



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

POSOUZENÍ METOD CCS A CCU

ASSESSMENT OF CCS AND CCU METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zdeněk Kroupa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Zdeněk Kroupa
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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 diplomové práce:

Posouzení metod CCS a CCU

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době je velmi intenzivně probíráno téma klimatické krize a globálního oteplování v souvislosti s nárůstem oxidu uhličitého v atmosféře. Energetika postavená na uhelných fosilních palivech ke zvyšování koncentrací CO₂ v atmosféře přispívá. Diplomová práce se bude zabývat porovnáním možných technologií, kterými je možné emise CO₂ z energetických závodů redukovat.

Cíle diplomové práce:

- rešerše metod CCS a CCU,
- detailní popis vybraných metod,
- ekonomické a energetické posouzení vybraných metod CCS a CCU.

Seznam doporučené literatury:

METZ, Bert. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge: Cambridge University Press, for the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005. ISBN 05-218-6643-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na technologie CCS a CCU, které by v budoucnu mohly najít uplatnění v průmyslu a dalších odvětvích. Tyto technologie se používají ke snížení množství emisí CO₂ převážně z bodových zdrojů. Tato diplomová práce přináší ucelený přehled a rozdělení technologií CCS a CCU a zároveň poukazuje na negativní vlivy jejich instalace. Součástí práce je také porovnání jednotlivých kroků technologií, a to jak z energetického, tak z finančního hlediska. Snahou je ukázat širokou škálu vlivů na konečnou cenu a značný rozpor ve výsledcích některých vědeckých prací. V práci je rovněž možné nalézt detailní popis jednotlivých částí technologií.

Klíčová slova

CO₂, CCS, CCU, separace CO₂, zachycení CO₂, uskladnění CO₂

ABSTRACT

The thesis focuses on CCS and CCU technologies, which could find application in industry and other sectors in the future. These technologies are used to reduce CO₂ emissions, mainly from point sources. This thesis provides a comprehensive overview and division of CCS and CCU technologies and points out negative effects of its installation. Part of the work is also a comparison of individual steps of technology, both from an energetic and financial point of view. The aim is to show a wide range of influences on the final price and a significant discrepancy in the results of some scientific works. At the same time, in some parts, you can find a detailed description of individual parts of the technology.

Key words

CO₂, CCS, CCU, CO₂ separation, CO₂ capture, CO₂ storage

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KROUPA, Zdeněk. *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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Posouzení metod CCS a CCU** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Mgr. Lucii Nekvindové za cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování této závěrečné práce.

Děkuji také svému vedoucímu doc. Ing. Marku Balášovi Ph.D. za konzultace a cenné rady při vypracování této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD	13
1 Oxid uhličitý	15
1.1 Obecné vlastnosti	15
1.2 Historie	15
1.3 Skleníkový efekt.....	15
1.4 Globální oteplování v důsledku produkce CO ₂	16
1.5 Koloběh uhlíku v přírodě	18
2 Technologie CCS a CCU obecně.....	20
2.1 Možnosti separace oxidu uhličitého	20
2.1.1 Spalování paliva se vzduchem a separace CO ₂ ze spalin	21
2.1.2 Spalování paliva s čistým kyslíkem a separace CO ₂ ze spalin	22
2.1.3 Zachycení před spalováním	23
2.2 Typy technologií separace CO ₂	25
2.2.1 Membránové separační procesy (MSP).....	25
2.2.2 Kryogenní separace	26
2.2.3 Absorpční separační procesy	28
2.2.4 Adsorpční separační procesy	28
2.3 Transport oxidu uhličitého	28
3 Technologie CCS	30
3.1 Uložení oxidu uhličitého v oceánu	30
3.2 Uložení oxidu uhličitého v geologických strukturách.....	32
3.3 Uložení oxidu uhličitého mineralizací	34
4 Technologie CCU	35
4.1 Přímé využití	35
4.2 Výroba biopaliva z řas.....	35
4.3 Zisk nedostupných zdrojů paliv vstříkovaním CO ₂	36
4.4 Přeměna CO ₂ na paliva a chemikálie	38
4.5 Ferrock.....	39
4.6 Přímé zachycení CO ₂ ze vzduchu	40
4.7 Umělé stromy	41
5 Ekonomie procesů.....	43
5.1 Cena za separaci CO ₂	43
5.2 Cena transportu a uskladnění CO ₂	44
5.2.1 Cena potrubního transportu	45
5.2.2 Cena uskladnění.....	45
5.3 Energetické náklady na CCS oproti technologii bez CCS	46
6 Situace v České republice	47
6.1 Emisní obchodování	49
6.2 Pilotní projekty a návrhy technologií CCS a CCU v České republice.....	50
6.2.1 Elektrárna spalující hnědé uhlí	50

6.2.2	Plynová elektrárna s kombinovaným cyklem	52
6.3	Nizozemský projekt CO ₂ Smart Grid	53
7	Závěr.....	55
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK	67

ÚVOD

V dnešní době je kladen stále větší důraz na šetrné chování člověka k životnímu prostředí. Podle Pařížské dohody přijaté v OSN v roce 2015 se státy zavázaly k udržení průměrné globální teploty výrazně pod 2 °C oproti průměrnému teplotnímu stavu před průmyslovou revolucí, kde se začaly hodnoty CO₂ v atmosféře výrazně zvyšovat. Evropské země se v souvislosti s touto smlouvou zasadily snížit svoje emise skleníkových plynů o 40 % ve srovnání s rokem 1990 a to do roku 2030 [46]. Aktuálně probíhají v Evropském parlamentu jednání o další navýšení této procentuální hodnoty na 55 %. Je zcela zřejmé, že tyto cíle nebudou naplněny bez přičinění. Tyto závazky lze v aktuálním dění vidět třeba v přechodu od fosilního spalování za účelem zisku energie k alternativním ekologickým zdrojům, šířením osvěty ohledně nakládání s odpady nebo výstavbou ekologických budov. Dále lze také pozorovat snižování emisí u automobilů, které má ovšem svoje technologické a cenové limity a nelze je snižovat do nekonečna. Zároveň přechod k elektromobilové dopravě je prozatím stále hudbou budoucnosti a z ekologické stránky úzce souvisí s metodami výroby energie. Dle vědeckých výzkumů by kvůli současnému vysokému podílu fosilních paliv na výrobě elektrické energie byla elektromobilová doprava větším producentem CO₂ než současná spalovací doprava.

Řešení světového globálního problému zvyšování emisí CO₂ bychom mohli nalézt ve využití technologií CCS a CCU, kterými se zabývá tato diplomová práce. Ať už jsou na vině jakékoliv faktory, emise skleníkových plynů v atmosféře prokazatelně rostou (viz Obr. 3). Od začátku vývoje člověka oscilovaly hodnoty CO₂ v atmosféře a nyní se nachází při horní hranici této pomyslné oscilace. Zároveň existují vědecké výzkumy, které prokazují určitou přírodní samoregulaci CO₂. Jednoduše řečeno rostliny v prostředí s vyšší koncentrací CO₂ rostou rychleji, a proto absorbují jeho větší množství (viz. kapitola 1.4). Bohužel jak ukazuje Obr. 4, procento zalesnění naší planety neustále klesá.

Bez skleníkového efektu by na Zemi neexistoval život, určitě ne tak jak ho známe. Skleníkové plyny nejsou něco špatného, jak se lze občas dočíst v populární literatuře. Aktuálně je však koncentrace těchto plynů na vyšší úrovni, což vede ke globálnímu oteplování. Technologie CCS a CCU zabraňují uvolňování CO₂ do atmosféry. Tyto technologie mají za úkol zachytit neboli odseparovat CO₂ ze spalin u bodových zdrojů, případně přímo ze vzduchu. Následně je CO₂ přepravováno a uloženo do vhodných a dostupných uložišť nebo dále využito ke komerčním účelům. Z oxidu uhličitého se tedy může stát i cenná komodita, používá se totiž v celé řadě odvětví. Kupříkladu může být využíván při těžbě ropy, při výrobě stavebních materiálů, v potravinářském průmyslu apod. Jednotlivými částmi těchto procesů (CCS a CCU) a rozdělením těchto technologií se budu zabývat tato diplomová práce. Součástí práce je i ekonomické a energetické srovnání jednotlivých technologických kroků.

V prvních dvou fázích, což jsou zachycení a doprava, se technologie CCS a CCU téměř neodlišují. Rozdíl je až ve fázi poslední, kde u CCS se CO₂ pouze uloží bez dalšího využití. S takovýmto uložením jsou spojena značná bezpečnostní rizika. Protože u CCS se jedná o dlouhodobé uložení a je nutné počítat s mnoha faktory. Existuje zde riziko zemského pohybu a následného úniku CO₂, vytlačení nebezpečných látek z uložišť nebo další ekologická rizika v podobě změny chování živočichů v prostředí se zvýšeným množstvím CO₂ apod. U technologie CCU se CO₂ dále využívá ke komerčním účelům. Za zmínku z okruhu CCU dozajista stojí technologie výroby paliv z CO₂ (viz. 4.4), kde je ovšem potřeba rychlého využití paliva (6 měsíců), protože po uplynutí této doby se oxid uhličitý uvolní z chemické vazby. Další zajímavou technologií je stavební materiál ferrock (4.5), který je vyroben z odpadních materiálů a CO₂. Přimísením ferrocku při výrobě betonu se prokazatelně zvyšují všechny jeho pevnostní charakteristiky. Zajímavou se může jevit technologie výroby paliv z řas

využívajících CO₂ pro výživu (4.2). Výroba může být ještě zefektivněna za pomoci bioreaktorů. Dále existují technologie přímého zachycení CO₂ ze vzduchu za pomoci absorpčních metod, kde jeden z pilotních projektů spolufinancuje úspěšný podnikatel Bill Gates (4.6). V neposlední řadě nelze zapomenout ani na pryskyřičný materiál, který bez jakékoliv energetické potřeby odebírá ze vzduchu značnou část CO₂ a při kontaktu s prostředím s vyšší vlhkostí ho opět uvolňuje zpět (4.7).

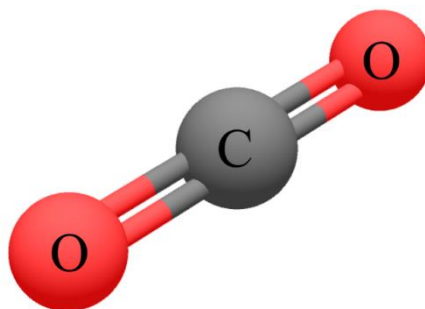
V poslední části diplomové práce zabývá faktory, které ovlivňují ceny technologií CCS a CCU společně s jejich cenami. Na úplný závěr je nastíněna situace ohledně CCS v České republice. Konkrétně jsou to místa uložení a jejich kapacity, které jsou prověřené a aktuálně i cenově dostupné (kapitola 6). Navíc zde jsou ukázány i konkrétní návrhy instalací a jejich negativní vlivy (6.2.1 a 6.2.2). Součástí návrhů jsou srovnání technických parametrů elektráren s CCS a bez CCS.

Vzhledem k nízké dostupnosti kvalitních zdrojů, které jsou navíc psány zpravidla převážně v anglickém jazyce, by přínosem této diplomové práce mohlo být snazší orientování se v problematice metod CCS a CCU pro budoucí generace studentů.

1 Oxid uhličitý

1.1 Obecné vlastnosti

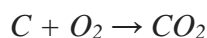
Oxid uhličitý zkratkou CO₂ je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Molekula CO₂ (viz Obr. 1) je tvořena dvěma atomy kyslíku a jedním atomem uhlíku. V plynném skupenství je těžší než vzduch a v pevném se nazývá suchý led. Z pevného skupenství sublimuje¹ již při -78,5 °C. Oxid uhličitý je často využíván jako chladivo a v potravinářství ho najdeme pod zkratkou E290.



Obr. 1: Strukturální vzorec oxidu uhličitého [53]

1.2 Historie

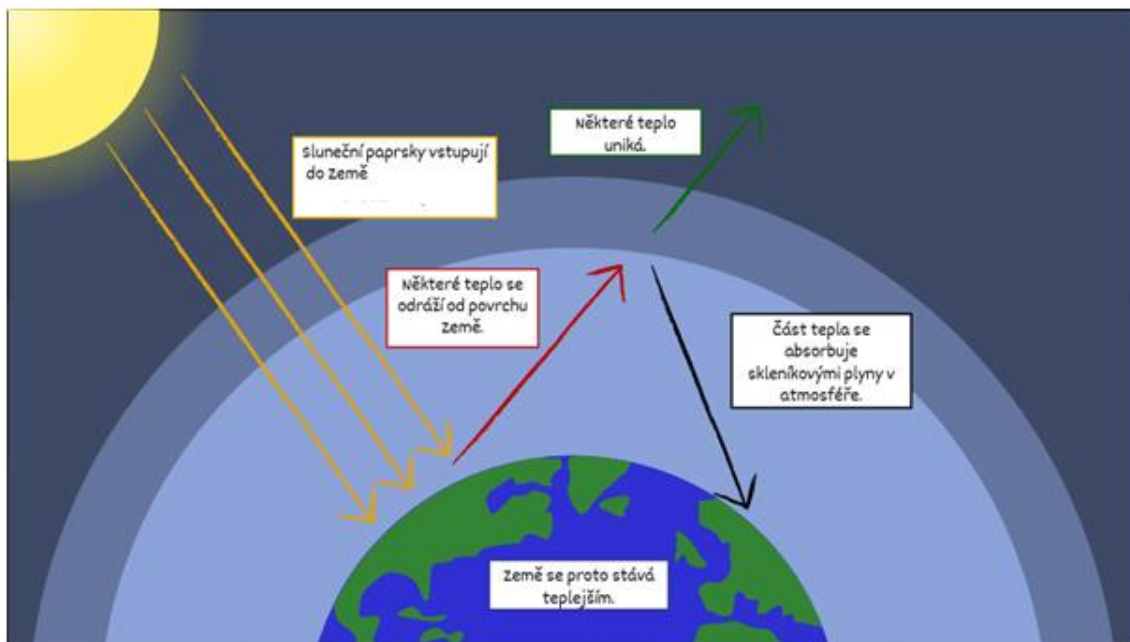
V 17. století byl oxid uhličitý objeven chemikem Janem Baptistou van Helmotem (1580–1644). Ten pozoroval proces spalování dřevěného uhlí v uzavřené nádobě a zjistil, že váha popele po spálení v uzavřené nádobě je nižší než váha uhlí před spálením. Při spalování proběhla reakce uhlíku obsaženého v palivu s kyslíkem obsaženým ve vzduchu a vznikl oxid uhličitý. Objevitel to vysvětlil jako přeměnu části uhlí na neviditelnou substanci [2]. Dnes je již známo, že za úbytkem hmotnosti stál vznik CO₂ z reakce části množství uhlíku s kyslíkem obsaženým ve vzduchu.



1.3 Skleníkový efekt

Skleníkový jev (viz Obr. 2) je proces, při kterém se slunečním zářením ohřívá planeta Země na teplotu vyšší, než na jakou teplotu by se ohřála bez atmosféry [1].

¹ Sublimace znamená přímou změnu z pevného skupenství na plynné.



Obr. 2 Skleníkový efekt [54]

Mezi skleníkové plyny patří vodní pára, oxid uhličitý, oxid dusný, metan, freony a vzácné plyny. Široká veřejnost a občas i ta odborná prezentuje názor, že nejdůležitějším skleníkovým plynem je vodní pára, jelikož má největší zastoupení v atmosféře. To je ovšem chybná interpretace. Z klimatického hlediska není vodní pára zajímavá, protože množství vodní páry je úměrné teplotě vzduchu [3].

Množství vodní páry je značně ovlivněno počasím a pohybuje se přibližně od 36 % do 85 %. Lidskou činností není přímo ovlivněno. Zároveň dle vědeckých výzkumů doba setrvání vodní páry v atmosféře je pouze v řádu dnů, ale CO_2 se na dnech oceánů rozkládá přibližně 20 až 200 let [4].

To je jeden z dalších důvodů, proč je nutno vyvíjet technologie ke zpracování oxidu uhličitého a tím přispět k udržování stávajících podmínek pro život člověka na Zemi.

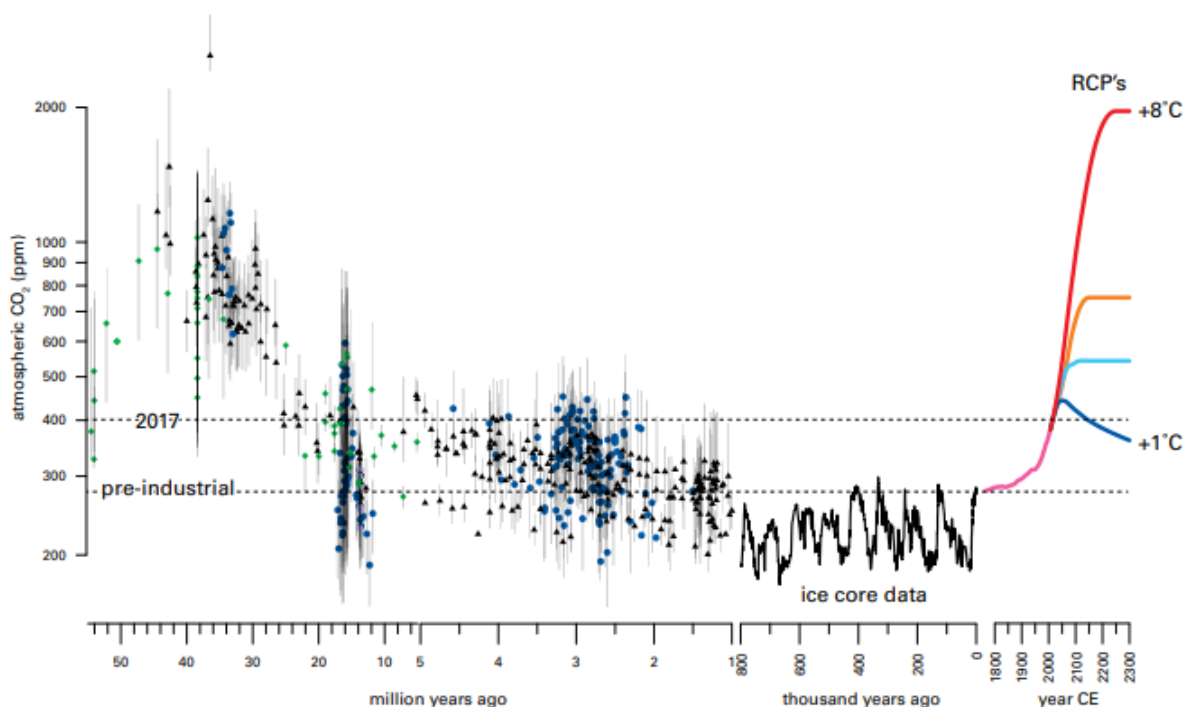
1.4 Globální oteplování v důsledku produkce CO_2

V dnešní době je opravdu těžké se zorientovat mezi kvalitními a nekvalitními informacemi. Je nutné používat zdravý rozum a promýšlet fakta.

Existuje řada vědeckých výzkumů ledovcových vrstev. Měřením množství oxidu uhličitého uvnitř jednotlivých vrstev je prokázáno, jak se lokálně v čase vyvíjela koncentrace CO_2 v atmosféře. Informace, starší než osm set tisíc let, jsou zjišťovány ze zkamenělých rostlin a fosilií.

Faktem je, že již od začátku průmyslové revoluce, množství koncentrace CO_2 v atmosféře každým rokem neustále narůstá. Jde ruku v ruce s rozvojem fabrik a průmyslových výroben, tedy zdrojů produkce CO_2 . Nárůst je možno vidět v obrázkovém grafu (viz Obr. 3, vyznačeno růžově), který uveřejnila Světová Meteorologická organizace (*World Meteorological organization*). Červeně je vyznačen pravděpodobný vývoj koncentrace v budoucnosti.

Při pečlivém zkoumání grafu je možné vidět, že množství oxidu uhličitého neustále kolísalo několik milionů let mezi hodnotami od průmyslové revoluce a současností. Hluběji v minulosti byla koncentrace CO_2 často na mnohem vyšších hodnotách.



Obr. 3: Historický vývoj koncentrace CO₂ v atmosféře [55]

Starší data jsou ovšem irelevantní, protože druh člověka homo sapiens je starý pouhých 2,8 milionu let [6]. Tato doba je dostačující pro vývoj a přizpůsobení se změnám. Vyvstává mnoho otázek na způsobilé odborníky. Kupříkladu jak by se člověk a s ním spojení další živočichové, jako třeba opylovači, přizpůsobovali vyšším a vyšším hodnotám koncentrace CO₂. Vyšší hodnoty koncentrace byly v atmosféře ještě před vývojem současného druhu člověka, jak je znám dnes. Zcela jistě by nastaly změny v rovnováze přírody, a tedy i v lidském životě.

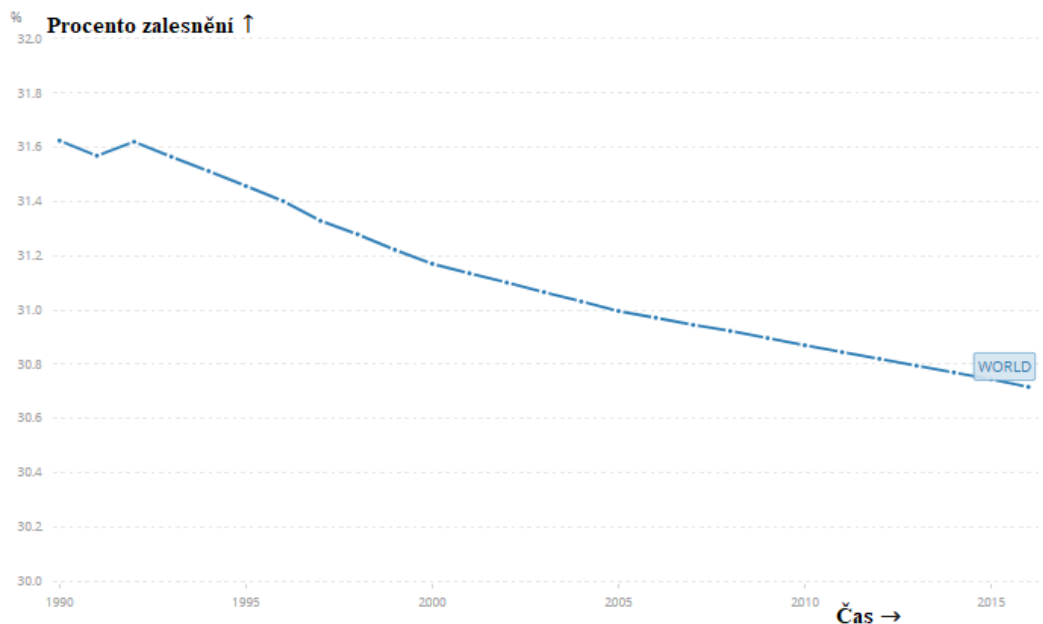
Lze konstatovat, že aktuální lidská činnost, zcela jistě ovlivňuje koloběh CO₂, a to mnohem více než ve středověku a v dobách před ním. Vzhledem k přímé spojitosti mezi začátkem průmyslové revoluce a začátkem zvyšování koncentrace CO₂ je velmi nepravděpodobné, že se jedná o náhodu. Pokud je možnost lidský podíl na přírůstku koncentrace emisí v atmosféře snížit, mělo by tak být učiněno [5].

