frac{34095}{0,0448} = 761054 \text{ m}^2 = 76,11 \text{ ha} \quad (6.5)$$

S plocha potřebná pro výstavbu kultivačního systému [m²]

$V_{reaktor}$ celkový objem kultivačního systému [m³]

k_{rp} koeficient převodu objemu bioreaktoru na plochu [m]

Využití námi zvoleného typu bioreaktoru není v našem měřítku investičně ani technologicky výhodné, protože kultivační systém by zabíral velkou plochu o rozloze cca 76 ha. Bioreaktor se však může zkombinovat s dalšími CCU technologiemi. Tím se množství CO₂ rozdělí mezi více technologií a zmenší se tím množství určené pro záchyt v bioreaktorech. Tímto dosáhneme menší plochy potřebné pro výstavbu bioreaktoru a bude to investičně i technologicky přijatelnější.

Využití popílku

Z literatury [44] vyplývá, že na výrobu 1 kg karbonátového popílku (CFA) je potřeba přibližně 32 g CO₂ a 1 kg popílku (FA) zachyceného ze zařízení. Z rovnice 6.5 vyplývá, jaké množství CO₂ je možné ročně využít při výrobě CFA na množství zachyceného FA z energetického zařízení na palivový dřevní mix.

$$u_{CO_2} = m_{FA,rok} \cdot x_{CO_2} = 262,8 \cdot 32 \cdot 10^{-6} = 0,0084 \frac{t}{rok} = 8,4 \frac{kg}{rok} \quad (6.5)$$

u_{CO_2} roční využití CO₂ [t/rok]
 $m_{FA,rok}$ množství zachyceného FA za rok [t/rok]
 x_{CO_2} množství CO₂ využitého na 1 kg CFA [t]

Dle rovnice 6.5 vychází, že ročně je možné využít 8,4 kg CO₂ na výrobu CFA ze zachyceného FA. Dle literatury [44] vyplývá, že v procesu z 1 kg FA vyrobíme 1 kg CFA, takže ročně je možné vyprodukovat 262,8 t CFA při využití popílku z energetického zařízení.

Dále vyrobený CFA může nalézt využití při výrobě betonu. U výroby betonu se CFA smíchá s cementem a dalšími materiály (např. voda) a díky tomu se dosáhne úspor ostatních materiálů, které jsou k výrobě betonu potřeba (např. cement, vápno). Při výrobě těchto materiálů se produkuje velké množství CO₂ a při jejich nahrazení CFA se uspoří velké množství CO₂. Přidáním CFA do betonu se zvyšuje pevnost v tlaku, snižuje se hmotnost a zlepšuje se zpracovatelnost betonové směsi. V literatuře se uvádí, že 50 kg CFA nám uspoří přibližně 20 kg cementu na 1 m³ vyrobeného betonu [45,46]. Dle rovnice 6.6 je vypočítané množství cementu, které se uspoří díky CFA.

$$u_{cem} = \frac{m_{CFA}}{x_{CFA}} \cdot x_c = \frac{262800}{50} \cdot 20 = 105120 \text{ kg/rok} = 105,12 \text{ t/rok} \quad (6.6)$$

u_{cem} úspora cementu [kg]
 m_{CFA} množství CFA [kg/rok]
 x_{CFA} potřebné množství CFA k úspoře 20 kg cementu na 1 m³ [kg]
 x_c množství cementu uspořené z 50 kg CFA [kg]

Z rovnice 6.6 plyne, že CFA ročně uspoří 105,12 t cementu.

ZÁVĚR

V práci je popsána legislativa a politické nástroje pro snížení emisí jako jsou např. EU ETS, European Green Deal apod. Dále byly v práci konkrétně rozebrány technologie CCS a CCU. Byly popsány jejich výhody a nevýhody, potenciál využití do budoucna a zjednodušený princip, na kterém fungují. Dále práce posuzovala aktuální stav CCS a CCU v EU a ČR a projekty, které jsou spuštěné nebo na kterých se pracuje. Poslední část práce se zaměřila na analytické výpočty vybraných metod a tím zjištění, jaké množství CO₂ lze danou metodou zachytit nebo využít.

