



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ZACHYTÁVÁNÍ A UKLÁDÁNÍ CO₂

SEPARATION AND STORAGE OF CO₂

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN ODLOŽILÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Odložilík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Zachytávání a ukládání CO₂

v anglickém jazyce:

Separation and storage of CO₂

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je odborná řešerše o problematice zachytávání a skladování skleníkového plynu CO₂.

Cíle bakalářské práce:

1. Představte jev označovaný jako skleníkový efekt, uveďte nejvýznamnější skleníkové plyny a jejich podíl na skleníkovém efektu.
2. Popište možné způsoby separace CO₂ produkovaného spalovacími procesy.
3. Uveďte možnosti dlouhodobého ukládání CO₂.

Seznam odborné literatury:

R. G. Watts: Innovative energy strategies for CO2 stabilization, 2002

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 30.10.2009

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce je objasnění metod zachytávání a ukládání CO₂ jako jedné z možností omezení globálního oteplování. V první části je podrobněji rozebrán jev označovaný jako skleníkový efekt, je popsán jeho princip, účinky na klimatické změny, hlavní faktory zvyšující jeho intenzitu a jejich možné snižování. Kostrou druhé části je popis technologií a metod zachytávání a ukládání CO₂, jednotlivé kroky těchto procesů a v neposlední řadě také možný vývoj do budoucna. Další kapitola pojednává o pilotních výzkumných programech a aplikaci zmíněných technologií v praxi. Poslední část této práce je věnována ekonomické stránce řešené problematiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Skleníkový efekt, globální oteplování, oxid uhličitý, fosilní paliva, emise CO₂, zachytávání a ukládání CO₂

ABSTRACT

The main objective of this work is to clarify the methods for CO₂ capture and storage as an option to limit global warming. The first part is further explained by a phenomenon known as the greenhouse effect, there is illustrated his principle, the effects of climate change, the main factors increasing its intensity and its possible reduction. Framework of the second part is description of the technologies and methods of CO₂ capture and storage, the individual steps in these processes and also the possible development in the future. Next chapter discusses the pilot research programs and application of referred technologies to in practice. The last part of this work is devoted to the economical aspect of the problems.

KEY WORDS

The greenhouse effect, the global warming, carbon dioxide, fossil fuel, emissions of CO₂, capture and storage of CO₂

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ODLOŽILÍK, M. *Zachytávání a ukládání CO₂*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 30 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Zachytávání a ukládání CO₂“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 26.5.2010

.....
Martin Odložilík

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi za jeho cenné rady, vstřícný přístup, podporu a čas, který mi věnoval v průběhu vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Bibliografická citace	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	8
1. Skleníkový efekt	9
1.1. Podstata skleníkového efektu	9
1.2. Skleníkové plyny	10
1.2.1. Oxid uhličitý	10
1.2.2. Metan	11
1.2.3. Oxid dusný	11
1.2.4. Další plyny	11
1.3. Snižování koncentrace skleníkových plynů	12
2. Zachytávání a ukládání CO ₂	13
2.1. Odloučení a zachycení	13
2.1.1. Technologie separace CO ₂ ze spalín	13
2.1.1.1. Chemické pohlcení	14
2.1.1.2. Fyzikální pohlcení	14
2.1.1.3. Adsorpce	15
2.1.1.4. Nízkoteplotní zpracování	15
2.1.1.5. Membránová separace	15
2.1.2. Postupy separace CO ₂ pro energetiku	16
2.1.2.1. Postup post-combustion	16
2.1.2.2. Postup pre-combustion	18
2.1.2.3. Postup Oxyfuel	19
2.2. Transport	21
2.3. Ukládání	22
2.3.1. Ukládání v geologických strukturách	22
2.3.2. Minerální sklad	23
2.3.3. Podmořský sklad	23
3. Současné projekty využívající technologie CCS	24
3.1. Využití technologie MEA	24
3.2. Využití postupu post-combustion	24
3.3. Využití postupu Oxyfuel	24
3.4. Uložiště CO ₂	25
4. Ekonomické faktory	27
Závěr	28
Seznam použitých pramenů	29
Seznam použitých zkratk a symbolů	30

ÚVOD

Technický pokrok lidstva jde ruku v ruce s novými úskalími a problémy souvisejícími s nežádoucími účinky různých procesů. V současné době je velmi znepokojující dopad na životní prostředí. Lidská činnost zasahuje významnou měrou do ekosystému celé planety a působí mnohdy nevratné škody. Proto zde existuje stále aktuálnější tendence vyvarovat se možným škodám na Zemi, které by mohly mít v konečném důsledku katastrofální dopady.

Jedním z největších problémů současnosti je globální oteplování. Vědci s různým polem působnosti nás neustále varují před možnými riziky globálního oteplování, s nímž úzce souvisí právě skleníkový efekt.