A tím se zde opět ukazuje potenciál technologií skladování a zpracování CO₂, kterými se zabývá tato diplomová práce.

Zdá se při nejmenším podivné, že příroda nemá v tomto případě v záloze nějaký přirozený mechanismus k vyrovnání „hladin“ CO₂. Přitom jak je vidět v grafu měření ledovcových vrstev, změny koncentrace CO₂ probíhaly po miliony let. Odpověď se možná skrývá v dalších badatelských oblastech. Dle výzkumů totiž zvýšená koncentrace CO₂ prokazatelně zvyšuje rychlost růstu rostlin. Rostliny při svém růstu spotřebovávají oxid uhličitý a rychleji přibývá množství jejich celkové biomasy [32].

Z toho vyplývá fakt, že by stav zvýšené koncentrace CO₂ měl být postupně přirozeně snižován. Ovšem s nástupem průmyslové revoluce se zároveň začaly rozvíjet i sofistikovanější zařízení a stroje pro kácení stromů a zeleně. S touto teorií korelují i historická data procent zalesnění planety světové datové banky. Z grafu v Obr. 4 je jasně patrné snižující se procento světového zalesnění v čase. V přírodě panuje opravdu jemná rovnováha. Každý malý živočich

je důležitý z hlediska potravních řetězců, a to stejné platí i zde. Rostlinstvo roste rychleji a pohlcuje více oxidu uhličitého, ale dlouhodobě v důsledku lidské činnosti flóry ubývá [33].



Obr. 4 Vývoj procentuálního zalesnění planety v závislosti na čase [33]

1.5 Koloběh uhlíku v přírodě

Uhlík je označován v periodické tabulce prvků písmenem C. Zároveň je základním stavebním prvkem všech známých živých organismů. Je obsažen všude v přírodě, a to i té neživé. Uhlíkové sloučeniny jsou také základem energetiky. Namátkou lze jmenovat fosilní paliva, zemní plyn, ropu, uhlí a dřevo. Předměty obsahující uhlík jsou používány denně ve všech odvětvích průmyslu, domácnostech a mnoha dalších činnostech a procesech.

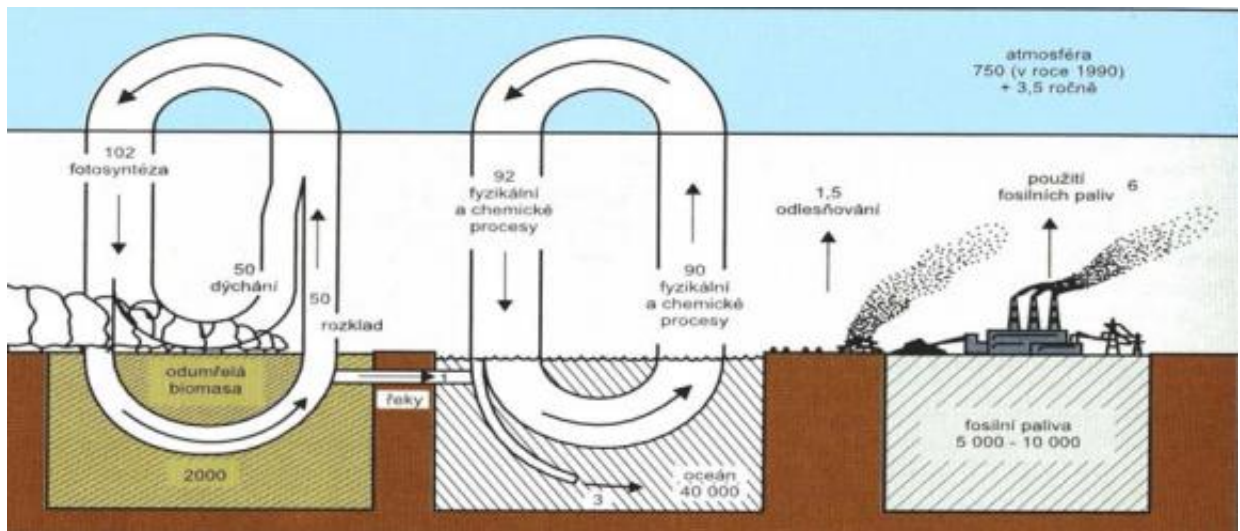
Uhlík neustále obíhá v přírodním koloběhu mezi všemi sférami Země, atmosférou, litosférou, hydrosférou a všemi živými organismy. Tento oběh se nazývá koloběh uhlíku (viz Obr. 5) [3].

Oběh funguje již od zemského vzniku. Každý živý organismus je jakousi zásobárnou uhlíku. Organismus roste ruku v ruce s příjmem uhlíku a po smrti se uhlík opět vrací zpět do přírodního oběhu. Uhlík se při svém koloběhu ukládá všude, například v horninách, půdě, geologickými procesy (ve fosilních palivech), na dnech oceánů, v atmosféře apod [3].

Jedním z nositelů uhlíku v přírodě je oxid uhličitý. Pro tuto známou sloučeninu uhlíku má významnou roli právě oceán. Oxid uhličitý se v ledových vodách rozpouští a mění na kyselinu uhličitou, která okyseluje oceán. Tím klesá pH vody, což ohrožuje zde žijící organismy. Kupříkladu lze zmínit korály. Ty poskytují ochranu mnoha druhům ryb a ryby jsou potravou větších ryb atd. V konečném výsledku může být narušen celý ekosystém. V teplých oceánských vodách se naopak uhlík uvolňuje do ovzduší. Velkou část rozpuštěného uhlíku spotřebovávají v oceánech organismy, a to především řasy. Pokud by došlo k ohřátí oceánu v nejméně chladných vodách na jistou teplotu, byla by snížena jeho schopnost pohlcovat CO₂. Oxid

uhlíčitý ne vzniká pouze průmyslovými spalovacími procesy, ale taky trávením potravy u živočichů, rozkladem rostlin nebo třeba dýcháním [3].

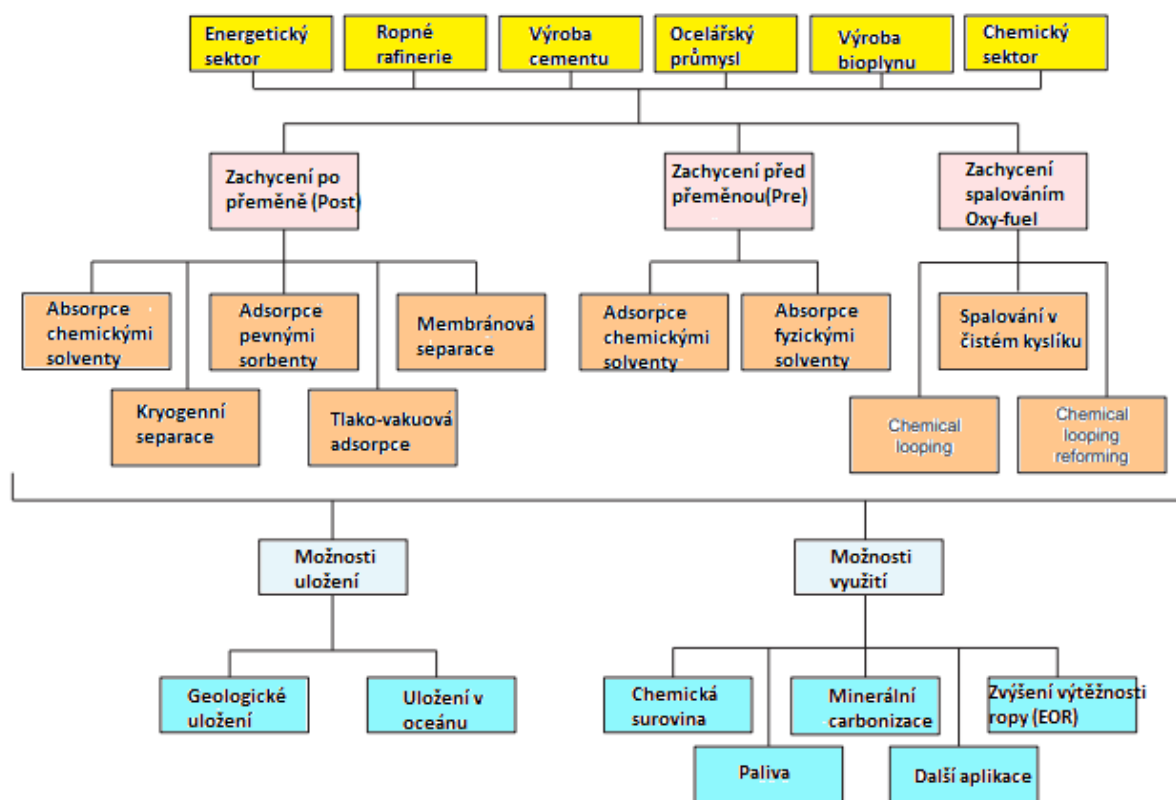
Na Zemi jsou neustále pozorovány obrovské toky uhlíku. Ty jsou ovšem přirozené, a i když se příspěvek člověka ke zvyšování koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře může zdát zdánlivě zanedbatelný, rovnováhu lze velice snadno narušit. Jak již bylo psáno v odstavci globálního oteplování (1.4), koncentrace CO₂ se začala výrazně zvyšovat současně se začátkem průmyslové revoluce [3].



Obr. 5 Koloběh uhlíku na Zemi, demonstrace procesů výměny uhlíku v gigatunách [56]

2 Technologie CCS a CCU obecně

Technologie CCS „Carbon capture and storage“ a CCU „Carbon capture and utilization“ jsou zaměřeny na využití emisí CO₂ převážně z bodových zdrojů znečištění. Mezi bodové zdroje patří elektrárny, ropné rafinerie, cementárny, výroby železa, výroby chemikálií apod. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma technologiemi je, že při procesu CCS se CO₂ přepravuje do prostor dlouhodobého uložení. Při procesu CCU se CO₂ dále využívá ke komerčním účelům. Je tedy zřejmé, že technologie CCU je mnohem atraktivnější pro investory než technologie CCS. Přesto jsou ve většině fází stejné, a proto jde jejich vývoj současně vpřed [8].



Obr. 6 Rozdělení možností technologií CCU a CCS; nachází se zde nejčastější zdroje oxidu uhličitého, následně možnosti zachycení a jejich jednotlivé technologie a rozdělení končí možnostmi uložení a využití [8]

2.1 Možnosti separace oxidu uhličitého

Více než 40 % světové produkce emisí CO₂ pochází z elektráren využívajících fosilní paliva [7]. Logicky jsou tedy nejzřetlivějšími kandidáty pro zavedení technologií CCS nebo CCU. Překladem slova „capture“, které se nachází u obou technologií, je zachycení. Přesnější v tomto případě bude termín separace nebo oddělení. Separace je prvním procesem v pomyslném řetězci celé technologie, je totiž nutné nějakým způsobem oxid uhličitý ze spalin získat.

Naneštěstí v elektrárnách, zpracovatelských a výrobních firmách produkujících oxid uhličitý existuje široké spektrum technologií a procesů produkujících CO₂. Proto nelze využívat

nějakou univerzální technologii zachycení oxidu uhličitého, ale bylo nutné vytvořit více systémů [8].

Tyto systémy oddělení CO₂ mohou být rozděleny do třech následujících kategorií (následující kapitoly 2.1.1, 2.1.2 a 2.1.3).

2.1.1 Spalování paliva se vzduchem a separace CO₂ ze spalin

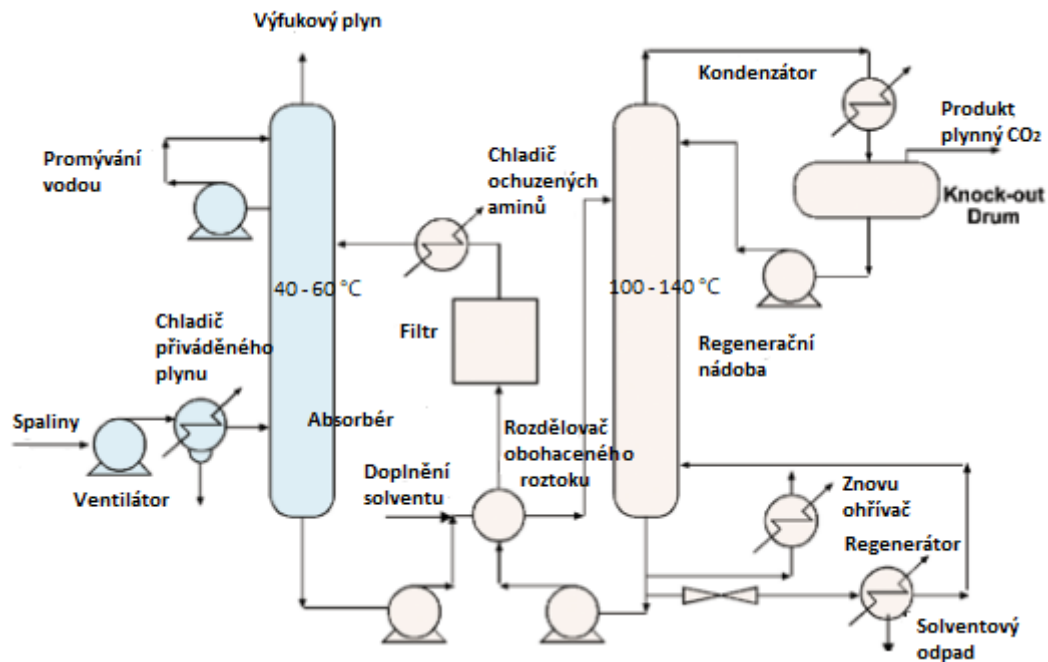
V anglické literatuře lze tento druh separace najít pod termínem „post conversion“ nebo „post-combustion capture“, přičemž druhé označení se používá u technologií separace v elektrárnách. Tento způsob separace CO₂ z proudu spalin po spálení paliva (například fosilního paliva) může být využit v elektrárnách, při produkci oxidu etylenu, u výroby cementu, výrobě paliv, výrobě oceli, při sladění bioplynu atd.

Nevýhodou tohoto způsobu separace je, že zařízení má velké rozměry a musí zpracovávat velké množství spalin. Zároveň se sníží tepelná účinnost celého oběhu a z toho vyplývá, že je potřeba spalovat větší množství paliva k dosažení stejného výstupu energie. Důraz na účinnost je při využívání této technologie na místě, protože se spálením většího množství paliva bude značně přibývat emisí CO₂ a celý systém by neplnil svůj účel. Se zvětšující se velikostí systému elektrárny se značně zvyšují náklady na její výstavbu, a tudíž i na výrobu elektřiny. Navíc se zvýší spotřeba elektřiny, spotřeba páry, spotřeba vody a množství hůře čistitelné odpadní vody. V konečném výsledku by se enormně zvýšila cena energie vyrobené touto elektrárnou. Například u uhelných elektráren by se cena na výrobu energie zvedla o 80 % a u zemního plynu o 50 % [8][9][45].

Procesů separace oxidu uhličitého je celá řada a někdy se využívají kombinace těchto technologií:

- Absorpcí solventem
- Adsorpcí pevnými sorbenty
- Membránovou separací
- Kryogenní separací
- Tlako-vakuovou adsorpcí

Průmyslové zdroje využívající spalování uhlí jsou založeny na ultra superkritickém parním cyklu s teplotou spalin 600 °C o tlaku 29 MPa [35]. Nejčastěji se pro separaci používá **absorpce** látkou etanolaminem (viz Obr. 7). Po ochlazení jsou spaliny přivedeny do absorberu. Zde je pokles tlaku a toto tlakové snížení kompenzuje ventilátor pro snadný průchod spalin zařízením. V absorberu se standardně pohybuje teplota okolo 40 až 60 °C a oxid uhličitý je vázán na rozpouštědlo. Chemická látka obohacená o CO₂ je následně přivedena do regenerační nádoby. V tomto zařízení za působení lehce vyššího atmosférického tlaku a teplot 100 až 140 °C přivedených výměníkem tepla se přeruší chemická vazba mezi CO₂ a rozpouštědlem a dochází k jejich oddělení. Problémem je, že se zahřívá i rozpouštědlo, a tím se zvyšující spotřebou energie roste i cena. Procesem se získává ze spalin přibližně 80 až 95 % CO₂. Dosažení vyššího procenta účinnosti je úzce spjato s delším setrváním spalin v absorpčním procesu. Tím opět vzroste spotřeba tepla a cena. Tato metoda není nejlepší volbou pro všechny odvětví průmyslu, protože má vysokou spotřebu tepla. Například při výrobě cementu není metoda tak účinná jako u tepelných elektráren, protože v tepelné elektrárně se využívá rekuperace tepla a je zde tedy značně ekonomičtější [17].



Obr. 7 Zjednodušené schéma procesu pro regeneraci CO₂ ze spalin chemickou absorpcí [17]

Dříve byly ztráty technologie chemické absorpce opravdu značné. Například pro elektrárny využívající jako palivo zemní plyn byly ztráty 15 % až 30 % a pro uhelné elektrárny dokonce 30 % až 60 %. Použitím nových technologií pro zlepšení absorpce, jako jsou membrány, které usnadňují kontakt mezi rozpouštědly a spaliny, se snížily ztráty na $\pm 10\%$ u elektráren využívajících zemní plyn a na $\pm 20\%$ u uhelných elektráren [8][9].

2.1.2 Spalování paliva s čistým kyslíkem a separace CO₂ ze spalin

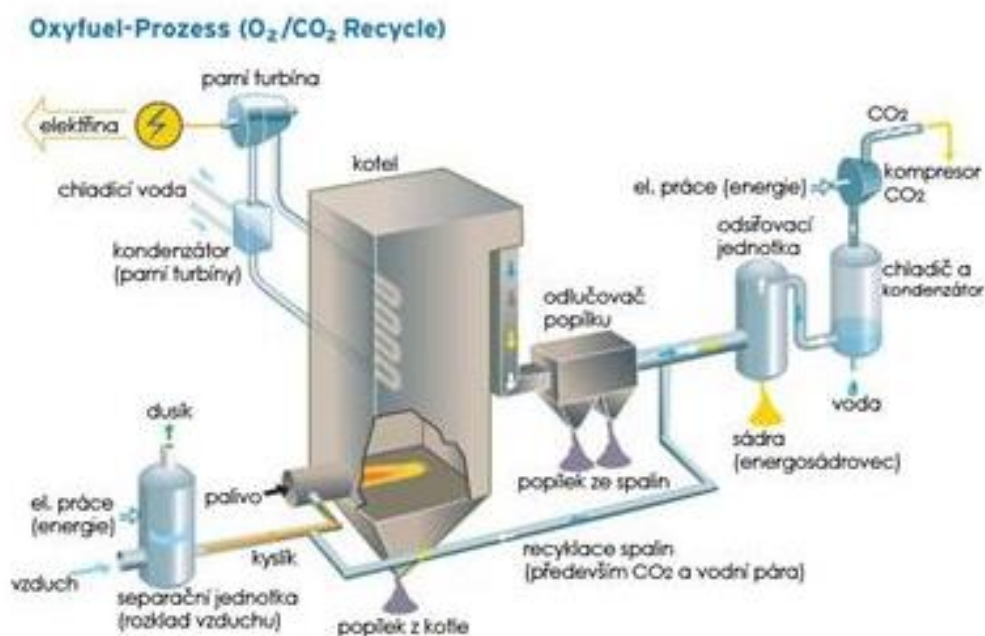
V anglické literatuře lze tento způsob separace najít pod termínem „oxy-combustion“. **Spalování s čistým kyslíkem** je další možností těchto absorpčních technologií. Zařízení využívající práškového uhlí pracuje ve stejných parních podmínkách jako zařízení v předchozí kapitole (2.1.1). Studie dříve hledaly optimální čistotu kyslíku s ohledem na jeho výrobní cenu. Technologie využívá kryogenní jednotky (viz Obr. 8). Po odstranění prachových částic a ochlazení jsou spaliny stlačeny na tlak 3 MPa a směřují do kryogenní separační jednotky. V této jednotce jsou odstraněny zbývající nečistoty jako Ar, O₂ a N₂ a zvýší se koncentrace CO₂ z 75,7 mol% na 95,8 mol% (sušiny) [35].

Při procesu je na místo vzduchu, který obsahuje přibližně 78 % dusíku, přiváděn téměř čistý kyslík a spaliny mají značně vyšší koncentraci CO₂. Tím se snižují náklady pro zachycování oxidu uhličitého, protože není potřeba zpracovávat takový objem spalin. Spaliny jsou tvořeny převážně jen z vody a oxidu uhličitého. Jako bonus jsou sníženy emise NO_x a není tedy potřeba další energie na jejich odstraňování. V budoucnu se navíc nabízí možnost skladování dalších emisí jako SO₂ a NO_x společně s CO₂ a mohly by se tak vytvořit elektrárny s nulovými emisemi.

Velkou nevýhodou je, že samotná výroba kyslíku v separační jednotce je velmi nákladná a celkově je tato technologie mnohem dražší než jiné metody.

Alternativou pro výrobu kyslíku je například **chemické spalování**. Tento proces využívá oxid kovu k přenosu kyslíku ze vzduchového reaktoru do místa pro spalování paliva.

Výhodou je nižší spotřeba páry, lepší odolnost technologie vůči síře, vyšší účinnost přeměny paliva a snadnější přizpůsobení se technologii zředěným tokům CO₂ [8][9][17].