Budoucí perspektiva technologií pro využití oxidu uhličitého je více než jasná a tím i to, že v různých průmyslových odvětvích existuje obrovský potenciál pro uvedení zachyceného CO₂ na trh jako obnovitelného zdroje. S tím se pojí, ale nevýhoda zpětného vypouštění CO₂ do atmosféry (viz kapitola 4.7). Očekává se, že s budoucím výzkumem a vývojem klíčových složek využití CO₂, o nichž bylo pojednáváno výše, bude mít většina navrhovaných nebo vznikajících technologií souvisejících s využitím CO₂ snižující se náklady, což umožní oslovit více trhů.

Výběr strategie snižování emisí pro průmyslová odvětví je složitý problém, který zahrnuje více kritérií. Při tomto úsilí je důležité zajistit, aby vybraná možnost byla ekologicky, ekonomicky a sociálně udržitelná. Proto jsou pro přijímání informovaných a efektivních rozhodnutí nezbytné nástroje a rámce pro plánování emisních strategií v odvětvích průmyslu. Obecně se zachycování CO₂ nepovažuje za řešení mezi těmito strategiemi. Zachycování CO₂ je vysoce nákladný nástroj pro snižování emisí. V minulosti, kdy byla cena přibližně 50 euro za tunu vypuštěného CO₂, se firmám nevyplatilo investovat do technologií záchytu, jelikož náklady na emisní povolenky byly nižší než náklady na záchyt CO₂. Aktuální ceny emisních povolenek (cca 85 eur za tunu vypuštěného CO₂) však napomáhají ke zvyšování zájmu právě o technologie CCUS.

Závěrem je potřeba zmínit, že klimatická změna se nedá zastavit jen za pomoci CCS a CCU. K řešení této krize bude potřeba sofistikovaný přístup ve všech odvětvích a zapojení všech států na planetě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Fakta o klimatu [online]. Česká republika: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2021 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/>
- [2] PÖRTNER, H.O., D.C. ROBERTS, M. TIGNOR, et al., 2022. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [3] MYHRE, G., D. SHINDELL, F. M. BRÉON, et al., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- [4] European Commission, Directorate-General for Communication, European green deal: delivering on our targets, Publications Office, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2775/373022>
- [5] Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance, 2020. European Union, 2020, 1-67
- [6] HRUBÝ M., 2021. Potential for CCS in V4 – will we seize the momentum? October 2021. V4 Think-Tank Playtform
- [7] MACDOWELL, N., N. FLORIN a A. BUCHARD, 2010. An overview of CO₂ capture technologies. Energy & Environmental Science [online]. [cit. 2022-05-19]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/c004106h
- [8] KROUPA, Z.. Posouzení metod CCS a CCU [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-01-31]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125844>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš
- [9] CUÉLLAR, F., R. AZAPAGIC a A. AZAPAGIC, 2015. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. Journal of CO₂ Utilization [online]. [cit. 2022-05-19]. ISSN 22129820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcou.2014.12.001
- [10] AL-MAMOORI, A., A. KRISHNAMURTHY, A. A. ROWNAGHI, F. REZAEI, Energy Technol. 2017, 5, 834
- [11] ŠURÁŇ, M., Carbon Capture Storage/Utilization [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132100>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Martin Lisý
- [12] REMEKOVÁ, V., Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny – metody aplikovatelné v místě zdrojů skleníkových plynů. Brno, 2021. Dostupné take z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132487>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Lízal