V posledních sto letech se podle průzkumů zvyšuje průměrná roční teplota rychleji než kdykoliv dříve, stejně tak jako koncentrace některých plynů. To vedlo k rozsáhlému bádání v této oblasti a dnes již téměř nikdo nepochybuje o spojitosti mezi globálním oteplováním a složením plynů v atmosféře. Obavy z možných následků globálního oteplování přiměly mnohé státy ke snaze tomuto jevu zamezit. V současnosti existuje množství opatření, které mají skleníkový efekt zmírnit, nicméně s rostoucím počtem obyvatel a vlivem celosvětové industrializace nejsou tato opatření dostačující. To vede k vývoji nových technologií, které by měly být k životnímu prostředí šetrnější než ty stávající.

Jednou z nich je i proces zachytávání a ukládání CO₂. Někteří odborníci si od něj hodně slibují a snaží se zajistit co nejlepší podmínky pro jeho budoucí rozvoj a aplikaci na největší průmyslové znečišťovatele. Jedná se však o dosti progresivní metodu, která by neměla být schválena bez dostatečného uvážení. Proto je současný vývoj zaměřen jednak na optimalizaci těchto technologií, ale především má demonstrovat spolehlivost a bezpečnost procesu zachytávání a ukládání v reálných podmínkách.

1. SKLENÍKOVÝ EFEKT

1.1. Podstata skleníkového efektu

V zásadě jde o problém kumulace tepla v atmosféře. Skleníkový efekt se přirozeně vyskytuje v zemské atmosféře. Pomáhá udržovat teplotu na zemi v přijatelných mezích. Je to velmi komplikovaný děj, na kterém se podílí spousta dalších procesů.

Slunce vyzařuje velké množství energie, z níž jen malou část přijme Země. Základní rovnicí radiace (sálání) této energie vyjadřuje Planckův zákon, jehož rovnice je:

$$q_{0,\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1}. \text{ Ten vyjadřuje sálavost dokonalého tělesa. Tuhá tělesa však na rozdíl od plynů}$$

vyzařují ve spojitém spektru, proto lze zavést integrál $q_0 = \int_0^{\infty} q_{0,\lambda} \cdot d\lambda$, který vyjadřuje

celkovou sálavost tělesa. Celkovou sálavost tzv. dokonale černého tělesa proto můžeme vyjádřit pomocí vztahu $q_0 = \sigma_0 \cdot T^4$, který nazýváme Stefan-Boltzmanův zákon. Pro nedokonale černá tělesa (což jsou vlastně všechna tělesa) je pak intenzita sálání menší: $\sigma = \varepsilon \cdot \sigma_0$. Vlnovou délku, při níž je spektrální sálavost největší udává Wienův zákon: $\lambda_{\max} \cdot T = c_3$.

Z uvedených vztahů je patrné, že intenzita sálání se velmi rychle zvyšuje s rostoucí teplotou. Ale i přesto, že poměrná sálavost Slunce je 0,26, by byla intenzita jeho záření příliš vysoká. Snížení intenzity slunečního záření (na povrchové vrstvy atmosféry dopadá v kolmém směru v množství $1367 \text{ W/m}^2 = \text{solární konstanta}$) má na svědomí jeho rozptyl, pohlcení a odražení.