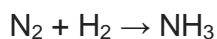
Obr. 8 Demonstrativní obrázek zapojení separační jednotky pro rozklad vzduchu s dalšími zařízeními v systému spalování paliva s čistým kyslíkem pro zachycení CO₂ [57]

2.1.3 Zachycení před spalováním

V anglické literatuře lze tento druh separace najít pod termínem „pre-conversion“ nebo „pre-combustion capture“, kdy druhý termín v pořadí se používá, pokud je zmiňován v souvislosti s elektrárnou [10].

U zachycení před spalováním se dostává palivo do kontaktu s kyslíkem, vzduchem nebo párou. Vznikne syntézní plyn obsahující oxid uhelnatý a vodík. Oxid uhelnatý je následně přiveden do katalytického reaktoru, kde je uveden do kontaktu s párou. Pára dodá oxidu uhelnatému potřebný kyslík a výsledkem je vznik CO₂ a dalšího vodíku. Chemickou nebo fyzikální absorpcí je následně CO₂ oddělen a může být dále využit. Další výsledkem je také palivo obsahující značné množství vodíku, které má bohaté uplatnění v nejrůznějších odvětvích průmyslu [17].

Tento typ technologie je zaměřen na zachycování nežádoucích produktů intermediárních reakcí z přeměňovacího procesu. Například může být použit při výrobě amoniaku a zplyňování uhlí. Při výrobě amoniaku vzniká CO₂ za přístupu páry společně s vodíkem. Oxid uhličitý musí být z procesu odstraněn ještě před syntézou samotného amoniaku. Pro účely odstranění se většinou využívá absorpce etanolaminem (C₂H₇NO). Často se lze setkat s jeho označením ETA nebo MEA [10].

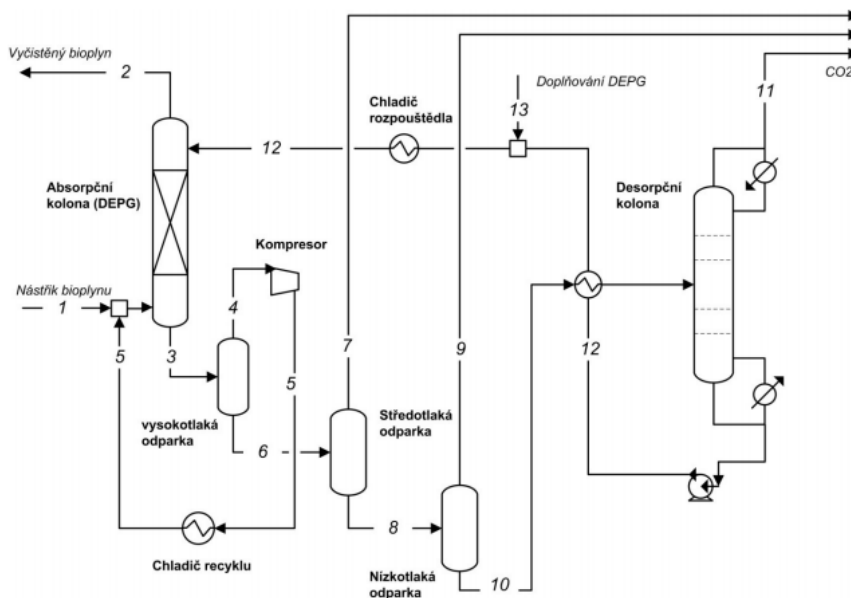


Haber-Bosohova syntéza

Podobně tomu je také u procesu zplyňování, kde musí být opět oddělen oxid uhličitý od vodíku. K tomuto účelu separace jsou používána fyzická rozpouštědla. V praxi se využívají procesy odstranění CO₂ selexol a rectisol. [8]

Selexol (viz Obr. 9) je komerční označení technologie pro odstraňování oxidu uhličitého a také sirovodíku. Reakce probíhá absorpcí látek rozpouštědlem dimetyleter polyetylen glykolem (DEPG).

- Výhody: Růst teploty absorbéru je malý, levný provoz, vzniklý plyn dosušen reakcí s vodou
- Nevýhody: při vyšším tlaku stoupne účinnost, vysoká tepelná kapacita



Obr. 9 Zjednodušené schéma procesu selexol [13],[12]

Rectisol využívá organických absorbentů, například metanolu, protože metanol dobře rozpouští oxid uhličitý. Tento absorpční proces pracuje při teplotách dosahujících -75°C.

- Výhody: chemická a tepelná stabilita, nekorozivní, rozpouštědlo generuje při nižším tlaku, nízká teplota.
- Nevýhody: toxicita, absorbuje rtuť, potřeba velkého zchlazení rozpouštědla, cena. [11][13]

2.2 Typy technologií separace CO₂

2.2.1 Membránové separační procesy (MSP)

Membránové technologie se již na přelomu tisíciletí stávaly finančně rovnocennými substituenty klasických separačních technologií. Kvůli své schopnosti dělit jednotlivé molekuly otevřely zcela nové obzory. Hlavní výhodou je vysoká separační účinnost a permeát s vysokou čistotou. Membrány jsou nenáročné na obsluhu a není u této technologie vyžadována změna fáze média. Výhody jsou pro odborníky dostatečným ekvivalentem nevýhod. Nevýhodou jsou zcela jistě vyšší pořizovací a provozní náklady a nižší průtok permeátu. Je vyžadován vysoký pracovní tlak pro zajištění správného fungování, toho se docílí za pomoci čerpací techniky. To je u **tlakově hnaných membrán**. Jiné energetické vstupy zde nejsou potřeba.

Separčních technik u tlakově hnaných membrán existuje celá řada. Například lze uvést proces mikrofiltrace (MF), ultrafiltrace (UF), reverzní osmózy (RO), nanofiltrace (NF). Procesy mají různé velikosti otvorů v membráně a velikost zachycených látek. Membrány mohou být polymerní, keramické, symetrické, asymetrické, kompozitní a podobně [27].

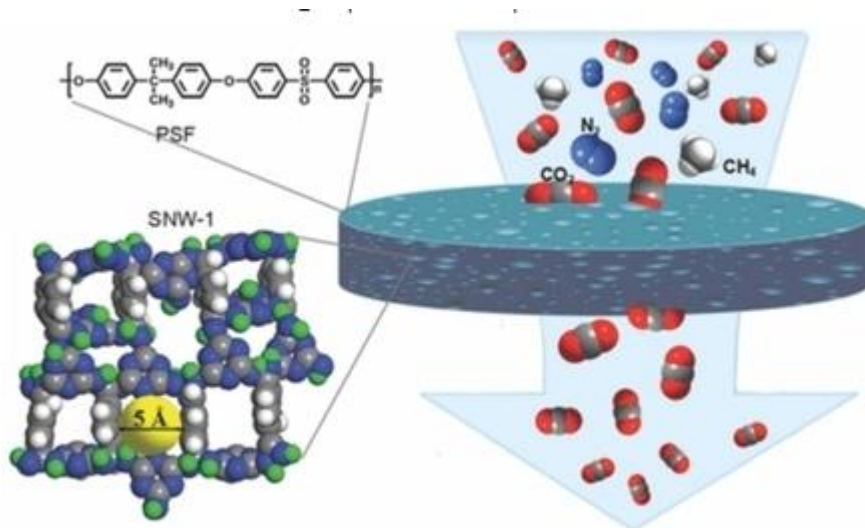
Tabulka 1 Shrnutí tlakově hnaných membrán [27]

Proces	Velikost otvorů v membráně [nm]	Nejmenší zachycované látky
MF	50–1000 nm	zákal, mikroorganismy, koloidní částice
UF	3–50 nm	makromolekuly, organické látky
NF	1–3 nm	vícemocné soli
RO	pod 1 nm	jednomocné soli

Kromě tlakových membrán se vyskytují také **elektromembránové procesy** využívající gradientu elektrického potenciálu nebo separace na **bázi porézních a neporézních membrán**. Existují i **membránové bioreaktory**.

Příkladem je využití **porézních organických membrán**, které mají vysokou absorpci a selektivitu CO₂. Tyto membrány jsou snadno slučovány s nanočásticemi, které mají požadované aminoskupiny a PSF matrix (viz Obr. 10). Mají vysoký separační faktor a zvýšenou propustnost, fungují jako taková molekulární síta. Tato technologie se jeví do budoucna velice slibně, bohužel podle autora vědeckého článku [8] z roku 2014, zatím nebylo hlášeno žádné praktické využití této konkrétní technologie. Avšak v poslední době přitahuje technologie molekulárních sítí stále větší vědeckou pozornost.

Organické molekulární sítě mohou být složeny z různých organických skupin spojených kovalentními vazbami, což vede k možnostem značné různorodosti struktur s póry o velikosti od 0,3 nm do 50 nm. Navíc mají skvělou tepelnou stabilitu, nízkou hustotu struktur a výbornou technologickou spolehlivost při oddělování jednotlivých plynů. Také mohou regenerovat vodík, čistit vzduch, zemní plyn atd. Možnosti jsou opravdu rozsáhlé. Zjednodušeně lze říct, že nastavením velikostí těchto membrán je možno separovat plyny dle technologických požadavků [8][14].



Obr. 10 Porézní organická membrána s ukázkou struktury a značky PSF matrixu [14]

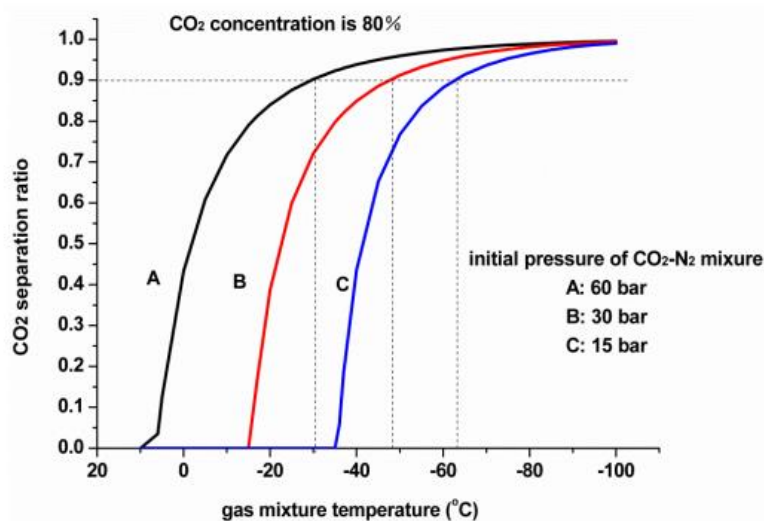
U komerčně dostupných polymerických membrán se pohybují energetické nároky technologie na 70 kWh až 75 kWh. Standartně odlučují přibližně 82 % až 88 % CO₂ ze spalín [40].

2.2.2 Kryogenní separace

Kryogenní technologie (Obr. 12) nejsou žádnou novinkou na trhu. Začátky jejich využívání se datují přibližně k roku 1930, kde se tato technologie začala využívat k separacím vzduchu. Později našla své uplatnění v systémech podpory života na vesmírných stanicích a v ponorkách [29].

Kryogenní separace je fyzikální proces. Při tomto procesu se využívá extrémně nízkých teplot k oddělení oxidu uhličitého od dalších plynů obsažených třeba ve spalínách (Obr. 11). Tento proces umožňuje přímou výrobu CO₂ za přispění nízkého tlaku. Oxid uhličitý následně může být oddělen a uskladněn. Často se může jednat o značnou úsporu energie za kompresi, protože některá uskladnění vyžadují kapalnou formu oxidu uhličitého a nemusí být tedy tlak plynného CO₂ napřed zvýšen a potom snižován. Během separace je využívána technologická řada změn tlaku, teploty a dalších separačních kroků. Výhodou je, že při separaci není použito žádné chemické činidlo a tím zde nevznikají další sekundární znečištění [26].

V průmyslu se spaliny kromě CO₂ často skládají z plynů, které snižují teplotu fázového bodu přechodu na kapalinu. Namátkou lze zmínit například H₂, O₂, N₂, CH₄, Ar atd. Může se jednat i o teplotu pod -80 °C, což značně navyšuje energetické nároky technologie a v takovém případě je nutné zvážit využití jiných metod. Zároveň může vznikat na zařízení námraza a spolu s tím i případné bezpečnostní riziko [26].

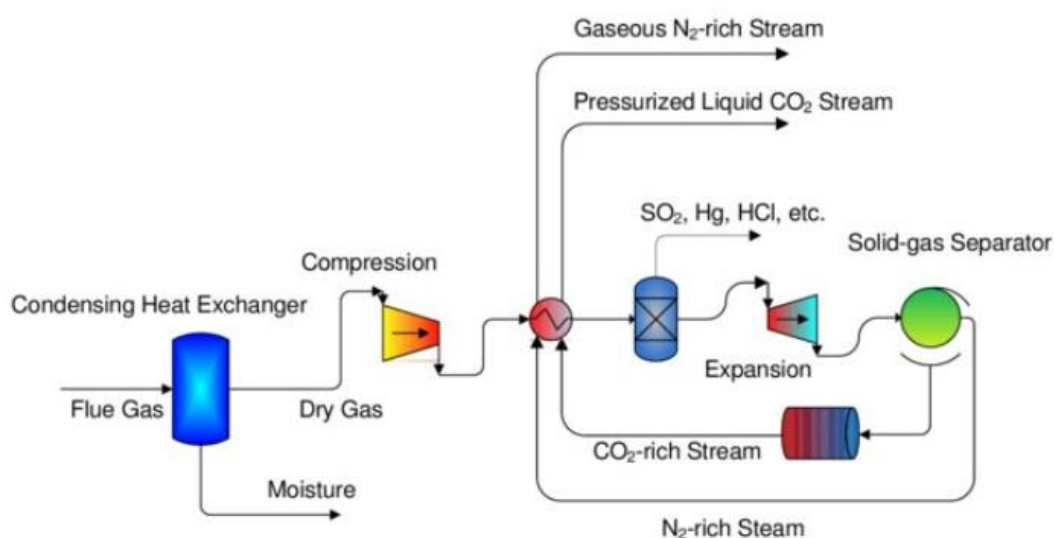


Obr. 11 Vývoj poměru separace CO₂ mezi CO₂ a N₂ při působení tlaků 15 bar, 30 bar, 60 bar a změnou teploty [26]

Z Obr. 11 je patrné, že při vyšším tlaku stačí zchladit směs CO₂ a N₂ méně pro dosažení stejného poměru separace.

Neustále jsou vyvíjeny další impozantní kryogenní technologie. Jednou z nich je kupříkladu technologie, jejíž základ tvoří kompresor a jednotka vytvářející blesky. Tato technologie značně snižuje energetickou náročnost. Zajímavostí je, že kryogenní technologie se převážně zaměřují na nízkou spotřebu energie a vysoké procento zachycení. Relativně malá pozornost je přitom věnována čistotě oxidu uhličitého. Při oddělení oxidu uhličitého od směsi CO₂-N₂-O₂-Ar nečistoty tvoří 2 až 5 %. To jsou často vyšší hodnoty, než technologie v průmyslu dovolují [26].

Množství obnoveného CO₂ ze spalin se u této technologie uvádí v rozmezí přibližně 90 % až 95 %. Energetické nároky technologie se pohybují v rozsahu 600 kWh až 660 kWh na tunu získaného CO₂ [40].



Obr. 12 Zjednodušené schéma kryogenní technologie [48]

2.2.3 Absorpční separační procesy

U těchto procesů jde především o navázání CO₂ dovnitř kapalného solventu. Samozřejmě musí být plyn v kapalině rozpustný. Rozpustnost se mění v závislosti na teplotě a tlaku. Procesy absorpce byly již popsány v kapitole 2.1.1

Chemická absorpce je nejhojněji se vyskytující separační metodou CO₂ v elektrárnách. Při procesech se používá rozpouštědlo, se kterým reagují spaliny. Zmínit lze například rozpouštědla monoethanolamin, diethanolamin, uhličitán draselný apod. Při procesu lze dosáhnout 95 % až 98 % zisku CO₂ obsaženého ve spalinách, a to využitím aminů. Procesy mají značné energetické nároky, a to 330 až 340 kWh na tunu CO₂. Jedná se o energetické požadavky na teplo a regeneraci rozpouštědel [40].

2.2.4 Adsorpční separační procesy

Při ději adsorpce se plynné nebo kapalně molekuly vážou na povrch pevné látky. Rozlišujeme dva druhy adsorpce, a to buď chemickou nebo fyzikální. Při **chemické adsorpci** vzniká mezi látkami adsorbentu a navazovanou látkou chemická vazba. Ta je silnější než u **fyzikální adsorpce**, která funguje na principu van der Waalsových přitažlivých sil. Při elektrárněnských procesech oddělení CO₂ od spalin jsou jako adsorbenty využívány porézní látky s velkými plochami na jejich povrchu. Je možno uvést kupříkladu aktivní uhlí, molekulová síta zeolitů, alumina, silika gel apod. Stejně jako u absorpce je tady rovnováha mezi větším množstvím navázaného plynu na pevný sorbent a potřebnou energií.

Následně po adsorpci oxidu uhličitého může být adsorpční lože regenerováno. Využívá se k tomu několik metod. Jednou z nich je **adsorpční metoda se snížením vnějšího tlaku** pračky, dokud nejsou uvolněny plyny z adsorpčního lože. V anglické literatuře lze metodu najít pod zkratkou PSA. Dále existuje **metoda s kolísáním teploty**, kde se prostor zahřívá až do času, kdy jsou plyny vytlačeny z adsorpčního lože. V anglické literatuře může být nalezeno pod zkratkou TSA. Bohužel tato metoda je značně časově náročná. Doba celé operace může trvat celé hodiny, zatímco při PSA je v řádech sekund. Metod je celá řada a nejsou zde uvedeny všechny. Za zmínku jistě stojí metoda, kde je využíváno vodivé lože s aktivním uhlíkem. To váže CO₂ a posléze je přiveden proud, který zapříčiní regeneraci lože bez nákladných změn teploty a tlaku [9][28].

U elektráren využívajících adsorbční technologii se snížením tlaku (PSA) je ze spalin získáno přibližně 85 % až 90 % CO₂. Energetické nároky se zde pohybují v rozmezí 160 kWh až 180 kWh na tunu CO₂ [40].

2.3 Transport oxidu uhličitého

Transport je proces, který následuje po separaci oxidu uhličitého. Z hlediska ekonomické rentability se používají pouze dvě metody dopravy CO₂, a to potrubní a lodní doprava. Je ovšem nutné vzít v potaz emise oxidu uhličitého dopravní lodí samotné, případně emise vypuštěné vozidly a loděmi při výstavbě potrubní sítě. Náklady na provoz sítě jsou značně nižší v porovnání s náklady na samotnou výstavbu potrubní sítě. Potřebné finance na vybudování potrubní infrastruktury lze vypočítat dle následujícího vzorce, kde I značí celkové investiční náklady, d značí průměr trubek a L jejich délku.

$$I = (190 + 955 \cdot d^{0,9}) \cdot L$$

Důležité je mít na paměti, že cena lidské práce, stavbařské techniky, procento inflace a celá řada dalších faktorů se neustále mění. Je tedy nutné brát tento vzorec s rezervou.

Náklady na přepravu lze značně snížit stlačením oxidu uhličitého do jeho tekuté formy. Výhodou také je, že některé možnosti skladování stejně vyžadují vstřikování již stlačeného CO₂ do místa uložení [9][16].

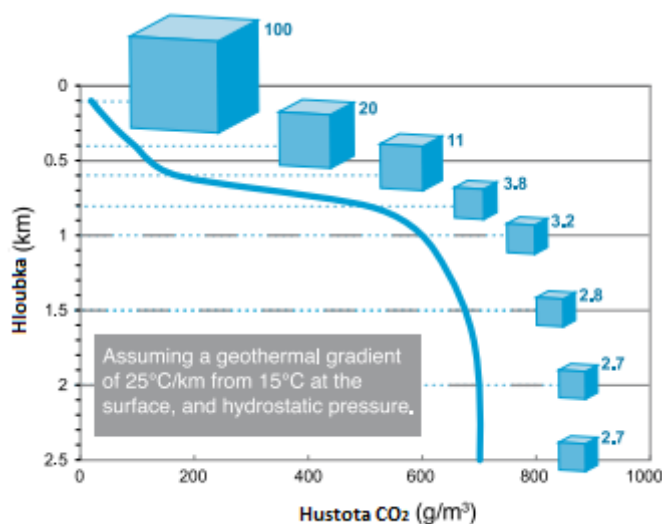
Při využití dopravy potrubní technikou je standardní stlačení plynu na 8 MPa s cílem zvýšení hustoty a vyhnutí se dvoufázovému režimu průtoku. Tento tlak je všeobecně považován za dostatečný a není třeba dalšího stlačování.

V případě lodní, vlakové nebo automobilové přepravy se přeměňuje plynný stav na tekutý za působení nízkého tlaku a teploty značně nižší, než je teplota okolí. U tankerů se například jedná o přepravní teploty v rozsahu -55 °C až 50 °C při tlaku přibližně 0,6 až 0,7 MPa [17].

Na větší vzdálenosti mezi 500 a 1000 km je doprava tankerem považována za více atraktivní. Navíc je flexibilnější a nejsou potřeba velké investice na výstavbu potrubních sítí, které by sloužily některým zdrojům a uložistům na relativně krátké časové horizonty (například do naplnění menšího uložistě, vyčerpání zdroje). Kamionový transport jedné megatuny CO₂, kterou vyprodukuje elektrárna o výkonu 300 MW_e spalující zemní plyn za rok, by vyžadovala přibližně 40000 jízd. Zároveň s uvažováním produkce CO₂ kamionovou dopravou je tento druh dopravy značně nevýhodný [38].

3 Technologie CCS

V momentě, kdy je oxid uhličitý zachycen, odseparován, vyčištěn, stlačen a přepraven, musí být také uložen, pokud nemá další využití technologiemi CCU. Existuje celá řada vhodných míst, kam by potenciálně mohl být plyn uložen. Namátkou lze jmenovat místa vyčerpaných ropných vrtů a zemního plynu, dna oceánů, jinak nevyužitelné jeskyně s přítomností podzemních vod a minerálů, hlubinné doly po vytěženém uhlí atd. Nejvhodnější podzemní uložení jsou v hloubce přibližně 800 až 1000 metrů. Zde je totiž hustota oxidu uhličitého podobná jako při kapalném stavu a cena na vytvoření vrtů je nižší než u vrtů do větších hloubek. Nicméně je nutné zmínit, že z ekologického hlediska jsou místa uložení nejistá. Co se týče nákladů na ukládání oxidu uhličitého, tak cena často souvisí s náklady na dopravu, tedy je možno hovořit o kombinované ceně za dopravu a uložení, která ovšem značně kolísá vzhledem k vzdálenosti lokací zdrojů CO₂ a vhodných míst k uložení. Avšak tyto kombinované náklady na transport a uložení jsou v porovnání s náklady na separaci oxidu uhličitého poměrně nízké [8], [9].