- [13] CAO C, H. LIU, Z. HOU, F. MEHMOOD, J. LIAO, W. FENG. A Review of CO₂ Storage in View of Safety and Cost-Effectiveness. *Energies*. 2020; 13(3):600
- [14] ZONG, J., L. SUN a W. BAO, 2020. Research of present status and development suggestions regarding the carbon capture, utilization and storage. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. Dostupné z: doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/510/4/042001>
- [15] NAVARRETE, P. a F. VEGA, 2019, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*
- [16] IEA, *World Energy Outlook 2019*, Nov. 2019.
- [17] BOOT, H., E. MATTHEW a et. Carbon capture and storage update. *Energy & Environmental Science* 7.1. 2014, 130-189.
- [18] BOXUN, H., C. GUILD a S. L. SUIB., 2013, Thermal, electrochemical, and photochemical conversion of CO₂ to fuels and value-added products. *Journal of CO₂ Utilization* 1., 18-27.
- [19] ANGEL, S. J., G. VIDYADHARANI a S. SUGUMAR., 2022, Carbon cycle feedbacks and global warming: a microbial perspective. *Microbiome Under Changing Climate*. Woodhead Publishing., 371-391.
- [20] MARKEWITZ, P. and et., 2012 Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂. *Energy & environmental science* 5.6.
- [21] SOTO, A., Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) and how to accelerate the development and commercialization of carbon capture technologies and carbon-based products in the European and United States markets. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2021.
- [22] SU, X. and B. LIANG, 2016, Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methane: A review of recent studies. *Journal of Energy Chemistry*
- [23] National Research Council, *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration*. The National Academies Press, 2015
- [24] ALVAREZ, A. and A. BANSODE, Challenges in the greener production of formates/formic acid, methanol, and DME by heterogeneously catalyzed CO₂ hydrogenation processes. *Chemical Review*, 2017.
- [25] JADHAY, J. and D. VAIDYA, Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: A review of recent studies. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014.
- [26] OLAH, G. Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy, *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 44, pp. 2636–2639, 2005
- [27] The National Academies of Sciences, *Engineering, Medicine, Gaseous Carbon Waste Streams Utilization: Status and Research Needs*. The National Academies Press, 2019
- [28] TUNIO, S. Q., et al. Comparison of different enhanced oil recovery techniques for better oil productivity. *International Journal of Applied Science and Technology* 1.5, 2011

- [29] PERERA, M. and A. SAMINTHA, et al. A review of CO₂-enhanced oil recovery with a simulated sensitivity analysis. *Energies* 9.7, 2016
- [30] AL HAJERI, S., et al. Design and Implementation of the first CO₂-EOR Pilot in Abu Dhabi, UAE. SPE EOR Conference at Oil & Gas West Asia. OnePetro, 2010
- [31] AMPOMAH, W., et al. Farnsworth field CO₂-EOR project: performance case history. SPE improved oil recovery conference. OnePetro, 2016
- [32] HAMZA A., A. H. IBNELWALEDD, M. J. AL-MARRI, M. MAHMOUD, R. SHAWABKEH and S. APARICIO, CO₂ enhanced gas recovery and sequestration in depleted gas reservoirs: A review, *Journal of Petroleum Science and Engineering*
- [33] GUIRADO L. S., Detection, activation capture and valorization of CO₂ in green solvents through processes electrochemically triggered. Spain, 2021, Barcelona. Universitat Autònoma de Barcelona. Programa de Doctorat en Electroquímica. Ciència i Tecnologia. Vedoucí práce Guirado López, Gonzalo
- [34] DINDI, A., DANG V. Q., and RM ABU-ZAHRA M. Simultaneous carbon dioxide capture and utilization using thermal desalination reject brine. *Applied Energy* 154, 2015
- [35] SIRIRUANG C., TOOCHINDA P., JULNIPITAWONG J. and TANGTERMSIRIKUL S., CO₂ capture using fly ash from coal fired power plant and applications of CO₂-captured fly ash as a mineral admixture for concrete, *J. Environ. Manage.*, sv. 170, s. 70-78, 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.010
- [36] PATRICIO, J., A. ANGELIS-DIMAKIS, A. CASTILLO-CASTILLO, Y. KALMYKOVA a L. ROSADO, 2019. Region priority for the development of carbon capture and utilization technologies. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcou.2016.10.002
- [37] DUTZIK T., How the Wisconsin Policy Research Institute Gets the Economics of Energy Policy Wrong, p. 11.
- [38] COSTA, G., R. BACIOCCHI, A. POLETTINI, R. POMI, C. D. HILLS a P. J. CAREY. Current status and perspectives of accelerated carbonation processes on municipal waste combustion residues. *Environ. Monit. Assess.* 55-75. Dostupné z: doi:10.1007/s10661-007-9704-4
- [39] BUDIŠ, M. Energetické využití biomasy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš, Ph.D
- [40] Jak udržet nebo zvýšit obsah CO₂ ve skleníku?. In: Dobrý skleník [online]. [cit. 2022-04-20]
- [41] CO₂RE Database (2021) Global CCS Institute. Available at: <https://co2re.co/> (Accessed: 25 June 2021)
- [42] Global CCS Institute, 2021. The Global Status of CCS: 2021. Australia.