Obr. 13 Závislost hloubky uložení v kilometrech na hustotě CO₂ [17]

Na obrázku (viz Obr. 13) lze pozorovat vztah mezi hloubkou uložení a hustotou oxidu uhličitého. Můžeme vidět, že od jisté hloubky zůstává hustota přibližně konstantní. Zvyšující se hustota společně s hloubkou uložení má pozitivní výsledek v podobě úspory skladovací kapacity uložště.

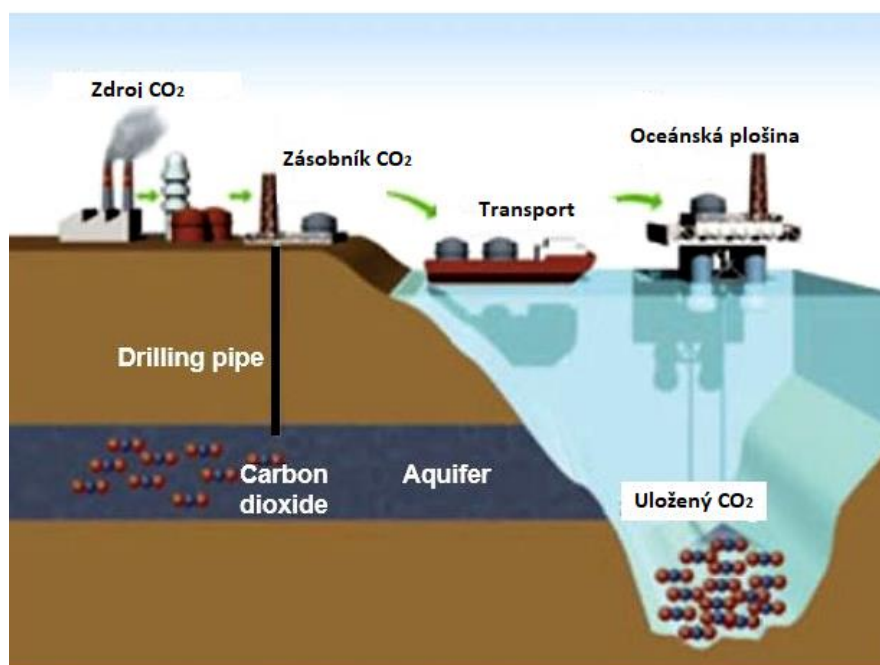
3.1 Uložení oxidu uhličitého v oceánu

Na mořském dně nebylo ukládání oxidu uhličitého nikdy ve větším měřítku testováno, a to i přes rozsáhlé studie trvající v rámci desítek let. Nespornou výhodou podvodního světa by byly obrovské skladovací kapacity. Uložení (viz Obr. 14) probíhá na dně v hloubce více než 3000 metrů, kde je hustota CO₂ vyšší než hustota vody. Zároveň by se při vhodných fyzikálních podmínkách mohl CO₂ rozpouštět, což ovšem vede k okyselení oceánu (změnu pH vody). Na některých místech na světě není příliš mnoho vhodných lokací, kde by mohl být oxid

uhlíčitý ukládán, kvůli případným problémům s transportem. Například lze zmínit Japonsko. Mnoho ekologických aktivistů se proto proti této možnosti uložení ostře vyhrazuje [8][9].

Vyvstává otázka, jak by mořští živočichové reagovali na vytvoření takových obrovských nepřirozených bariér ve svém přirozeném prostředí. Jsou vůbec schopni je rozpoznat a vyhnout se nebezpečí?

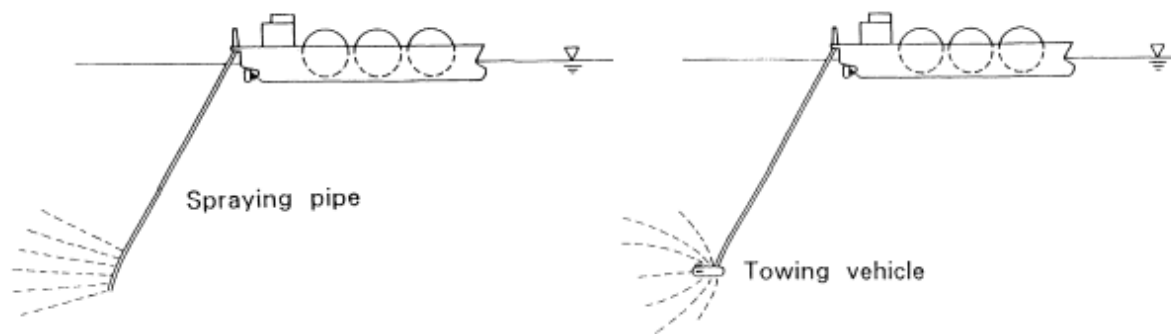
Dle vědeckých výzkumů zabývajících se právě působením CO_2 na faunu a floru v jezerech a mořích by vliv byl značný. Výzkumy uvádí, že tvorové žijící v hlubinách jako jsou hlavonožci a ryby mají závažný problém s dodávkou kyslíku do těla při zvýšených koncentracích CO_2 . Je nutné poznamenat, že je zde zmiňována pouze zvýšená koncentrace, nikoliv jezero obsahující čistý oxid uhličitý. Zároveň zvýšená koncentrace může zvyšovat úmrtnost, pozměnit rychlost růstu a schopnost uniknout predátorům u některých druhů žijících v dané lokaci. Některé enzymy a ionty jsou aktivní pouze v jistém pH rozsahu a jak zde již bylo uvedeno, CO_2 má na pH značný vliv. To tedy znamená, že přímo nebo nepřímo má zvýšený obsah CO_2 v moři neblahý vliv na celý místní ekosystém [15].



Obr. 14 Ukázka hlavních bodů při uložení CO_2 na dně oceánu [58]

Druhou možností je rozptýlit lodí CO_2 do středních hloubek (viz Obr. 15), kde se promísí s velkým množstvím mořské vody. Představa, že se plaví loď pouze za účelem rozptýlu oxidu uhličitého po moři, zatímco ona sama je silným zdrojem emisí je lehce komická. Řešení by se mohlo nacházet ve využití elektroloží. V konečném výsledku se při rozptylování vrátí oxid uhličitý zpět do atmosféry mnohem rychleji než při uložení CO_2 na dně oceánu. Metoda rozptýlení je ovšem patrně šetrnější k životnímu prostředí než metoda uložení na dně v oceánu. Zdrojová studie [16] technického charakteru tvrdí, že tato metoda je naprosto šetrná k životnímu prostředí. To ovšem vyvrací předchozí studie ekosystémů v moři, která může být označena, dle obsahu výzkumu, jako kvalitnější zdroj. Studie [15] pojednává o neblahém vlivu zvýšené koncentrace CO_2 na faunu a floru ve vodě.

Tato technologie by mohla mít potenciál, například pokud by byla zavedena doprava CO_2 z bodových zdrojů do přístavů, kde by se do části trupu přepravních elektroloží nebo lodí přečerpával oxid uhličitý a při účelné plavbě přepravy by ho vypustila. Samozřejmě by tento systém musel být na lodě implementován [16].



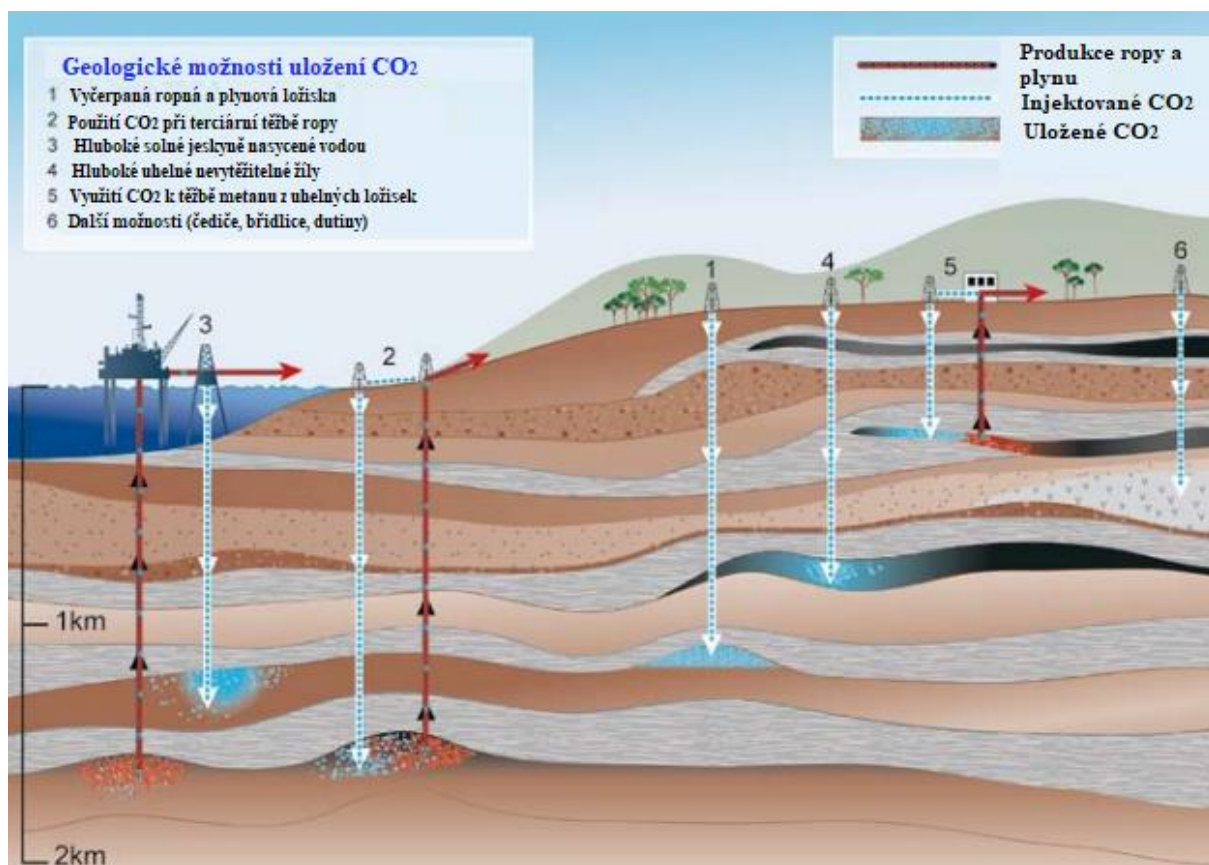
Obr. 15 Jednoduchý náčrt lodí k rozptylování CO₂ v moři [16]

3.2 Uložení oxidu uhličitého v geologických strukturách

Uskladnění oxidu uhličitého do geologických struktur (viz Obr. 16) je s vysokou pravděpodobností neslibnějším typem ukládání CO₂. Jedná se o uložení oxidu uhličitého několika mechanismy. Jsou to například uložení pod nepropustnou zemskou vrstvou, absorpcí na organickou složku břidlic a uhlí, mineralizací s okolními prvky nebo rozpuštěním vodou obsaženou v podzemních prostorech. Průmysl má bohaté zkušenosti s geologií a chováním vyčerpaných podzemních uložišť. Tyto zkušenosti byly získány studiem a výzkumy při těžbě ropy, zemního plynu a fosilních paliv, při tvorbě vrtů apod.

Do budoucna bude ještě zapotřebí provést další studie, protože jsou zde stále zcela odůvodněné obavy, které by měly být brány v potaz. Nemělo by docházet ke kontaminaci podzemních vod a únikům nebezpečných látek (např. uhelné žíly). Uložení plynu v podzemí by probíhalo pod relativně vysokým tlakem a je zde obava z úniku plynů podél geologických zlomů. Uskladnění oxidu uhličitého je potřeba plánovat na dobu kolem tisíce let i více. Tato doba je poměrně dlouhá a práce pohybů zemského podloží by mohla hrát negativní roli. Nicméně studie uvádí, že tato rizika jsou velmi nízká, že jsou schopny garantovat výskyt 99 % CO₂ nacházejícího se v ložisku po uplynutí tisíce let. Každopádně tato tvrzení zatím nebyla experimentálně dokázána, takže do té doby jsou stále jen teorií [8][9][17].

Za zmínku stojí také fakt, že tyto průzkumy byly prováděny společnostmi zabývajícími se těžbou fosilních paliv. Tyto společnosti by mohly profitovat na této technologii v podobě státních dotací na ekologické technologie a také vtlačováním CO₂ do vrtů a s tím spojeným ziskem jinak nedostupných zdrojů paliv, což by mohlo vést k manipulaci objektivitě výzkumů. Možná je tedy čas, diverzifikovat státní příspěvky i do vývoje a zavedení alternativ fosilních paliv.



Obr. 16 Možnosti geologického uložení CO₂ s měřítkem přibližných hloubek jednotlivých typů uložení [17]

Při ukládání je také důležité přemýšlet nad samotnými mechanismy uložení. Ve většině geologických struktur je prvním procesem fyzické zachycení.

Fyzické zachycení znamená vyhledání prostor a uložení do míst s nízkou propustností podloží. Povrch zde slouží jako přirozená překážka. Může se například jednat o místa s podloží s vysokým obsahem solí nebo břidlic.

Hydrodynamické zachycení nastává například v místech solných jeskyní, kde se vody pohybují velmi pomalu. Plyn po přenosu do daného prostoru přirozeně prostupuje vodou vzhůru, protože je jeho hustota nižší než hustota vody. Dochází k saturaci vody v horních částech nepropustných prostor a značná část CO₂ se začne rozkládat. Následně oxid uhličitý nasycený ve vodě cestuje s vodou nepropustnými podzemními prostory dlouhými často stovky kilometrů. Doba, za kterou se dostane voda z těchto hlubinných pánví na povrch, může trvat i miliony let. Za tuto dobu dojde zcela jistě k rozpuštění oxidu uhličitého ve vodě.

Geochemické zachycení je proces, kde oxid uhličitý obsažený pod povrchem projde geochemickými interakcemi s horninou a zde obsaženou vodou. Část oxidu uhličitého se přemění při těchto procesech na uhličitánové minerály. Tyto minerály jsou nejtrvalejší formou geologického ukládání CO₂. Tento proces přeměny je relativně pomalý a může trvat tisíce let i déle [17].

3.3 Uložení oxidu uhličitého mineralizací

Jedním z možných řešení skladování CO₂ může být výzkumný projekt Reykjavické univerzity nacházející se na Islandu [18]. Při zdejším ukládání oxidu uhličitého je jeho plynná forma vkládána do vulkanického čedičového podloží a za přispění podzemních vod a prvků obsažených v zemi zmineralizuje do pevné směsi společně s vápníkem, železem a hořčíkem.

Skrze vrty o hloubce 2000 metrů by měl být oxid uhličitý vkládán do hloubek okolo 400 metrů a zde ponechán zmineralizovat při prostupu propustnou horninou. V hloubkách 500 metrů se nachází horniny zadržující podzemní vody. Před vstupem CO₂ do těchto pětisetmetrových hloubek je již CO₂ v pevném stavu. Tento proces přeměny CO₂ trvá přibližně šest měsíců. Výzkum vzorků při přeměnách probíhá speciálně vyvinutými nerezovými trubicemi.

Není světlo bez tmy, proto i tato technologie má nedostatky. Jedním z problémů tohoto procesu je spotřeba velkého množství vody, a to v poměru 25:1. Uvedená technologie je tedy určena spíše do míst poblíž pobřeží. Navíc přítomné bakterie při procesech část oxidu uhličitého přeměňují na metan, který je také významným skleníkovým plynem [18].

Zároveň transport, příprava a těžba minerálů z hloubek má vysoké energetické požadavky a snižuje se tím efektivita odstranění CO₂. Tato technologie může být řazena do technologií CCU z důvodu možnosti případného komerčního využití vzniklých sloučenin ve stavebnictví [8]. Spotřeba CCS technologie s mineralizačním uložením navyšuje energetickou spotřebu o 60 až 180 % [17].

4 Technologie CCU

Technologie CCU se neliší v prvních fázích od technologie CCS. Odlišnost se nachází až v poslední fázi a tou je uskladnění oxidu uhličitého. Technologie CCS zahrnuje dlouhodobé uskladnění CO₂ bez dalšího užití. CCU má být do budoucna významným doplněním technologií geologického skladování. Z krátkodobého hlediska (za 10 let) se počítá, že bude těmito procesy zpracováváno přibližně 300 Mt_{CO2} za rok. Proces CCU je založen na komerčním využití CO₂, proto tyto technologie z hlediska většího investičního zájmu mají větší přirozený potenciál. Do této kategorie technologií patří celá řada velmi zajímavých užití oxidu uhličitého za účelem zisku. Technologie jsou v různých fázích připravenosti k využití v praxi. Kupříkladu výroba močoviny a metanolu má již v této době široké uplatnění [36].

4.1 Přímé využití

Oxid uhličitý se přímo využívá například v potravinářství jako konzervační látka, k syčení nápojů, jako oxidační činidlo nebo jako rozpouštědlo pro extrakci chutí a podobně. Dále nachází využití ve farmaceutickém průmyslu, kde se používá k výrobě některých léků nebo jako respirační stimulant. Tyto využití jsou ovšem závislé na zdrojích produkujících oxid uhličitý o vysoké čistotě, což znamená na CO₂ získaném při výrobě amoniaku. Je nutné si uvědomit, že po svém využití CO₂ nakonec stejně často skončí v atmosféře. Nicméně přesto dojde k snížení emisí CO₂, protože nebude spáleno fosilní palivo [8].

4.2 Výroba biopaliva z řas

Tato technologie je založena na principu přímého přivedení spalin z průmyslové produkce do **otevřených vodních ploch** obsahující velké množství řas. Tyto řasy využívají dusík a oxid uhličitý ze spalin společně se slunečním zářením pro svůj růst. Mikroskopické fotosyntetické řasy jsou velmi rychle rostoucí organismy, jejichž převážná část těla je tvořena oleji. To je značně více než u typických plodin pěstovaných k energetickým účelům. Jejich sušina obsahuje 50 % uhlíku. Nicméně dle výzkumu řasy zachytí maximálně 54 % z celkové produkce oxidu uhličitého ze zdroje (například elektrárny) [9].

Asi největším problémem této technologie otevřených ploch jsou případné změny podmínek uvnitř nádrže v důsledku měnícího se klimatu a infiltrace nežádoucích druhů řas a parazitických organismů, kteří v daných podmínkách mohou vytlačovat původní druh [23].

Další úskalím je potřeba enormní plochy kolem průmyslového zdroje CO₂. Konkrétně pro elektrárnu o výkonu 500 MW by bylo zapotřebí vodní plochy o rozloze 50 až 100 km². Mohou často vznikat problémy nedostatku prostoru kolem bodového zdroje, nutnost vybudovat vodní plochy atd [9]. Potíže může způsobovat také to, že kvůli technologii budou zabráněny úrodné plochy, které by jinak sloužily pro pěstování plodin.

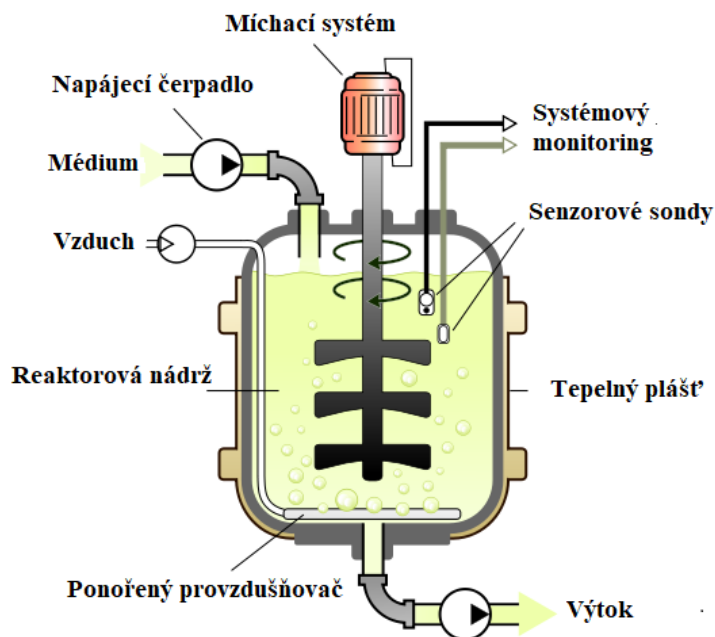
V otevřených nádržích taky může vznikat problém efektivního využití slunečního svitu, protože si husté nánosy řas mohou vzájemně stínit a tím klesá zisk biomasy pro následnou výrobu paliva. Proto se začala vyvíjet v podstatě navazující technologie bioreaktorů.

Bioreaktory mají za cíl zvýšit efektivitu výroby biomasy promícháváním řas a vylepšeným tvarem reaktoru pro stabilnější příjem světla řasami. Cílem je uspořít zastavěný prostor. Vyšší efektivnosti se u technologie docílí také kontrolou znečištění a správnou výměnou plynů v zařízení, kupříkladu zajištěním stabilní dodávky CO₂. Správným umístěním a orientací bioreaktorů vůči sobě a Slunci se dá taky značně zvýšit efektivnost procesu.

Nevýhodou zmíněných reaktorů oproti otevřeným vodním plochám je vyšší cena. Problémem může být také produkce kyslíku řasami. Bioreaktory mnohonásobně zvyšují

výnosnost vypěstovaných řas na metr čtvereční oproti otevřeným vodním plochám, ale jsou náročné na provoz a cenu konstrukce. Proto jsou stále ve větším měřítku více využívané otevřené vodní nádrže.

Samotná sklizeň řas se podílí na konečné ceně přibližně z 20 až 30 % [24]. Sběr těchto drobných organismů o velikostech v řádu mikrometrů probíhá standardně kombinací chemické a mechanické sklizně. Současně probíhá výzkum biologických metod sklizně, které by mohly výrazně snížit celkovou cenu [25].



Obr. 17 Jednoduché schéma bioreaktoru [59]

Když jsou řasy sklizeny a vysušeny, následuje jejich přeměna v paliva. Toho lze docílit biochemickými nebo termochemickými procesy. Biochemické přeměny v paliva využívají chemické a biologické procesy jako je esterifikace, fermentace nebo anaerobní trávení. Termochemické procesy využívají především tepla k získání syntézního plynu a posléze paliva společně s teplem a elektřinou [8]. ([8][9][23][24][25])

4.3 Zisk nedostupných zdrojů paliv vstřikováním CO₂

V angličtině lze najít pod zkratkou EOR, což znamená „enhanced oil recovery“. Pro zisk jinak nedostupných zdrojů, především ropy a případně zemního plynu, je zkoumána další metoda patřící do technologií CCU.

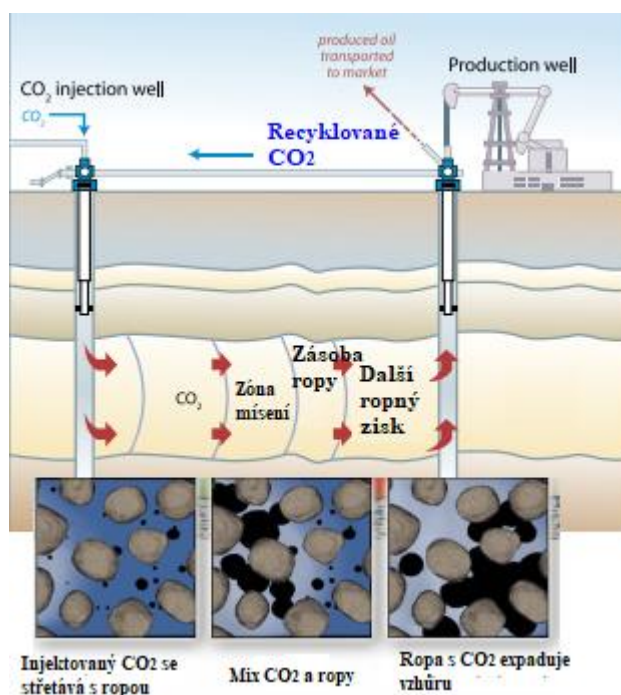
Při primárním získávání ropy klasickými konvenčními metodami těžby je zisk přibližně 5 až 40 % ropy celého vrtu. Posléze následuje sekundární těžba a je obdrženo dalších 10 až 20 % ropy, a to pomocí načerpávání vody do vstřikovacího vrtu [17].

Nyní by měla být použita terciární metoda získávání ropy (viz Obr. 18), a to vstřikem oxidu uhličitého recyklovaného z těžby nebo jiného zdroje CO₂ do vrtu. Tím by bylo získáno dalších 7 až 23 % zásob ropy vrtu, což budí nemalý zájem především u států s bohatými ropnými nalezišti. Jelikož by poměrně snadno navýšily těžební zisky. Typickými příklady takových zemí jsou Norsko, USA nebo Kanada.

Studie ropných ložisek a dalších možností ropné těžby jsou prováděny již celá desetiletí. Navíc je zde i ekologický důvod, protože se při terciární těžbě oxid uhličitý uloží do podloží místo vytěžené ropy. Přibližně 50 až 67 % vstříkovaného CO₂ putuje opět ven společně s ropou a je opětovně vstříkován zpět pro ušetření nákladů. Kolik procent oxidu uhličitého unikne, závisí na mnoha faktorech. Záleží na teplotě, tlaku, viskozitě ropy nebo třeba na hloubce uložení.

Hloubka vrtů musí být zpravidla alespoň 600 metrů [17]. Pro získání vysoce a středně viskózní ropy je postačující, když se oxid uhličitý nemísí s ropou. Pro získání ropy s nižší viskozitou, která je více ceněna, to ovšem nestačí. Pro dostatečné promísání ropy se vstříkovanými prvky je také zapotřebí dosáhnout tlaku minimálně 10 až 15 MPa [17]. Konkrétní hodnota tlaku závisí na tvaru uložení, teplotě, složení ropy atd.

Uložení CO₂ pozitivně ovlivňuje rozdíl hustot mezi ropou a CO₂, protože zpomaluje šíření oxidu uhličitého směrem vzhůru a nutí ho šířit se do stran.



Obr. 18 Ilustrativní obrázek přídavného ropného získávání při využití injektáže CO₂, kde jeden vrt slouží k vstříkovaní CO₂ a druhý k těžbě ropy; dole lze vidět, jak probíhá mísení CO₂ s ropou a vodou [17], [21]

Při těžbě zemního plynu se primárními metodami vytěží přibližně 95 % zdroje, a proto existují pouze testovací projekty těžby za pomoci injektáže CO₂ [17]. Autoři některých studií dokonce tvrdí, že injektáží oxidu uhličitého se sníží zisk zemního plynu ze zdroje [22].

Zmínit lze také technologie, kde se injektáží oxidu uhličitého do uhelných ložisek získává metan, který je v ložisku nahrazen a vytlačen na povrch oxidem uhličitým a může být použit k ekonomickým účelům. Pilotní projekt této technologie lze najít v Sanu Juanu v Novém Mexiku [9]. Uhlí má značné množství mikroskopických pórů, do kterých mohou jednotlivé molekuly plynů difundovat, a být pevně adsorbovány. Může v něm být uloženo až 25 m³ metanu na jednu tunu uhlí (záleží na kvalitě uhlí) za normálních podmínek (0,1 MPa a 0 °C) [9]. [8][9][17][21]

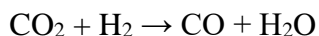
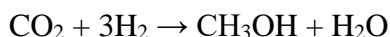
4.4 Přeměna CO₂ na paliva a chemikálie

Dlouhodobé scénáře hovoří o velkém potenciálu technologií CCU, zahrnujících právě přeměnu CO₂ na syntetická paliva. Tyto scénáře zpracování nebudou s vysokou pravděpodobností v nejbližších deseti letech uskutečněny. Případná realizace plánů ve větším měřítku si žádá značné investiční náklady. Je spojena s potřebou velkých dodávek CO₂ a vybudování dopravní infrastruktury pro CO₂, což bude finančně náročné. Přibližně by se mohlo jednat až o 2300 Mt CO₂ ročně pro dlouhodobější plány [34].

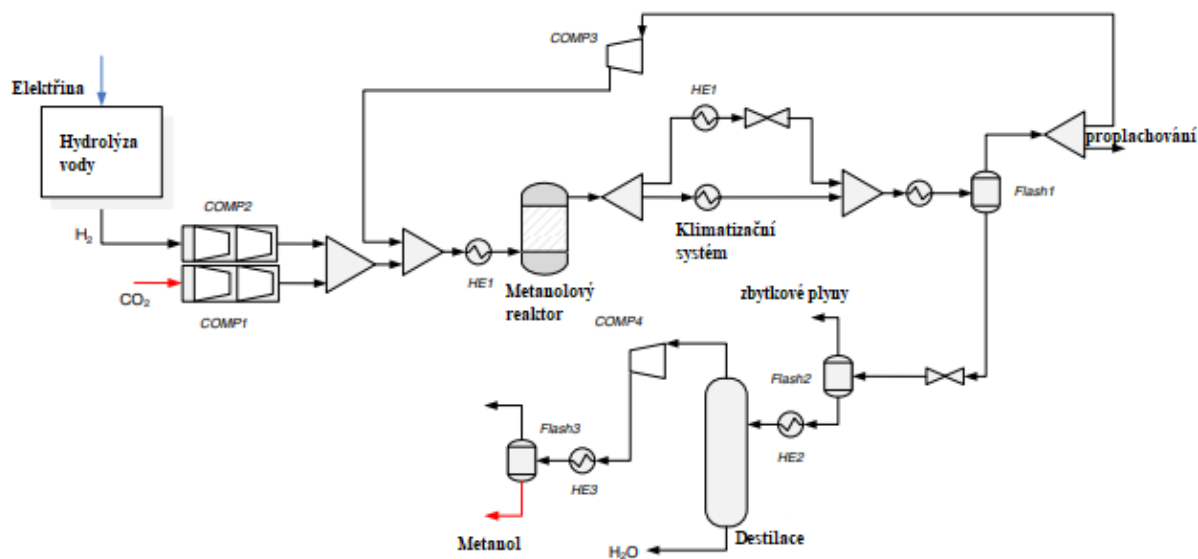
I přesto je faktem, že CO₂ může být zpracováván na paliva a chemické látky. Toho se dosahuje za pomoci karboxylačních reakcí, kde je molekula CO₂ výchozí látkou a z ní chemickou reakcí vzniká výsledný produkt. Těmito produkty mohou být organické sloučeniny jako akryláty, polymery nebo uhličitany. Dalším příkladem je výroba za pomoci redoxních reakcí, kde jsou narušeny vazby uhlíku a kyslíku za účelem produkce metanu, syntézního plynu, metanolu, močoviny apod.

Oxid uhličitý může být použit jako substituent za palivové výrobky petrochemického průmyslu. Nicméně značnou nevýhodou je vysoká energetická náročnost chemických přeměn. Navíc vyrobená paliva mají krátkou životnost (šest měsíců a méně). To znamená, že CO₂ může po čase unikat z chemické látky ještě před jeho využitím [8]. Z ekologického hlediska tato výroba jistý smysl dává, protože dojde k vypuštění „jedné emisí dvakrát“.

Jako příklad zde bude uveden průběh jednoho z typů **výroby metanolu** (viz Obr. 19). Z výroby čpavku je přiveden čistý CO₂ a stejně tak proud H₂ dle stechiometrického poměru. Začnou probíhat reakce prvků a z CO₂ vznikne CH₃OH společně s vodou. Voda je recyklována pro přeměnu CO na CO₂ a k dalším činnostem systému.



Jako katalyzátor je zde používán oxid kovu (například směsi mědi, oxidu zinečnatého a oxidu chromitého nebo oxidu hlinitého [37]). CO₂ je stlačován na 7,8 MPa a H₂ vstupující z elektrolýzy do reakce o tlaku 3 MPa. Směs obou proudů je přivedena do metanolového reaktoru [36]. Metanolové reaktory pracují při tlacích 5 až 10 MPa a teplotě 225 až 270 °C [37]. Následně jsou chladícím systémem teploty a tlaky proudu vody a metanolu sníženy na 35 °C a 7,34 MPa. Zbýlý CO₂ je recyklován zpět do procesu. Po průchodu obou látek výměníky tepla a destilačním zařízením, kde dochází k oddělení metanolu a vody. Následuje procházení látek dalšími zařízeními pro čištění metanolu a na konci procesu je hotov konečný produkt v podobě metanolu o atmosférickém tlaku a pokojové teplotě [36].



Obr. 19 Jednoduché schéma výroby metanolu [36]

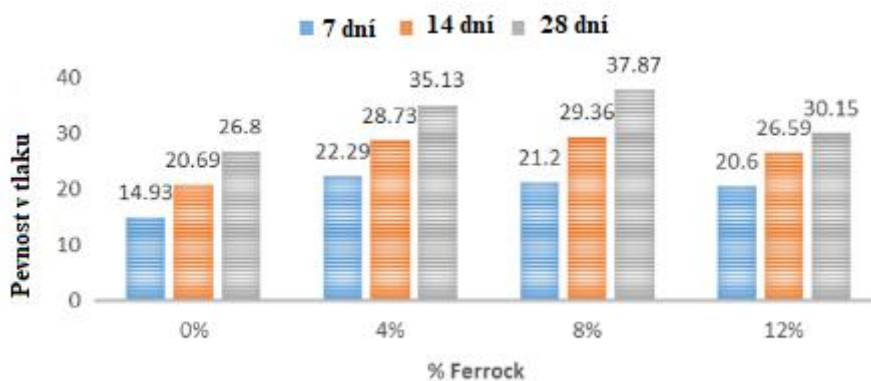
4.5 Ferrocock

Technologie pro zpracovávání a zisk CO_2 nacházejí využití i ve stavebnictví. Zajímavým příkladem může být materiál pojmenovaný ferrocock vynalezený Davidem Stonem. K výrobě ferrococku jsou používány zbytky z různých výrobních procesů, jako je železný prach (60 %), popílek (20 %), metakaolin (12 %) a vápenec (8 %). Z 95 % jsou to recyklovatelné a cenově velmi dostupné materiály. Tyto materiály jsou následně vytvrzovány stlačeným oxidem uhličitým. K této reakci není potřeba dodávat další teplo ke katalýze chemické reakce.



Analýzou atomární spektrometrie bylo následně zjištěno, že výsledný materiál „čistý“ ferrocock obsahuje přibližně 8 % až 11 % CO_2 z celkové váhy vzorku. Také bylo změřeno, že má pětkrát vyšší pevnost v tlaku a je mnohem flexibilnější než „klasický“ beton.

Sypký ferrocock byl při pokusech také přidáván jako aditivum do betonu v procentuálním zastoupení 0 %, 4 %, 8 % nebo 12 %. Zároveň byly v jistém časovém rozpětí při tvrdnutí betonu měřeny pevnostní charakteristiky betonu v tahu, tlaku a ohybu.



Obr. 20 Pevnost betonu v tlaku v závislosti na procentu přidaného ferrocku a době tvrdnutí [19]

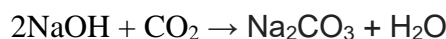
Zde je příklad výsledků testu v tlaku v závislosti na % přidaného ferrocku. Nejlepších hodnot při testech u všech pevnostních charakteristik bylo dosaženo přidáním 8 % ferrocku. Navíc může být ferrock využit při výstavbě budov, které jsou v kontaktu s mořskou vodou, ta zlepšuje pevnost materiálu. Stejný efekt zlepšení pevnosti byl zaznamenán u ferrocku ve znečištěném prostředí s vysokým obsahem CO₂ [19][20].

4.6 Přímé zachycení CO₂ ze vzduchu

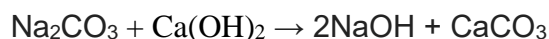
V anglické literatuře se dá najít pod názvem „Direct air capture“ (DAC). Dle výzkumů organizace IPCC je 60 % globálních emisí CO₂ vyprodukovaných spalováním fosilních paliv z bodových zdrojů. To znamená, že i kdyby bylo dosaženo 90% efektivity zachycení CO₂ ve všech těchto bodových zdrojích, stále bude téměř 50 % CO₂ zbývat. Díky tomu začaly výzkumy dalších technologických řešení [30].

Tyto technologie jsou založeny na zachycování CO₂ nikoliv ze spalin, ale přímo ze vzduchu. Společnosti, zabývající se právě těmito technologickými možnostmi, využívají zachycování při nižších teplotách do 100 °C. Na světě existuje jedna jediná firma s názvem *Carbon Engineering* nacházející se v Kanadě, která při procesech využívá poměrně vysokých teplot. Zajímavostí je, že na spolufinancování firmy se podílí i světově známý vlastník společnosti Microsoft Bill Gates.

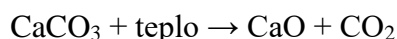
Při procesu (viz Obr. 21) je vzduch vháněn do zařízení, a to buď přirozeně nebo pomocí ventilátorů. Následně je v prvním cyklu absorpce přiveden do styku s rozprašovaným NaOH. Ve stykači za podmínek atmosférického tlaku a pokojových teplot reaguje NaOH a CO₂ a vznikne roztok uhličitanu sodného Na₂CO₃.



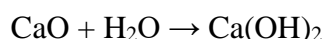
Roztok je následně dopraven do druhého cyklu zvaného regenerace. V tomto cyklu je Na₂CO₃ v kaustifikační jednotce smícháván s hydroxidem vápenatým (Ca(OH)₂) a vytváří uhličitán vápenatý (CaCO₃) a NaOH. Čistý hydroxid sodný je opět poslán do prvního cyklu k opětovnému využití a CaCO₃ je poslán do pece.



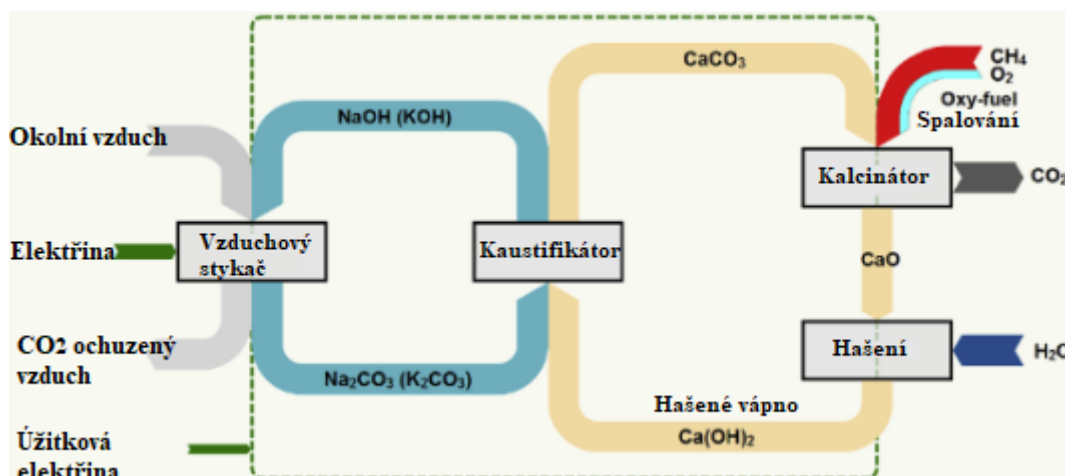
V peci je následně CaCO_3 zahříván na teplotu kolem $900\text{ }^\circ\text{C}$ a přivedeným teplem dochází k rozdělení uhličitanu vápenatého na CaO a CO_2 . Tato fáze je z celého procesu energeticky nejnáročnější. Čistý oxid uhličitý je jako produkt odveden a CaO je transportován do dalšího zařízení z procesu.



V tomto dalším zařízení je CaO promíchán s vodou a vznikne hydroxid vápenatý, který může být opět využit v druhém cyklu. Tím se celý kruh chemických procesů uzavře.



Lze tedy říct, že je proces zcela soběstačný, co se týče chemických prvků. Nedostatkem procesu je potřeba tepla a elektrické energie. Elektrická energie je využívána na rozstřík kapalin v procesu, k přivedení vzduchu na stykač, případné stlačení CO_2 . Původní koncepce počítaly s přivedením tepla pomocí spalování zemního plynu. To se ukázalo jako nerentabilní v důsledku značné produkce CO_2 při spalování zemního plynu spalovací turbínou. Bohužel ani uhlíkově neutrální zemní plyn vytvořený pro tyto účely se dle výzkumů příliš neosvědčil. Důvodem je opět vysoká cenová náročnost. Dle studie byl jako konečný a nejhodnější model vybrán plně elektrizovaný typ [29].



Obr. 21 Absorpční proces přímého zachycení CO_2 ze vzduchu využívající vysokých teplot [29]

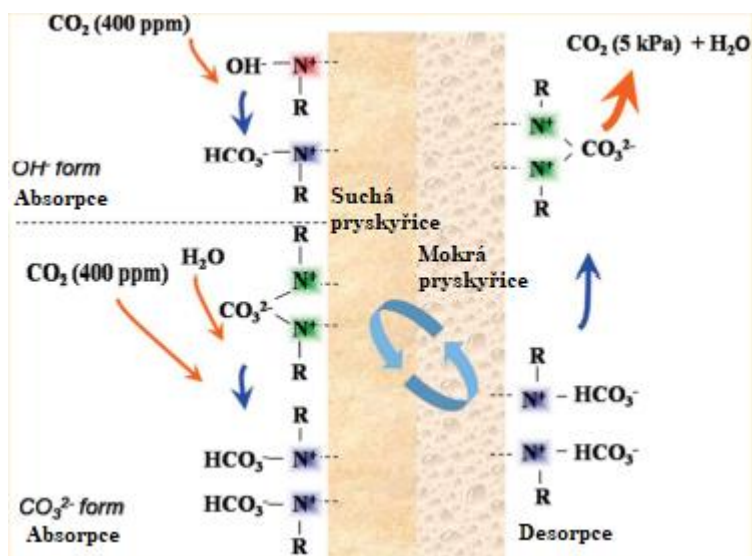
Za zmínku také stojí, že oba cykly mohou pracovat zároveň. Značnou výhodou i nevýhodou je, že tento proces nepracuje se spalinami. Musí profiltrovat značné množství vzduchu. Na druhou stranu není zde taková extrémní potřeba vysoké účinnosti odstranění CO_2 ze vzduchu v porovnání s některými energetickými procesy [29].

4.7 Umělé stromy

Stejně jako u předchozí technologie se jedná o přímé zachycování oxidu uhličitého ze vzduchu. Profesor Klaus Lackner a Alan Wright se svými spolupracovníky vyvinuli pozoruhodný materiál. Materiálem je pryskyřice vyměňující ionty skládající se z polystyrenového řetězce s čtvernými amidovými skupinami připojenými k polymeru. Lze

tomu rozumět tak, že u NH_4^+ byly vodíky nahrazeny uhlíkovým řetězcem připojeným k polymernímu matrixu. Díky tomu se nikdy neuvolní proton, jako by tomu bylo u NH_4^+ . Přibližně 60 % váhy tohoto materiálu tvoří pryskyřice. Více o materiálu lze najít ve zdroji [31].

Zvláštností tohoto plastu je, že při kontaktu se vzduchem absorbuje CO_2 a pokud přijde do kontaktu s vodou nebo prostředím s vysokou vlhkostí, následně CO_2 uvolní zpět do okolí (Viz Obr. 22). Výhodou je, že k tomuto procesu nejsou potřeba energeticky vysoce náročné změny tlaku a teploty. Zařízení vyžaduje jen velmi nízkou dávku elektrické energie. Samotní vynálezci materiálu uvádí, že jedno zařízení („strom“) vytvořený z těchto materiálů je ekvivalentem tisíce normálních živých stromů. Jedním z dalších směrů výzkumu je odebírání CO_2 ze vzduchu a jeho následné uvolňování v hermeticky uzavřeném prostředí, kde jsou pěstovány rostliny. Ty pohlcují oxid uhličitý. Tato technologie by mohla být v budoucnu používána například i jako podpora života na kosmických stanicích, v ponorkách a podobně [30][31].