- [43] Zero Emissions Platform CCS/CCU projects. Zero Emissions Platform [online]. Brussels, Belgium [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://zeroemissionsplatform.eu/about-ccs-ccu/css-ccu-projects/>
- [44] EBRAHIMI, A. & S., MORTEZA & MILANI, DIA & MONTOYA, ALEJANDRO & VALIX, MARJORIE & ABBAS, 2016. The use of carbonated fly ash (CFA) in a cement blend for 'green' construction materials
- [45] PRESS, Profí. Možnosti využití popílků ze spalování černého uhlí. Odpady-online [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/moznosti-vyuziti-popilku-ze-spalovani-cerneho-uhli/>
- [46] SEVERA, T. a J. FRÁNA, 2009. Rekultivace a využití elektrárenských popílků. České Budějovice. Zemědělská fakulta Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CBAM	Mechanismus uhlíkového vyrovnání na hranicích (Carbon Border Adjustment Mechanism)
CCS	Zachycení a uskladnění CO ₂ (Carbon Capture and Storage)
CCU	Zachycení a využití CO ₂ (Carbon Capture and Utilization)
CCUS	Pojem pro souhrn CCS a CCU (Carbon Capture, Utilization and Storage)
CFA	Karbonátový popílek (Carbonated Fly Ash)
CO _{2eq}	Ekvivalent CO ₂
COP 21	Konference OSN v rámci klimatu (Conference Of the Parties)
ČR	Česká republika
EOR	Terciální těžba ropy (Enhanced Oil Recovery)
ETS	Systém pro obchodování s emisemi (Emissions Trading System)
EU	Evropská unie (European Union)
FA	Popílek (Fly Ash)
GD	Zelená dohoda pro Evropu (Green Deal)
IEA	Mezinárodní agentura pro energii (International Energy Agency)
ppm	Miliontina (Parts Per Million)
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadů

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1 Vývoj emisí v Evropské unii v letech 1990–2019 [51]
- Obr. 1.2 Souvislost koncentrace CO₂ v atmosféře a globálního oteplování [51]
- Obr. 2 Technologie pro zachycování CO₂ [32]
- Obr. 3 Odhad dalšího vývoje klíčových technologií pro snižování emisí CO₂ [53]
- Obr. 3.1 Podíl principů zachycování CO₂ v čase [53]
- Obr. 4 Cesty pro přímou a nepřímou konverzi procesů CCU a zdroje CO₂ [19]
- Obr. 4.5 Terciální metoda těžby ropy [47]
- Obr. 4.4 Procesní schéma pro odsolování [46]
- Obr. 4.5 Zjednodušené schéma experimentálního procesu karbonizace HCFA [45]
- Obr. 4.6 Vliv intenzity světla na spotřebu CO₂ [55]
- Obr. 5 CCS technologie v Evropě a Spojeném království

SEZNAM TABULEK

Tab. 5a Příklady technologií CCS v Evropě a Spojeném království [50]

Tab. 5b Příklady technologií CCU v Evropě [58]