Obr. 22 Chemické procesy probíhající při kontaktu suchého materiálu s vlhkostí [30]

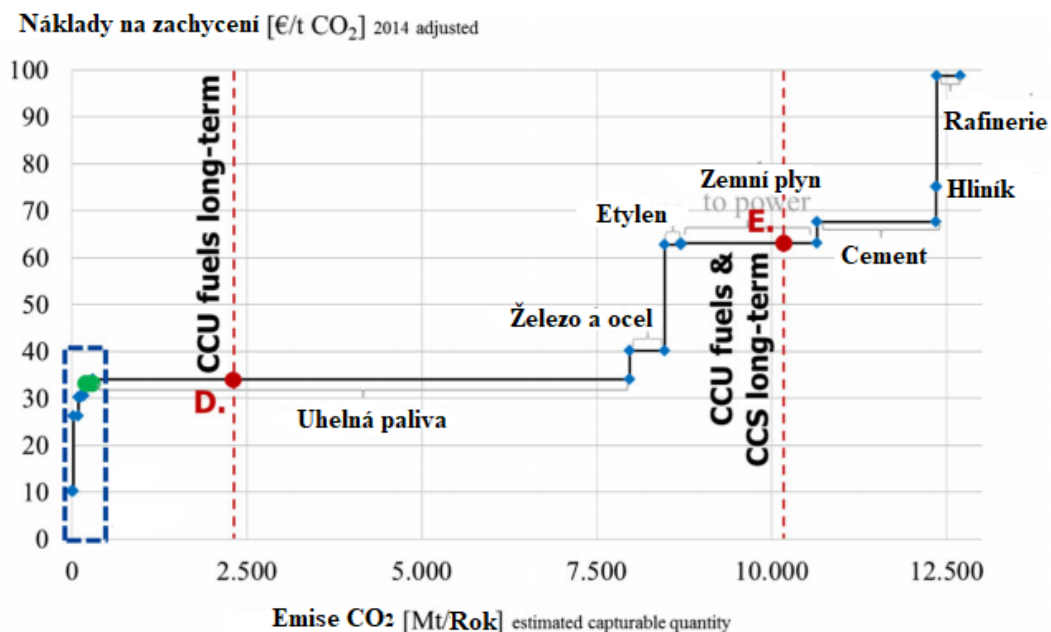
Autoři studií uvádí, že první prototypy budou separovat tunu CO_2 za přibližnou cenu 200 \$. S postupným časovým vývojem, rozšiřováním a optimalizací technologie je prognostikováno, že by cena mohla klesnout na 30 \$ za tunu CO_2 . To je dle odpůrců vysoce optimistický odhad. Uplatnění by se především mohlo najít u těžebních společností, které chtějí používat technologii vstřikování CO_2 k většímu zisku zdrojů. Cena, za kterou by společnosti byly ochotny nakupovat CO_2 , se v čase společně s poklesem a růstem cen ropy na trhu mění. Zároveň je nutné vzít v potaz další faktory jako cenu práce v dané zemi a další položky popsané v následující kapitole Ekonomie procesů. Přibližná akceptovatelná hodnota za tunu CO_2 se uvádí asi 100 \$ [31].

5 Ekonomie procesů

Odhadování ceny technologií CCU a CCS by se dalo přirovnat k většeni z křišťálové koule. Konečná cena bude pravděpodobně dost záležet na aktuální politické situaci, poptávce po CO₂, požadavcích veřejnosti a s tím spojeným přísunem investičních peněz. Cenu může rovněž ovlivnit vývoj nových lukrativnějších zpracovatelských technologií. Je vidět v následujících obrázcích (viz Obr. 23, Obr. 24), že cena separace CO₂ u některých procesů je značně nízká. Bohužel s případnou rostoucí popularitou technologie CCS a CCU nebudou nejlevnější zdroje CO₂ schopny pokrýt objemové požadavky. Z tohoto důvodu se bude muset přejít ke zdrojům, jejichž cena za zachycení jedné tuny CO₂ nebude až tak cenově přijatelná [34].

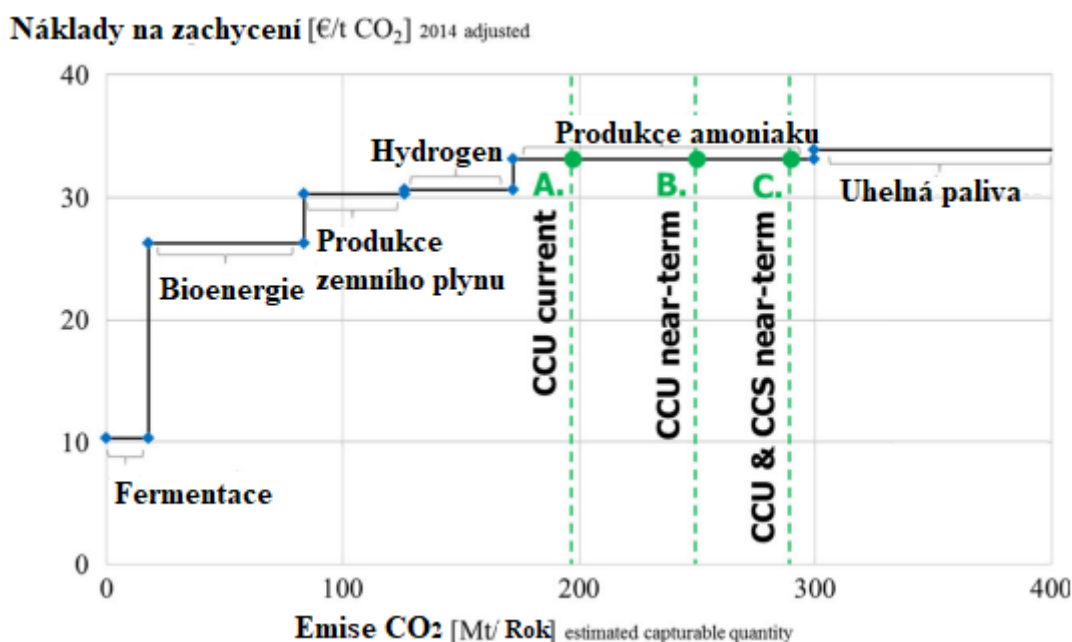
Narušit tyto kalkulace může například některá ze slibných metod přímého zachycení CO₂ ze vzduchu. U jedné z nich predikují její vynálezci přechod z cen okolo 200 \$ až na 30 \$ za tunu CO₂ [31]. Dále bude rozvoj značně záležet na přílivu státních investičních peněz, na kterých aktuálně vývoj závisí a rozhodují o nich političtí hodnostáři s ohledem na aktuální názor potenciálních voličů. Existuje tedy i možnost, že mohou tyto technologie zamířit do slepé uličky. Jistým hnacím faktorem může být dostatečně vysoká daň z uhlíku. Pokud by tedy ceny emisních povolenek byly vyšší než náklady na technologie CCS, mohlo by být zavedení technologie do provozu profitabilní záležitostí. Do budoucna se navíc počítá s vyšším podílem výroby energií z obnovitelných zdrojů. To může ovlivnit například uhelné elektrárny, které budou pracovat na nižší faktor zatížení a na nižší efektivitě. Tato změna může dle studií negativně ovlivnit náklady na zachycení oproti aktuálnímu stavu. Navíc bude muset být část objemového podílu CO₂ zachycovaného u uhelných elektráren přebrána pravděpodobně dražšími zdroji pro separaci CO₂. Také mohou v průmyslu nastat větší tendence pro přechod k technologiím emitujícím nižší množství emisí CO₂ [34].

5.1 Cena za separaci CO₂



Obr. 23 Měřítko nákladů za zachycení CO₂ z jednotlivých bodových zdrojů společně s množstvím světových emisí CO₂ vyprodukovaných jednotlivými procesy [34]

V obrázku (viz Obr. 23) je přehledně ukázáno srovnání cen za separaci CO₂ u jednotlivých bodových zdrojů. Zdroj je z roku 2014 a nepočítá s inflací a možnými cenovými změnami, každopádně je dostatečný pro smysluplné srovnání. Jak je vidět, největší případné kapacity pro zachycení (téměř 7,5 Gt/rok) emisí CO₂ mají zdroje využívající uhlí. Cena za zachycení z těchto zdrojů se pohybuje okolo 33 € na tunu CO₂. Ceny u dalších průmyslových zdrojů, jako je výroba oceli, výroba etylenu, spalování zemního plynu a výroba cementu, potom postupně rostou a zastavují se na částce 68 € za tunu CO₂ při výrobě cementu.



Obr. 24 Místní pohled grafu v Obr. 23 Měřitko nákladů za zachycení CO₂ z jednotlivých bodových zdrojů společně s množstvím světových emisí CO₂ vyprodukovaných jednotlivými procesy [34]

Tento Obr. 24 je pouze místním pohledem předchozího obrázku (viz Obr. 23). Přehledněji zobrazuje procesy, u kterých je nejlevnější zachycení CO₂. Jedná se o fermentační procesy, produkci zemního plynu, produkci amoniaku a další. Bohužel potenciální množství CO₂ není nijak závratné. Nicméně se s nimi počítá jako s primárními poskytovateli CO₂. Zejména kvůli dobré cenové přijatelnosti a prvotní nižší množství potřebě oxidu uhličitého [34].

5.2 Cena transportu a uskladnění CO₂

Jak již bylo zmiňováno v kapitole 2.3, cena separace CO₂ je značně vyšší v porovnání s ostatními náklady na transport a uskladnění. V případě ceny za transport a uskladnění se částka zpravidla uvádí za obě položky dohromady. Standardně se v této souvislosti bavíme o nákladech, každopádně u těžby ropy za pomoci vtačování CO₂ se může jednat dokonce o výdělečnou činnost.

Záleží na aktuální ceně ropy oproti celkové ceně za transport, separaci a uložení CO₂. Studie uvádí koeficient 0,33 tuny CO₂ vtačeného do ložiska ropy a je ekvivalentem vytěžení jednoho barelu ropy. Při aktuální ceně ropy v době koronavirové krize se pohybuje hodnota

za barel okolo 24 \$, což by znamenalo zisk 72 \$ za tunu CO₂. Tato částka by se ještě snížila a stala by se konečnou až po odečtení licenčních poplatků, daní a dalších tax [35]. Na základě těchto informací lze konstatovat, že při současné situaci by byl tento typ těžby ve větším měřítku nevýhodný.

Studie [35] z roku 2006 uvádí, že průměrná kombinovaná cena za transport a uložení se v Evropě pohybuje kolem 4 až 5 \$ za tunu CO₂ a v Severní Americe přibližně 12,5 \$ za tunu CO₂. Značný rozdíl je způsoben rozdílnou injektivitou skladovacích rezervoárů. To souvisí s množstvím vstříkovaného CO₂. Uvedené ceny jsou pro transport potrubní technikou a uskladnění při tlaku 11 MPa [35]. Konečná kombinovaná cena pro konkrétní zdroje CO₂ za transport a uložení závisí především na vzdálenosti uložišť a zdrojů CO₂. Vědecký výzkum z roku 1997 uvádí hodnotu kombinované ceny od 20 \$ do 55 \$ za tunu CO₂ [17]. Je třeba zdůraznit, že ani jedna z vědeckých prací neuvádí podrobnosti o tom, jak došlo k stanovení takových cenových hodnot.

5.2.1 Cena potrubního transportu

Náklady na dopravu potrubím mohou být rozděleny do **tří položek**. První položkou jsou **náklady na vybudování potrubní sítě**. Sem patří ceny za materiály a vybavení, jako jsou trubky, čerpadla, komunikační sítě atd. Také zde můžeme zařadit cenu za práci při instalaci.

Druhou položkou jsou **náklady na provoz a údržbu**. To jsou ceny za monitoring terénu, údržbu a například ceny energií provozu.

Třetí položkou jsou **ostatní náklady**. Zde můžeme zařadit ceny za návrhy, projektování, pojistky, povolení atd.

Faktorů ovlivňujících konečnou cenu je celá řada. Jedním z nich je správná volba materiálu zařízení odolávající tlaku oxidu uhličitého a pro techniku vhodné procento znečištění CO₂. Dále to může být zeměpisná lokace, klimatické podmínky, stát výstavby, blízkost moře nebo poloha ve vnitrozemní, vzdálenost výstavby potrubí pro vybudování stanic, přítomnost hranic, chráněných oblastí a podobně [38].

5.2.2 Cena uskladnění

Opět lze rozdělit náklady do **čtyř** pomyslných **kategorií**. První z nich jsou **náklady na rozvoj sítě**, kam se řadí například geologický výzkum terénu či příprava vrtu zahrnující přepravu vrtného vybavení. V neposlední řadě sem lze zařadit také výzkum ekologického dopadu na přírodu, ceny licencí, projektování apod.

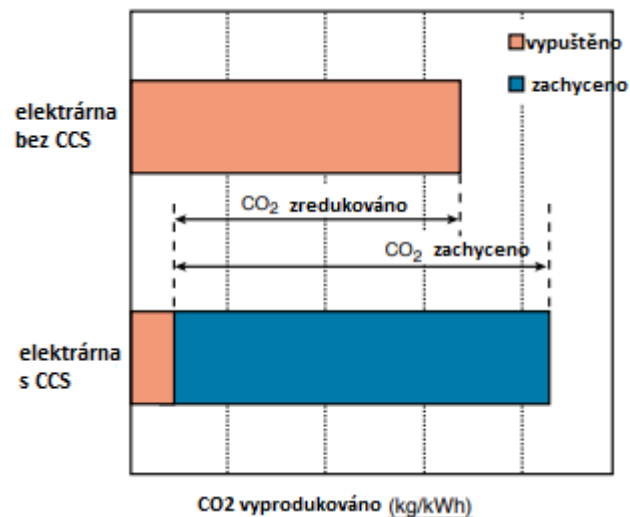
Do druhé kategorie patří **náklady na vytvoření vrtů**. Ty závisí na typu povrchu, hloubce a šířce vrtu a potřebě horizontálního vrtání. S rostoucí hloubkou roste cena za metr. Dále mohou záviset na dostupnosti místa, státě apod.

Třetí jsou **náklady na povrchová zařízení**. Ty jsou spojeny hlavně s přípravou injektážní sítě. Na pevnině jsou relativně nízké, zatímco mimo pevninu jsou největším nákladem, protože zahrnují ceny plošiny atd. Finanční zátěž lze snížit jejím opětovným použitím. Každopádně plošina má omezenou dobu životnosti.

Čtvrtou kategorií jsou **náklady na monitorování** seismické aktivity. Dále se sem řadí výzkum geochemických reakcí a monitorování tlaku a náklady na samotnou výstavbu pro výzkum a měřidla [38].

5.3 Energetické náklady na CCS oproti technologii bez CCS

Elektrárnám s technologií CCS (s geologickým nebo oceánským uložením) se zvýší energetická spotřeba přibližně o 10 až 40 % oproti stejným elektrárnám bez této technologie. S růstem energetické spotřeby vzrůstá i množství emisí CO₂. Většina navýšené spotřeby energie je potřebná pro zachycování a kompresi CO₂. Přesto technologie CCS zredukuje emise o 80 až 90 %. Pokud bychom uvažovali o mineralizačním uložení, spotřeba energie technologií CCS je zde zvýšena o 60 až 180 % [17].



Obr. 25 Grafické srovnání vyprodukovaného CO₂ elektrárnou s CCS oproti stejné elektrárně bez CCS a znázornění kolik CCS z produkovaného množství CO₂ zachytí [17]

V této souvislosti se zavádí vzorec pro určení energetických nákladů na zredukování emisí CO₂ pomocí CCS. V angličtině lze najít pod názvem CO₂ avoidance cost.

CO₂ avoidance cost = $\frac{C_{eCCS} - C_e}{t_{CO_2} - t_{CO_2CCS}}$ = vyjadřuje cenu za zredukování tuny emisí CO₂ pomocí CCS.

- **C_{eCCS}** je cena spotřebované energie elektrárnou s CCS
- **C_e** je cena spotřebované energie elektrárnou bez CCS
- **t_{CO₂}** je množství vyprodukovaných emisí CO₂ elektrárnou bez CCS v tunách na MWh
- **t_{CO₂CCS}** je množství vyprodukovaných emisí elektrárnou s CCS CO₂ v tunách na MWh

Tento vztah má více metod a každá využívá jiné předpoklady. Dle uvedené rovnice se vypočítají náklady na zredukování tuny oxidu uhličitého pomocí CCS. Další uvádí cenu výstavby elektrárny s CCS oproti elektrárně bez CCS. Poslední metoda ukazuje potenciálnímu investorovi cenu ročního provozu a nákladů na CCS v porovnání s elektrárnou bez CCS [39].

6 Situace v České republice

V České republice jsou tendence k přechodu od zdrojů využívajících uhlí k více šetrným ekologičtějším možnostem. Jak lze názorně vidět v Obr. 26 vyprodukované CO₂ uvedenými zdroji dlouhodobě klesá, což je dáno právě přechodem na alternativní zdroje energie, modernizací stávajících technologií apod. Zároveň je možné vidět, že produkce CO₂ energetikou a průmyslovými procesy byla v roce 2014 přibližně 110 Mt. Tato odvětví jsou primárně uvažována jako zdroj CO₂ pro technologie CCS a CCU [41].

Pokud bychom chtěli nainstalovat technologie CCS a CCU po celé České republice pro sektory energetiky a průmyslových procesů. Je zapotřebí uvážit účinnost zachycování, kterou lze vyhledat v kapitole 5.3. Maximální redukce emisí CO₂ se přibližně rovná 90 %.

$$S_{\text{palCCS}} \cdot E_{\text{fe}} = Z_{\text{CO}_2}$$

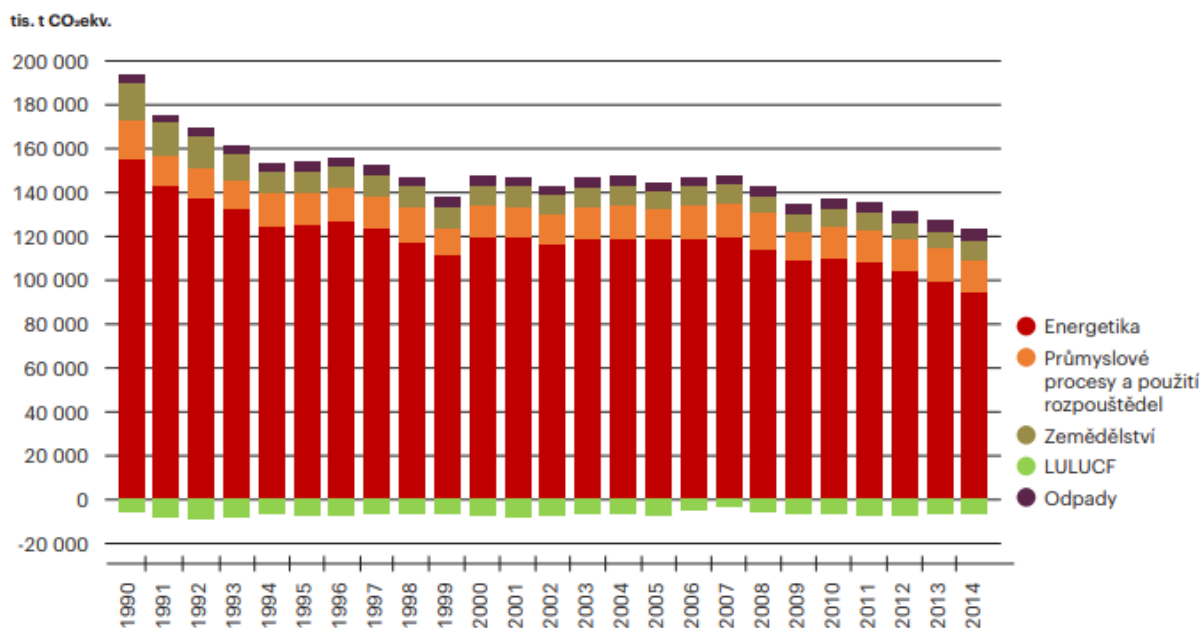
$$110 \cdot 0,9 = 99 \text{ Mt CO}_2$$

V případě využití pouze technologie CCS by bylo nutné každoročně ukládat 99 Mt CO₂. Zároveň by se spotřeba primárního zdroje (uhlí apod.) kvůli provozování technologie CCS zvýšila o hodnotu z rozsahu 10 až 40 %. Volím 25 %, což je průměr 10 a 40 %.

$$Z_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{CCS}} = P_{\text{CO}_2/\text{rok}}$$

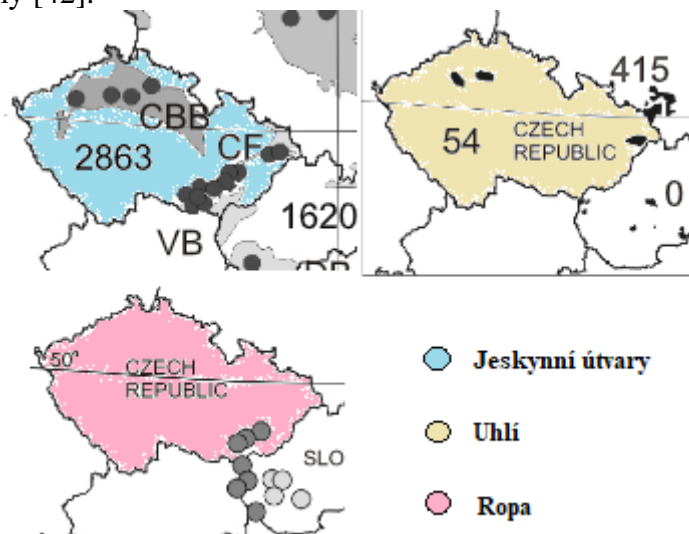
$$99 \cdot 1,25 = 123,75 \text{ Mt CO}_2 \text{ za rok}$$

V případě celorepublikového pokrytí daných odvětví technologií CCS by tedy roční produkce CO₂ činila 123,75 Mt.



Obr. 26 Vývoj produkce emisí CO₂ vybranými odvětvími v České republice v čase [41]

Na území České republiky se nenachází moře, proto pro uskladnění CO₂ mohou být potenciálně uvažována pouze geologická uložení CO₂. Dle studie [42] zabývající se vhodnými geologickými uloženími především na území Polska, Slovenska, České republiky a států kolem Baltského moře se skladovací kapacita na našem území odhaduje následovně. Pro vhodné podzemní jeskynní útvary je odhadována kapacita přibližně na 2863 Mt. Na Obr. 27 jsou vyobrazeny a započítány pouze vhodná uložení pro uskladnění CO₂ o tlaku menším než >7,8 Mpa a teplotě menší než >31 °C. Pro uhelné sloje mluví odhady o úložném prostoru okolo 54 Mt a případné ukládání spojené s ropnou těžbou konkrétně pro Českou republiku zde není uvedeno. Každopádně celková kapacita pro všechny studii uvedené země v rámci vytěžených ložisek ropy a zemního plynu se uvádí 938 Mt. Více než čtvrtinu tohoto čísla navíc tvoří jedno z mnoha uložení nacházejících se v Polsku. U nás máme pouze malé rezervoáry v oblastech okolo Kostelan a Ždánic, proto tyto kapacity nebudou velké a v této diplomové práci budou zanedbány [42].



Obr. 27 Mapy s označením lokalit vhodných pro uskladnění CO₂ s celkovou odhadovanou kapacitou [42]

V realitě bude celková skladovací kapacita dozajista větší, každopádně je nutné tyto prostory objevit, a především důkladně prozkoumat. Zároveň si musíme uvědomit, že některá uložení neprošla skrz síto požadavků na uložení. Dosažení hloubek 3000 metrů je značně problematické a zdejší teploty mohou dosahovat hodnot okolo 80 až 140 °C (oblasti prostor v povodí Dunaje, Slovensko), což by mezi jinými snížilo i úložnou kapacitu prostor. Taková uložení jednoduše nevyhovují kritériím [42].

Pokud sečteme celkovou kapacitu uložení CO₂ (2917 Mt) a vydělíme ji zachytitelnou produkcí emisí CO₂ s instalovaným CCS (123,75 Mt za rok).

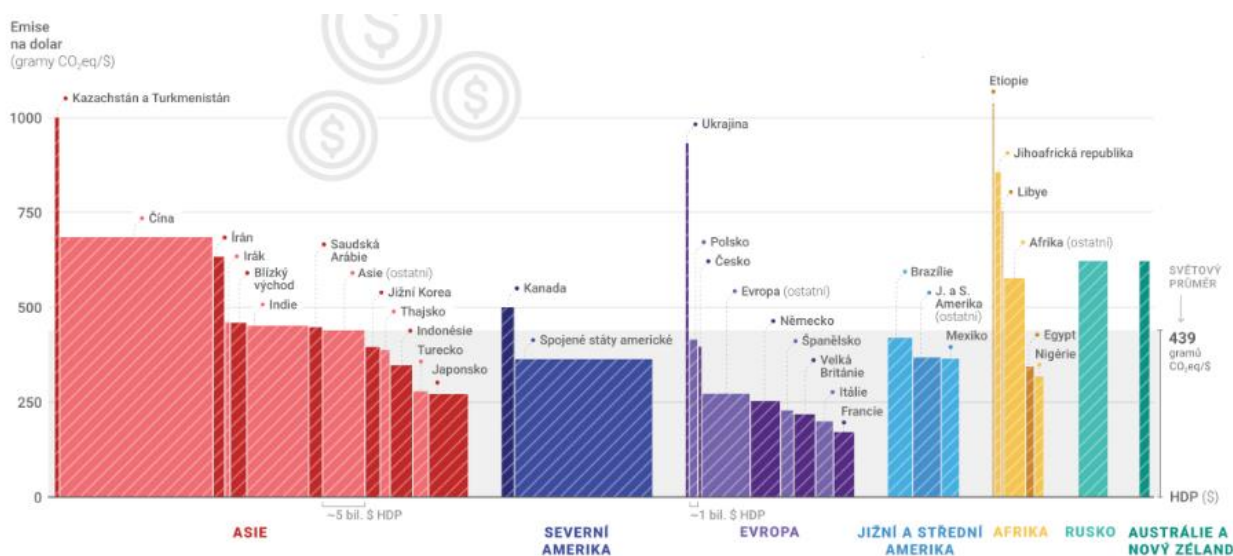
$$CCS_{cap} \div P_{CO_2/rok} = D$$

$$2917 \div 123,75 = 23,6 \text{ let}$$

Výsledná doba, po kterou by kapacitně vystačily uložení, vychází na **pouhých 23,6 let**. To z dlouhodobého hlediska není přesvědčivé řešení problematiky. Samozřejmě aktuální rozvoj a modernizace technologií společně s přechodem k obnovitelným zdrojům energie tuto produkci pravděpodobně sníží. Tím se prodlouží doba, po kterou je možné ukládat CO₂. Přesto je třeba pomýšlet na využití nejenom CCS, ale i technologií CCU. Kupříkladu přidávání oxidu

uhlíčitého do materiálů ve stavebnictví a dalších. Pokud ovšem technologie pouze krátkodobě pozdrží únik CO₂ do ovzduší, potom z dlouhodobého ekologického hlediska nemá příliš velký význam. Přesto si některé z nich zajisté najdou svoje uplatnění.

Z globálního hlediska Česká republika patří dle statistik mezi největší světové producenty CO₂ na obyvatele. To je i kvůli značné koncentraci průmyslu na našem území již od dob Rakouska-Uherska. Částečně mohou být tyto údaje zavádějící. Pokud se totiž podíváme na produkci CO₂ v poměru k hrubému domácímu produktu České republiky (viz Obr. 28), statistiky ukazují, že v tomto ohledu jsme pod světovým průměrem emisí CO₂ na každý dolar z HDP [43].



Obr. 28 Graf emisí CO₂ v poměru k hrubému domácímu produktu (HDP) jednotlivých zemí, úplně vpravo je hodnota světového průměru [43]

6.1 Emisní obchodování

Emisní obchodování je nástroj na redukování nejvíce znečišťujících zdrojů emisí. Motivuje průmyslové a energetické společnosti k co nejefektivnějšímu zachycování emisí. Funguje to tak, že konkrétní společnost dostane povolenku na hodnotu kupříkladu 950 kg CO₂/MWh. Pokud tato firma produkuje méně emisí CO₂ na MWh nebo rozhodne se investovat do lepší technologie snižující emisní hodnoty. Může svoje přebytečné emisní povolenky přeprodat jiným provozovatelům, kteří překračují svoje hodnoty povolenek [49], [50].



Obr. 29 Vývoj ceny povolenek v € za tunu CO₂ v závislosti na čase [49]

Jak je patrné z Obr. 29. V minulých letech zaznamenaly ceny povolenek za tunu CO₂ značný vzestup. Nyní se hodnota pohybuje okolo 25 € za tunu CO₂. To je téměř desetinásobek hodnoty z roku 2013. I proto začíná toto téma budit širší zájem a přímo se dotýká i technologií CCS a CCU. Pokud by totiž ceny i nadále rostly. Začne být zpracování CO₂ v rámci technologií CCS a CCU finančně výhodné. Jednak kvůli případnému prodeji CO₂ jako komodity, ale také kvůli možnosti přeprodání emisních povolenek.

6.2 Pilotní projekty a návrhy technologií CCS a CCU v České republice

Na výzkumu a vývoji technologií CCS a CCU v Česku se podílí celá řada firem a institucí. Namátkou lze jmenovat Ústav Jaderného Výzkumu Řež a.s., Vysokou školu chemicko-technologickou v Praze a další. Projekty jsou finančně podporovány z tzv. Norských fondů, soukromých investic a státních peněz [44].

Metody zachycování CO₂ ze spalin jsou v různých stádiích vývoje. V podstatě jdou od papírových návrhů přes testování v laboratorních podmínkách po již vyvinuté prototypy. V České republice jsou pro zachycování prozatím uvažovány pouze absorpční způsoby separace CO₂. Je tomu tak především z důvodu nejvyšší úrovně technologického vývoje [45].

6.2.1 Elektrárna spalující hnědé uhlí

Tento modelový případ technologie CCS je pro elektrárnu spalující hnědé uhlí o hrubém elektrickém výkonu 250 MWe a spadá pod již zmiňovaný ÚJV Řež. Elektrárna pracuje s práškovým kotlem s primárními opatřeními pro odstraňování NO_x. Emisní limit pro NO_x je 200 mg/Nm³. Dále je zde parní turbína a elektrostatické odlučovače. Pro odsířování spalin je využívána mokrá vápencová metoda, kde se dosahuje hodnot odsíření pod 150 mg/Nm³. Pro odstranění CO₂ se v tomto modelu počítá s technologií čištění amoniaku [45].

Instalace CCS technologie do elektrárny má kromě odstranění značného množství CO₂ spíše negativní vlivy. Jednoznačně se zvýší **spotřeba vody**, protože čištění čpavku vyžaduje ochlazení spalin na přibližně 0 °C, čehož je docíleno vodním chlazením. Přidáním dalších

zařízení se zároveň zvýší **spotřeba elektrické energie**. Tato přídavná spotřeba je především v důsledku chlazení kompresoru, provozu kompresoru samotného, spalínového ventilátoru, napájecího čerpadla absorbéru, čerpadla chladicí vody a dalších zařízení spojených s CCS technologií. Hodnota spotřebované energie těmito zařízeními je přibližně 51 MWe. Vzrůstá taky **spotřeba páry**, protože je potřeba teplo pro regenerační procesy. Do těchto procesů patří rozklad uhličitánu amonného a dalšímu ohřevu na 120 °C. Pro tento konkrétní případ je zde pro tyto ohřevné potřeby přiváděno přibližně 20,73 kg/s. Tato hodnota je ekvivalentem snížení elektrického výkonu o 12 MWe. Při procesu čištění amoniaku vznikne větší **množství odpadní vody** a voda znečištěná amonnými solemi a kyselými sloučeninami je náročnější na čištění. V neposlední řadě se celou technologií CCS pro takovou elektrárnu zvýší **potřebný prostor**. Pro tento konkrétní případ se jedná o prostor o rozloze 28000 m² [45].

Tabulka 2 Souhrn základních parametrů elektrárny spalující hnědé uhlí s a bez amoniakové technologie CCS [45]

Parametr	Jednotka	bez CCS	s CCS
Hrubý elektrický výkon	Mwe	250	238
Spotřeba uhlí	t/h	214	214
Energie v přivedeném palivu	MWt	588	588
Základní vnitřní spotřeba	MWe	24	24
Produkce CO ₂	t/h	211	211
Zachycené CO ₂	t/h	0	190
Emise CO ₂ uvolněné do atmosféry	t/h	211	21
Vnitřní spotřeba CCS	MWe	0	51
Čistý elektrický výkon	MWe	226	163
Celková účinnost	%	38,4	27,7

Nyní bylo provedeno několik výpočtů pro ověření údajů uvedených v této diplomové práci. Výpočet kolik je potřeba přivést paliva k dosažení stejného čistého elektrického výkonu:

$$\frac{P_{el.č.}}{P_{el.č.ccs}} \cdot S_{pal} = S_{palCCS}$$

$$\frac{226}{163} \cdot 214 = 296,71 \text{ t}$$

Technologie CCS zvýší v tomto případě spotřebu paliva o 38,6 % k dosažení stejného čistého elektrického výkonu, což odpovídá rozsahu 10 až 40 % uvedeném v kapitole 5.3. Je tedy zapotřebí o 82,71 tun uhlí více, které má svoji hodnotu.

Účinnost zachycení vypočítám následovně:

$$Z_{CO_2} / P_{CO_2} \cdot 100 = E_{fe}$$

$$190 / 211 = 0,9 \cdot 100 = 90 \%$$

Jaké množství CO₂ unikne do atmosféry pro dosažení stejného čistého elektrického výkonu při instalaci CCS:

$$S_{\text{palCCS}} \cdot (1 - E_{\text{fe}}) = U_{\text{CO}_2}$$

$$296,71 \cdot (1 - 0,9) = 29,671 \text{ t}$$

To ovšem není vše, protože transport zbylého CO₂ také vyprodukuje emise. V kapitole 2.3 je uvedeno, že pro přepravení 1 Mt CO₂ je zapotřebí 40000 jízd kamionové dopravy. To ovšem neplatí pro Českou republiku, kde je nosnost legislativně omezena na 24 t [47] a počet jízd pro toto množství bude vyšší. Tento výpočet je přibližný a celková hmotnost se kamionu i s nákladem musí být 40 t.

$$S_{\text{palCCS}} \cdot E_{\text{fe}} = Z_{\text{CO}_2}$$

$$296,71 \cdot 0,9 = 267 \text{ t CO}_2$$

$$Z_{\text{CO}_2} \div N_{\text{k}} = n_{\text{j}}$$

$$267 \div 24 = 11,267$$

Pro převoz 267 t CO₂ by bylo potřeba absolvovat přibližně 11,267 jízd s plným naložením a stejný počet prázdným kamionem na cestě zpět. Z uhlíkové kalkulačky [60] je vypočítáno, že jedna jízda takto plně naloženého kamionu vyprodukuje 197,76 kg emisí CO₂.

$$197,76 \cdot \frac{16}{40} = 79,1 \text{ kg}$$

Čistě poměrovým výpočtem pro kamión o hmotnosti 16 t je vypočítána hodnota pro zpáteční cestu 79,1 kg. Množství vyprodukovaných emisí CO₂ kamionovou dopravou spočítáme následovně.

$$(P_{\text{CO}_2, \text{kn}} + P_{\text{CO}_2, \text{kp}}) \cdot n_{\text{j}} = M_{\text{kd}}$$

$$(197,76 + 79,1) \cdot 11,267 = 3,12 \text{ t}$$

Další možnosti přepravy jsou dle dostupných zdrojů v kapitole 2.3 úspornější pro emise CO₂ a potvrzují to i kalkulace v uhlíkové kalkulačce. Navíc tankery by v některých případech zcela jistě nejely zpáteční cestu prázdné. Součtem těchto emisních hodnot je 32,79 t CO₂. Tato hodnota stále nemusí být konečná, protože by pro některé způsoby dopravy musela měnit teplota a tlak CO₂, a tudíž se opět zvyšovala spotřeba energie a emise spojené s její výrobou.

6.2.2 Plynová elektrárna s kombinovaným cyklem

V systému figurují dvě plynové turbíny a jedna parní turbína a dva rekuperační parní generátory. Modelová elektrárna s kombinovaným cyklem má hrubý elektrický výkon 880 MWe a využívá technologii čištění aminů [45].

Stejně jako u předchozí technologie v kapitole 6.2.1 existuje i v tomto případě značné množství negativních vlivů pramenících z CCS technologie. Stejně jako předtím **narůstá spotřeba vody** pro potřeby chlazení, a to i přesto, že je část páry z turbíny využito pro potřeby

CCS. Pro zachycení 258 t/h CO₂ je vyžadováno 528 m³/h vody. Roste také **spotřeba elektřiny**. Velký podíl na tomto nárůstu má energeticky náročná prací technologie společně s procesy chlazení a komprese. Celkové zvýšení spotřeby elektrické energie se uvádí pro tuto elektrárnu 49,2 MWe. Zvyšuje se také množství spotřebované páry využitě pro desorpci CO₂ při teplotách 130 až 140 °C. Jedná se přibližně o 122 kg páry za sekundu, což je ekvivalentem snížení výkonu parní turbíny o 73 MWe. Situace ohledně odpadové vody je stejná jako v předchozím příkladu, tedy množství opět narůstá. Stejně jako potřeba většího prostoru pro elektrárnu s CCS technologií je zde o 20000 m² větší [45].

Tabulka 3 Souhrn základních parametrů elektrárny spalující zemní plyn s kombinovaným cyklem s a bez aminové technologie CCS [45]

Parametr	Jednotka	bez CCS	s CCS
Hrubý elektrický výkon plynové turbíny	Mwe	567,9	567,9
Hrubý elektrický výkon parní turbíny	Mwe	276,4	203,5
Celkový hrubý elektrický výkon	Mwe	844,3	771,4
Spotřeba zemního plynu	t/h	104,9	104,9
Energie v palivu	MWt	1434,4	1434,4
Základní vnitřní spotřeba	MWe	14,1	14,1
Produkce CO ₂	t/h	287,5	287,5
Zachycené CO ₂	t/h	0	258,7
Emise CO ₂ uvolněné do atmosféry	t/h	287,5	28,8
Vnitřní spotřeba CCS	MWe	0	49,2
Čistý elektrický výkon	MWe	830,2	708,1
Celková účinnost	%	57,9	49,4

6.3 Nizozemský projekt CO₂ Smart Grid

Tyto scénáře velkoplošného využití CCS (viz výpočet v kapitole 6) nemusí být pouze náhodným teoretickým výpočtem autora této diplomové práce. Důkazem toho jsou například rozsáhlé studie a projektování v Nizozemsku. Zde spolupracuje kolem dvaceti veřejných, ale i soukromých subjektů na CCU projektu pojmenovaném „the CO₂ Smart Grid“. Je to v podstatě počínající projekt při spolupráci místních pilotních projektů na zpracování CO₂, největších producentů CO₂ a případných odběratelů CO₂. Momentálně tento projekt dodává téměř 0,5 Mt CO₂ místním zahradníkům. Hlavní součástí tohoto systému je ropovodový systém nacházející se mezi Rotterdamem a Amsterdamem o délce potrubí 83 km pracující při tlakovém rozsahu 16 až 22 bar [51].

Další rozšiřující návrhy v podstatě propojují technologie CCS a CCU. Počítají s využitím obou technologií. Zachycený oxid uhličitý by byl využíván při výrobě syngasu, metanolu a výrobě biopaliv. Nadále by měl být dodáván zahrádkářům. Využití by měl mít i při výrobě stavebních materiálů a zbytek CO₂ bude uložen technologií CCS. Očekávání od vylepšení stávajícího systému dle návrhů jsou velká. Jednalo by se o roční přepravu 3,3 Mt CO₂ při tlacích 40 barů, které jsou vhodné jak pro transport, tak pro ukládání CO₂ v rámci CCS [51].



Obr. 30 Mapa Nizozemí s vyobrazenou stávající potrubní sítí pro dodávky CO₂ společně s rozšířením o několik míst dodávek a uložení [52]

7 Závěr

Ve svých úvodních kapitolách tato diplomová práce vysvětluje problematiku a základní pojmy okolo oxidu uhličitého, jako jsou koloběh uhlíku, skleníkový efekt a globální oteplování. Zároveň poukazuje na důležitost molekuly CO₂ oproti kupříkladu vodní páře, především kvůli faktorům ovlivnitelnosti těchto skleníkových plynů lidskou činností. Podle dostupných vědeckých prací, se uhlík na dnech oceánů rozkládá přibližně 20 až 200 let.

V další části se tato práce zabývá rozdělením separačních technologií CCS a CCU. Vysvětluje jejich jednotlivé výhody a nevýhody a popisuje jednotlivé typy separačních procesů společně s jejich energetickým porovnáním. V nynější situaci jsou na nejvyšším stupni vývoje absorpční metody separace. Velmi příznivě se také jeví technologie membrán tvořených organickými nanostrukturami.

Při transportu CO₂ je realisticky možné využívat pouze dva typy dopravy, a to jsou potrubní a lodní doprava. Lodní doprava je dle dostupných zdrojů nejlepší na větší vzdálenosti kolem 500 až 1000 km a disponuje jistou flexibilitou oproti dopravě potrubní. Spolu s výstavbou potrubní sítě přichází také velká investiční zátěž. Kamionová doprava se potýká s realizační, cenovou i emisní nevýhodností. To bylo také ověřeno přes uhlíkovou kalkulačku a dle zdrojů se o této možnosti dlouhodobě neuvažuje.

Samotné uložení CO₂ v geologických strukturách je nejvýhodnější v hloubkách okolo 800 až 1000 m, a to především kvůli hustotě CO₂ a jeho stabilitě. Zároveň jsou vrty do větších hloubek finančně náročnější. Dále v diplomové práci následuje popis dalších potencionálních míst pro ukládání CO₂. Co se týče ekologické zátěže uložení oxidu uhličitého, studie se často rozcházejí. Především upozorňuje na rozdílná tvrzení jednotlivých studií ohledně ekologičnosti uložení.

V kapitole 4 se práce zabývá technologiemi CCU, které mají značný komerční potenciál. Především získávání další ropných zdrojů spojené s ukládáním CO₂. Finanční rentabilita této technologie se značně mění s ohledem na aktuální cenu ropy na trhu. V práci byl proveden ukázkový výpočet. Dále se zajímavě jeví výroba paliv z CO₂, případně technologie bioreaktorů, výroba stavebnin z CO₂, technologie přímého zachycení CO₂ ze vzduchu nebo materiály zachycující CO₂ bez spotřeby energie, které při kontaktu s vodou emitují CO₂ opět do okolí.

Ekonomická část práce poukazuje na možné scénáře vývoje cen technologií CCS a CCU. Aktuální cena na přímé zachycování CO₂ ze vzduchu se pohybuje kolem 200 \$ za tunu CO₂ a jeho vynálezci slibují snížení až na 30 \$ za tunu CO₂. Dále jsou zde rozděleny průmyslové procesy podle ceny za separaci CO₂. Nejlepší cenu 10 € za separaci tuny CO₂ vykazuje zachycování při procesu fermentace, ovšem množství produkce CO₂ touto výrobou je omezené. V případě rozšíření technologie by musely být využity i jiné zdroje, u kterých cena za zachycení CO₂ postupně roste až na 100 € za tunu CO₂ (kapitola 5.1). Největší kapacitu produkce emisí CO₂ ve světě mají bodové zdroje využívající uhelného paliva. Cena za zachycení z těchto zdrojů se pohybuje okolo 33 € za tunu CO₂. Co se týká kombinované ceny za transport a uložení CO₂, zde se studie značně rozcházejí. Jedna studie [35] z roku 2006 uvádí ceny 4 až 5 \$ za tunu CO₂ v Evropě a v Severní Americe přibližně 12,5 \$ za tunu CO₂. Jiná studie [17] z roku 1997 udává cenový rozsah 20 až 55 \$ za tunu CO₂.

V otázce využití CCS a CCU bude v budoucnu hrát významnou roli vývoj cen emisních povolenek za tunu CO₂. Především kvůli značně rostoucí ceně těchto povolenek v posledních letech získávají větší pozornost. Je tedy možnost vydělat na prodeji CO₂ jako komodity a zároveň na přeprodeji emisních povolenek.

V další kapitole je řešena situace ohledně CCS v České republice. Byly určeny nejvhodnější lokality uložení společně s kapacitou uložení. Z těchto dat byla vypočtena kapacita uložení pro Českou republiku na 2917 Mt. Následně byla zvolena hodnota energetického

navýšení spotřeby bodových zdrojů kvůli zavedení CCS z rozsahu 10 až 40 % na 25 % a vypočítána průměrná roční produkce těchto zdrojů na 123,75 Mt. V celku zarážející je, že by kapacity uložišť vystačily pouze na 23,6 let.

V poslední části jsou uvedeny návrhy CCS pro stávající elektrárny navržené odborníky z praxe. Na těchto návrzích byly ověřeny některé údaje uvedené v této práci. Jednoznačně lze konstatovat, že instalací CCS se zvyšují energetické nároky, spotřeba vody, spotřeba páry, potřebný zastavěný prostor elektrárny a množství odpadní vody, která je ještě náročnější na čištění. U návrhu elektrárny o elektrickém výkonu 250 MWe bylo vypočítáno, že se spotřeba uhlí s instalací CCS navýší o 38,6 %. To koreluje s uvedeným rozsahem 10 až 40 % navýšení spotřeby. Účinnost zachycení CO₂ byla dle uváděných hodnot vypočtena na 90 %. Tato hodnota může být ovšem zavádějící, proto byly vypočteny emise CO₂ při přepravě CO₂ k uložení vznikající kamionovou dopravou, která emituje největší množství CO₂. Také byly vypočteny emise pro ekvivalentní výstupní čistý elektrický výkon s i bez CCS. Z původních 21 tun CO₂ uvolněných do atmosféry se zavedenou technologií CCS vzniklo přepočtem na stejný výstupní čistý elektrický oproti elektrárně bez CCS společně s emisemi kamionové dopravy CO₂ 32,79 t emisí CO₂. Je nutné brát tuto technologii, jejíž primární účel je zachycení CO₂ z širší perspektivy, protože bez CCS není nutná žádná přeprava CO₂.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [Zotero]

- [1] MELILLO, J.M., T.V. CALLAGHAN a F.I. WOODWARD, 1990. Climate Change: The IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press.
- [2] ALMQVIST, Ebbe, 2003. History of Industrial Gases [online]. B.m.: Springer US [vid. 2020-05-06]. ISBN 978-0-306-47277-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4615-0197-8
- [3] ANON., 2009. Skleníkový efekt - Meteocentrum.cz [online] [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.meteocentrum.cz/zajimavosti/globalni-oteplovani/sklenikovy-efekt>
- [4] LINDZEN, R. S., 1991. Water vapour: feedback or forcing? RealClimate [online]. [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2005/04/water-vapour-feedback-or-forcing/>
- [5] ORGANIZATION (WMO), World Meteorological a WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), 2017. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No. 13 : The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016. Geneva: WMO. ISBN ISSN 2078-0796.
- [6] PONTZER, H., 2012. Overview of Hominin Evolution. Nature Education Knowledge [online]. 3(10). Dostupné z: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/overview-of-hominin-evolution-89010983/?fbclid=IwAR26psUzCKrxfDg12BsMjyoFzvyc6wpAbBkCK0ytIJQCI22mXwacnvKpc7A>
- [7] MARKEWITZ, Peter, Wilhelm KUCKSHINRICHS, Walter LEITNER, Jochen LINSSEN, Petra ZAPP, Richard BONGARTZ, Andrea SCHREIBER a Thomas E. MÜLLER, 2012. Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂. Energy & Environmental Science [online]. B.m.: The Royal Society of Chemistry, 5(6), 7281–7305. ISSN 1754-5706. Dostupné z: doi:10.1039/C2EE03403D
- [8] CUÉLLAR-FRANCA, Rosa M. a Adisa AZAPAGIC, 2015. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. Journal of CO₂ Utilization [online]. 9, 82–102. ISSN 2212-9820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcou.2014.12.001
- [9] NEWELL, Richard a Soren ANDERSON, 2003. Discussion Papers: Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies [online]. dp-02-68. B.m.: Resources For the Future [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://ideas.repec.org/p/rff/dpaper/dp-02-68.html>
- [10] STEHLÍK, 2013. 2. Sloučeniny dusíku [online] [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/sci/UChem/um/spchp/ch09s02.html>
- [11] KOHL, L. a Richard B. NIELSEN, 1997. Gas Purification [online]. B.m.: Elsevier [vid. 2020-05-06]. ISBN 978-0-88415-220-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-88415-220-0.X5000-9

- [12] BURR, Barry a Lili G. LYDDON, 2008. A COMPARISON OF PHYSICAL SOLVENTS FOR ACID GAS REMOVAL. In: [online]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-COMPARISON-OF-PHYSICAL-SOLVENTS-FOR-ACID-GAS-Burr-Lyddon/02a69d76747ddb2513ad43249c823dd620c57bac>
- [13] KOVÁŘ, M.: ODSTRAŇOVÁNÍ CO₂ Z BIOPLYNU, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Dvořák, Ph.D.
- [14] GAO, Xue, Xiaoqin ZOU, Heping MA, Shuang MENG a Guangshan ZHU, 2014. Highly Selective and Permeable Porous Organic Framework Membrane for CO₂ Capture. *Advanced Materials* [online]. 26(22), 3644–3648. ISSN 1521-4095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201400020
- [15] METZ, Bert, Ogunlade DAVIDSON, Heleen de CONINCK, Manuela LOOS a Leo MEYER, 2005. 6 Ocean Storage. In: *Carbon Dioxide Capture and Storage — IPCC* [online]. Cambridge CB2 2RU ENGLAND: Cambridge University Press, UK, s. 431 [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>
- [16] NAKASHIKI, N., T. OHSUMI a N. KATANO, 1995. Technical View on CO₂ Transportation onto the Deep Ocean Floor and Dispersion at Intermediate Depths. In: *Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide* [online]. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), s. 183–193. Dostupné z: <https://www.terrapub.co.jp/e-library/dod/pdf/0183.pdf>
- [17] METZ, Bert, Ogunlade DAVIDSON, Heleen de CONINCK, Manuela LOOS a Leo MEYER, 2005b. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [online]. 40 West 20th Street, New York, NY 10011–4211, USA: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. ISBN ISBN-13 978-0-521-86643-9. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
- [18] ALFREDSSON, H. A., D. WOLFF-BOENISCH a A. STEFÁNSSON, 2011. CO₂ sequestration in basaltic rocks in Iceland: Development of a piston-type downhole sampler for CO₂ rich fluids and tracers. *Energy Procedia* [online]. 4, 10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 3510–3517. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2011.02.278
- [19] VIJAYAN, D. S., DINESHKUMAR, S. ARVINDAN a Thattil SHREELAKSHMI JANARTHANAN, 2020. Evaluation of ferrock: A greener substitute to cement. *Materials Today: Proceedings* [online]. 22, International Conference on Materials Engineering and Characterization 2019, 781–787. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.10.147
- [20] LANUZA, Alejandro, Ashik Thithira ACHAI AH, John BELLO a Thomas DONOVAN, 2017. Ferrock: A Life Cycle Comparison to Ordinary Portland Cement [online]. (11). Dostupné z: <http://ironkast.com/wp-content/uploads/2017/11/USC-Ferrock-Final-Paper-4.24.17.pdf>
- [21] ANON., 2010. Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery [online]. 2010. Dostupné z: https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/CO2_EOR_Primer

- [22] CLEMENS, Torsten a Krijn WIT, 2002. CO₂ Enhanced Gas Recovery Studied for an Example Gas Reservoir. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition [online]. B.m.: Society of Petroleum Engineers [vid. 2020-05-06]. ISBN 978-1-55563-153-6. Dostupné z: doi:10.2118/77348-MS
- [23] VOBECKÁ, Kateřina, 2012. BIOPALIVA Z VODNÍCH ŘAS [online]. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. b.n. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/46361/BPTX_2010_1__0_263672_0_96901.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [24] GRIMA, E Molina, E. -H BELARBI, F. G ACIÉN FERNÁNDEZ, A ROBLES MEDINA a Yusuf CHISTI, 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances* [online]. 20(7), 491–515. ISSN 0734-9750. Dostupné z: doi:10.1016/S0734-9750(02)00050-2
- [25] CHRISTENSON, Logan a Ronald SIMS, 2011. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances* [online]. 29(6), 686–702. ISSN 1873-1899. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2011.05.015
- [26] XU, Gang, Feifei LIANG, Yongping YANG, Yue HU, Kai ZHANG a Wenyi LIU, 2014. An Improved CO₂ Separation and Purification System Based on Cryogenic Separation and Distillation Theory. *Energies* [online]. B.m.: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 7(5), 3484–3502. Dostupné z: doi:10.3390/en7053484
- [27] PŘIDAL, Jaroslav, 1999. SEPARAČNÍ MEMBRÁNY A JEJICH PRŮMYSLOVÉ POUŽITÍ - DNEŠNÍ TRENDY A VYBRANÉ MODERNÍ APLIKACE. *Chemické Listy*. 432–440.
- [28] VIJAČKA, Jan, 2015. Aplikace adsorpce za měnícího se tlaku (PSA) na dělení směsi plynů [online]. VŠB - Technická univerzita Ostrava. b.n. Dostupné z: http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109006/VIJ0002_FMMI_N3909_2807T004_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [29] FASIHI, Mahdi, Olga EFIMOVA a Christian BREYER, 2019. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production* [online]. 224, 957–980. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.086
- [30] WANG, Tao, Klaus S. LACKNER a Allen WRIGHT, 2011. Moisture Swing Sorbent for Carbon Dioxide Capture from Ambient Air. *Environmental Science & Technology* [online]. B.m.: American Chemical Society, 45(15), 6670–6675. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es201180v
- [31] LACKNER, K.S., 2009. Capture of carbon dioxide from ambient air. *The European Physical Journal Special Topics* [online]. 176(1), 93–106. ISSN 1951-6401. Dostupné z: doi:10.1140/epjst/e2009-01150-3
- [32] CEULEMANS, R., X. N. JIANG a B. Y. SHAO, 1995. Effects of Elevated Atmospheric CO₂ on Growth, Biomass Production and Nitrogen Allocation of Two Populus Clones. *Journal of Biogeography* [online]. B.m.: Wiley, 22(2/3), 261–268. ISSN 0305-0270. Dostupné z: doi:10.2307/2845920

- [33] WORLD BANK GROUP, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2019. Forest area (% of land area) | Data [online] [vid. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS>
- [34] NAIMS, Henriette, 2016. Economics of carbon dioxide capture and utilization—a supply and demand perspective. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 23(22), 22226–22241. ISSN 1614-7499. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-016-6810-2
- [35] DAVISON, John, 2007. Performance and costs of power plants with capture and storage of CO₂. *Energy* [online]. 32(7), 1163–1176. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2006.07.039
- [36] PÉREZ-FORTES, Mar, Andrei BOCIN-DUMITRIU a Evangelos TZIMAS, 2014. CO₂ Utilization Pathways: Techno-Economic Assessment and Market Opportunities. *Energy Procedia* [online]. 63, 12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-12, 7968–7975. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.11.834
- [37] HAVRÁNKOVÁ, Eva, 2011. Odpady obsahující uhlík jako alternativa biomasy – obnovitelného surovinového zdroje pro chemický průmysl [online]. Brno [vid. 2020-06-25]. Masarykova univerzita. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/y9oob/Bc_Havrankova_Eva_fin3.txt
- [38] WILDENBORD, Ton, Sam HOLLOWAY, Chris HENDRIKS, Eric KREFT, Ad LOKHORST, Michele BROOK, Ruut BRANDSMA, Paul EGBERTS a Michael LARSEN, 2005. *Building the cost curves for CO₂ storage: European sector* [online]. 2005. Dostupné z: <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/95736/building-cost-curves-co2-storage-european-sector.pdf>
- [39] ROUSSANALY, Simon, 2019. Calculating CO₂ avoidance costs of Carbon Capture and Storage from industry. *Carbon Management* [online]. B.m.: Taylor & Francis, 10(1), 105–112. ISSN 1758-3004. Dostupné z: doi:10.1080/17583004.2018.1553435
- [40] KHOO, Hsien H. a Reginald B. H. TAN, 2006. Life Cycle Investigation of CO₂ Recovery and Sequestration. *Environmental Science & Technology* [online]. B.m.: American Chemical Society, 40(12), 4016–4024. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es051882a
- [41] ZÁMYSLICKÝ, Pavel, Kateřina SUCHÁ a Zdeněk BIDRMAN, 2017. *Politika ochrany klimatu v ČR* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí. ISBN 978-80-7212-625-5. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/\\$FILE/OEOK_POKMS_20180105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/$FILE/OEOK_POKMS_20180105.pdf)
- [42] ŠLIAUPA, Saulius, Richard LOJKA, Zuzana TASÁRYOVÁ, Vladimír KOLEJKA, Vit HLADÍK, Julia KOTULOVÁ, Ludovít KUCHARIČ, Vladimír FEJDI, Adam WÓJCICKI, Radosław TARKOWSKI, Barbara ULIASZ-MISIAK, Rasa ŠLIAUPIENĖ, Inara NULLE, Raisa POMERANCEVA, Olga IVANOVA, Alla SHOGENOVA a Khasbulat SHOGENOV, 2013. CO₂ storage potential of sedimentary basins of Slovakia, the Czech Republic, Poland and the Baltic States.

- Geological Quarterly* [online]. **57**(2), 219–232, doi: 10.7306/gq.1088. ISSN 1641-7291. Dostupné z: doi:10.7306/gq.1088
- [43] ANON., 2020. *Fakta o klimatu: emise* [online]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/temata/emise/>
- [44] POLÁČKOVÁ, Jana, Jana PETRŮ a Jan BERKA, 2015. PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO VYSOKOTEPLOTNÍ EXPOZICE MATERIÁLŮ TECHNOLOGIÍ CCS. *Paliva*. **7**(4), 100–104.
- [45] PILAŘ, Lukáš, Pavel SLOUKA a Jan HRDLIČKA, 2013. CCS TECHNOLOGY ISSUES IN CONDITIONS IN THE CZECH REPUBLIC. *The Holistic Approach to Environment*. **4**(2), 83–89.
- [46] MŽP ČR, 2016. *Pařížská dohoda* [online] [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda
- [47] ŘSDP, 2010. *Limitní hodnoty podle vyhlášky č. 341/2002 Sb., o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích* [online]. 2010. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-341#cast2>
- [48] BAXTER, Larry, Andrew BAXTER a Stephanie BURT, 2009. Cryogenic CO2 Capture as a Cost-Effective CO2 Capture Process. *ResearchGate* [online]. [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/264875049_Cryogenic_CO2_Capture_as_a_Cost-Effective_CO2_Capture_Process
- [49] WOFF, Petr, 2020. Emisní povolenky stojí 25 eur/tCO2: Jak na nich vydělat? *Ceny energie* [online] [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.cenyenergie.cz/emisni-povolenky-cena-burza/>
- [50] MŽP ČR, 2008. Emisní obchodování. *Emisní obchodování - Ministerstvo životního prostředí* [online] [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/emisni_obchodovani
- [51] BLOM, Martijn, Diederik JASPERS a Thomas HUIGEN, 2018. *SCBA of CCU Smart Grid* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.bloc.nl/app/assets/bloc-co2-smart-grid-mkba-en.pdf>
- [52] ROS, Menno, Andy READ, Jan UILENREEF a Jacob LIMBEEK, 2014. Start of a CO2 Hub in Rotterdam: Connecting CCS and CCU. *Energy Procedia* [online]. **63**, 12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-12, 2691–2701. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.11.291
- [53] HUMBOLDT SEED ORGANIZATION, 2018. *How does CO2 affect your cannabis grow?* [online] [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.humboldtseeds.net/en/blog/co2-affect-cannabis/>
- [54] SMITH, Oliver, 2017. Globální Oteplování. *Storyboard That* [online] [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.storyboardthat.com/cs/storyboards/cs-examples/globalni-oteplovani>
- [55] WMO, 2017. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016. *GREENHOUSE GAS BULLETIN* [online]. (13). Dostupné z: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4022

- [56] KOUDELKOVÁ, Jaroslava a Pavel PROKOP, 2005. Snižování emisí CO₂ a jeho využití ukládáním do podzemí. *Acta Montanistica Slovaca*. **10**(1), 224–227.
- [57] REDAKCE NAZELENO.CZ, 2009. *Carbon Capture & Storage (CCS)* [online]. [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/carbon-capture-storage-ccs-jak-se-zbavit-co2-ulozit-do-zeme.aspx/2/>
- [58] CLIMATE CHANGE TRUST, 2019. *CARBON CAPTURE AND STORAGE* [online] [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: http://www.change-climate.com/Carbon_Capture_And_Storage.htm
- [59] ANON., 2009. *Bioreactor principle* [online] [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Bioreactor_principle.svg
- [60] HNUTÍ DUHA, 2016. Uhlíková kalkulačka. *Hnutí DUHA* [online] [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://hnutiduha.cz/temata/uhlikova-kalkulacka-0>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	jednotka
N_k	Nosnost kamionu	t
n_j	Počet jízd	
CCS_{cap}	Kapacita uložišť CCS	Mt
D	Doba do naplnění uložště CO ₂	rok
n_{CCS}	Procentuální navýšení spotřeby paliva kvůli CCS	
P_{CO2/rok}	Produkce CO ₂ za rok	Mt/rok
P_{el.č.}	Čistý elektrický výkon	MWe
P_{el.č.ccs}	Čistý elektrický výkon s CCS	MWe
S_{pal}	Spotřeba uhlí	t/h
S_{palCCS}	Spotřeba uhlí s CCS k dosažení stejného výstupního čistého el. výkonu	t
Z_{CO2}	Zachycené CO ₂	t
P_{CO2}	Vyprodukované CO ₂	t
E_{fe}	Účinnost zachycení	%
U_{CO2}	Množství uniklého CO ₂ do atmosféry s CCS při dosažení stejného čistého elektrického výkonu	t
P_{CO2, kn}	Produkce emisí plně naloženého kamionu na 100 km	t
P_{CO2, kp}	Produkce emisí plně prázdného kamionu na 100 km	t
M_{kd}	Celkové množství emisí za dopravu kamionem	t
ÚJV	Ústav Jaderného Výzkumu	
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	
DAC	Direct air capture	
EOR	Enhanced oil recovery	
CCS	Carbon capture and storage	
CCU	Carbon capture and utilization	
E290	Oxid uhličitý v potravinářství	
PSA	Pressure swing adsorption	
TSA	Temperature swing adsorption	
t_{CO2}	Množství vyprodukovaných emisí CO ₂ elektrárnou bez CCS na MWh	t/MWh
t_{CO2CCS}	Množství vyprodukovaných emisí elektrárnou s CCS CO ₂ na MWh	t/MWh
HDP	Hrubý domácí produkt	Měna
Ce_{CCS}	Cena spotřebované energie elektrárnou s CCS	Měna
Ce	Cena spotřebované energie elektrárnou bez CCS	Měna

I	Investiční náklady	Měna
d	Průměr trubek	m
L	Délka potrubí	m

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: Strukturální vzorec oxidu uhličitého [53]
Obr. 2 Skleníkový efekt [54]
Obr. 3: Historický vývoj koncentrace CO₂ v atmosféře [55]
Obr. 4 Vývoj procentuálního zalesnění planety v závislosti na čase [33]
Obr. 5 Koloběh uhlíku na Zemi, demonstrace procesů výměny uhlíku v gigatunách [56]
Obr. 6 Rozdělení možností technologií CCU a CCS; nachází se zde nejčastější zdroje oxidu uhličitého, následně možnosti zachycení a jejich jednotlivé technologie a rozdělení končí možnostmi uložení a využití [8]
Obr. 7 Zjednodušené schéma procesu pro regeneraci CO₂ ze spalin chemickou absorpcí [17]
Obr. 8 Demonstrativní obrázek zapojení separační jednotky pro rozklad vzduchu s dalšími zařízeními v systému spalování paliva s čistým kyslíkem pro zachycení CO₂ [57]
Obr. 9 Zjednodušené schéma procesu selexol [13],[12]
Obr. 10 Porézní organická membrána s ukázkou struktury a značky PSF matrixu [14]
Obr. 12 Zjednodušené schéma kryogenní technologie [48]
Obr. 13 Závislost hloubky uložení v kilometrech na hustotě CO₂ [17]
Obr. 14 Ukázka hlavních bodů při uložení CO₂ na dně oceánu [58]
Obr. 15 Jednoduchý náčrt lodí k rozptylování CO₂ v moři [16]
Obr. 16 Možnosti geologického uložení CO₂ s měřítkem přibližných hloubek jednotlivých typů uložení [17]
Obr. 17 Jednoduché schéma bioreaktoru [59]
Obr. 18 Ilustrativní obrázek přídavného ropného získávání při využití injektáže CO₂, kde jeden vrt slouží k vstřikovávání CO₂ a druhý k těžbě ropy; dole lze vidět, jak probíhá mísení CO₂ s ropou a vodou [17], [21]
Obr. 19 Jednoduché schéma výroby metanolu [36]
Obr. 20 Pevnost betonu v tlaku v závislosti na procentu přidaného ferrocku a době tvrdnutí [19]
Obr. 21 Absorpční proces přímého zachycení CO₂ ze vzduchu využívající vysokých teplot [29]
Obr. 22 Chemické procesy probíhající při kontaktu suchého materiálu s vlhkostí [30]
Obr. 23 Měřítko nákladů za zachycení CO₂ z jednotlivých bodových zdrojů společně s množstvím světových emisí CO₂ vyprodukovaných jednotlivými procesy [34]
Obr. 24 Místní pohled grafu v Obr. 23 Měřítko nákladů za zachycení CO₂ z jednotlivých bodových zdrojů společně s množstvím světových emisí CO₂ vyprodukovaných jednotlivými procesy [34]
Obr. 25 Grafické srovnání vyprodukovaného CO₂ elektrárnou s CCS oproti stejné elektrárně bez CCS a znázornění kolik CCS z produkovaného množství CO₂ zachytí [17]
Obr. 26 Vývoj produkce emisí CO₂ vybranými odvětvími v České republice v čase [41]
Obr. 28 Graf emisí CO₂ v poměru k hrubému domácímu produktu (HDP) jednotlivých zemí, úplně vpravo je hodnota světového průměru [43]
Obr. 29 Vývoj ceny povolenek v € za tunu CO₂ v závislosti na čase [49]
Obr. 30 Mapa Nizozemí s vyobrazenou stávající potrubní sítí pro dodávky CO₂ společně s rozšířením o několik míst dodávek a uložení [52]

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Shrnutí tlakově hnaných membrán [27]

Tabulka 2 Souhrn základních parametrů elektrárny spalující hnědé uhlí s a bez amoniakové technologie CCS [45]

Tabulka 3 Souhrn základních parametrů elektrárny spalující zemní plyn s kombinovaným cyklem s a bez aminové technologie CCS [45]