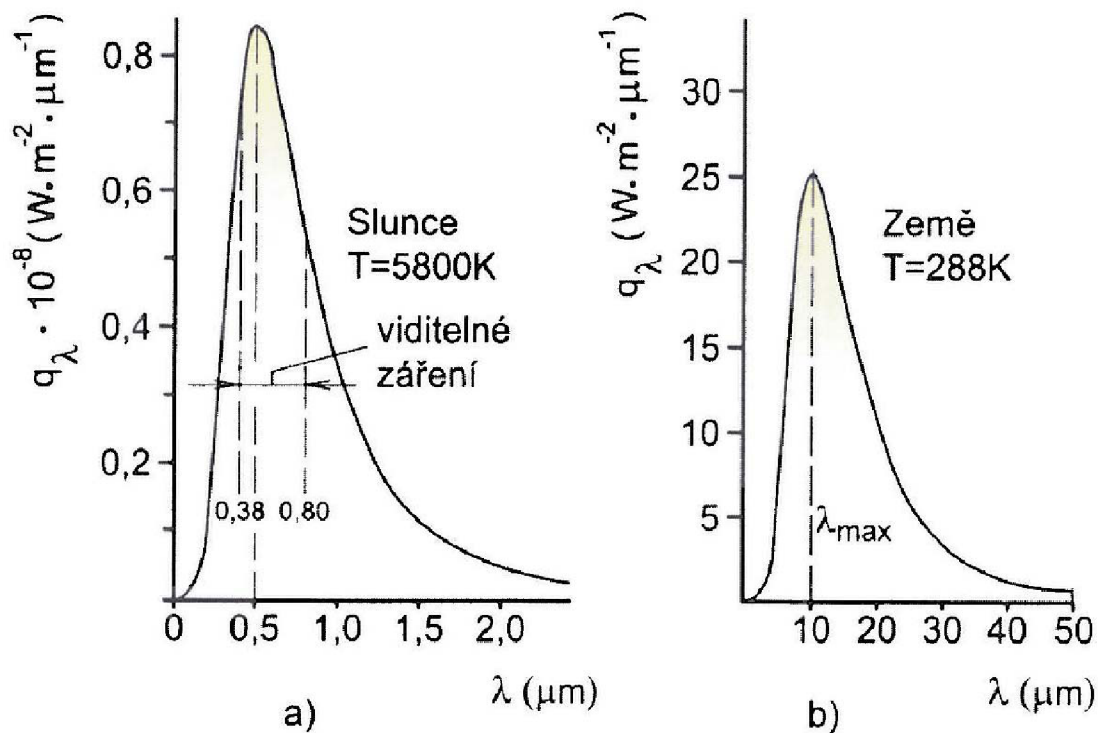
Asi 26 % tohoto záření se od mraků odrazí, dalších 19 % pohltí mraky, plyny a další složky v atmosféře a zbylých 55 % dopadá na povrch Země. Zemský povrch také v určité míře toto záření odrazí. Odražené množství záření závisí na jeho charakteru, ale celkové množství odraženého záření nepřesáhne 4%. Zbylých 51% slunečního záření se využije k ohřevu zemského povrchu, fotosyntéze rostlin, tání ledu a sněhu a také k vypařování vody. Zemský povrch potom tuto přijatou energii vyzařuje stejně jako Slunce, ale v podstatně vyšších vlnových délkách, jak se můžeme přesvědčit na obrázku nebo pomocí výpočtu z Wienova zákona. Toto záření je nazýváno jako tepelné nebo též difuzní záření.

Další difuzní záření se dostává do atmosféry po rozptylu z mraků. Jak bylo řečeno, zmenšení tepelného toku dopadajícího na Zem je způsobeno především rozptylem, ten je však největší u menších vlnových délek. Při větších vlnových délkách hraje jen nepatrnou roli a rozhoduje především pohlcování.

Plyny vyzařují a pohlcují energii jen v určitých intervalech vlnových délek. Zatímco při menších vlnových délkách je většina plynů v atmosféře průteplivých (proto nejsou schopny zachytit krátkovlnné záření dopadající ze Slunce), při větších vlnových délkách začínají teplo pohlcovat. To potom vyzařují (na rozdíl od pevných látek) z celého svého objemu. Množství takto pohlceného tepla je dáno teplotou, objemem a koncentrací plynu. Většina plynů má jen nepatrnou schopnost pohlcovat a vyzařovat teplo. Některé tři a víceatomové plyny však mají značnou schopnost energii pohlcovat a následně sálat.

Díky skleníkovému efektu přes 90 % globálního tepla (tzn. součtu difuzních tepel) v podobě dlouhých vln dopadá zpět na povrch. S přibývajícím množstvím skleníkových

plynů, které brání odchodu tepelného záření z atmosféry, proto roste průměrná teplota na Zemi. Tento skleníkový efekt se projevuje nejvíce v oblastech s nízkou povrchovou teplotou, protože ten vyzařuje nejdelší vlny, které jsou pak zpětně nejsnáze zachyceny skleníkovými plyny. Proto nemůžeme brát v úvahu jen průměrnou teplotu, ale musíme svou pozornost zaměřit především na vysokohorská místa a oblasti v okolí pólů, která jsou skleníkovým efektem již v současné době velmi značně postižena.



Obr.1: Srovnání spektrální sálavosti a) Slunce a b) Země [2]

1.2. Skleníkové plyny

1.2.1. Oxid uhličitý

Je to životně důležitý plyn, který se v atmosféře vyskytuje zcela přirozeně. Problémem ovšem je, že jeho koncentrace neustále rapidně stoupá. Za posledních 150 let se jeho množství v atmosféře zvýšilo z 280 ppm až na 383 ppm (naměřeno v roce 2007). Tento plyn má však na skleníkovém efektu největší podíl a to až z 82 %. Emise ze spalování fosilních paliv odpovídají asi za 65 % vzrůstu jeho podílu v atmosféře, zbylých 35% je přímo závislých na odlesňování a konverzi krajiny především na zemědělské ekosystémy. Přitom přírodní ekosystémy jsou schopny přeměnit nespočetně více CO_2 než ty uměle vytvořené.

1.2.2. Metan

Metan je druhým nejdůležitějším plynem podílejícím se na skleníkovém efektu, a proto jsou na předním místě také výzkumy jeho zdrojů. Zvyšující se koncentrace metanu v atmosféře je způsobena především přirozenou a zemědělskou produkcí, skladováním odpadu a těžbou.

1.2.3. Oxid dusný

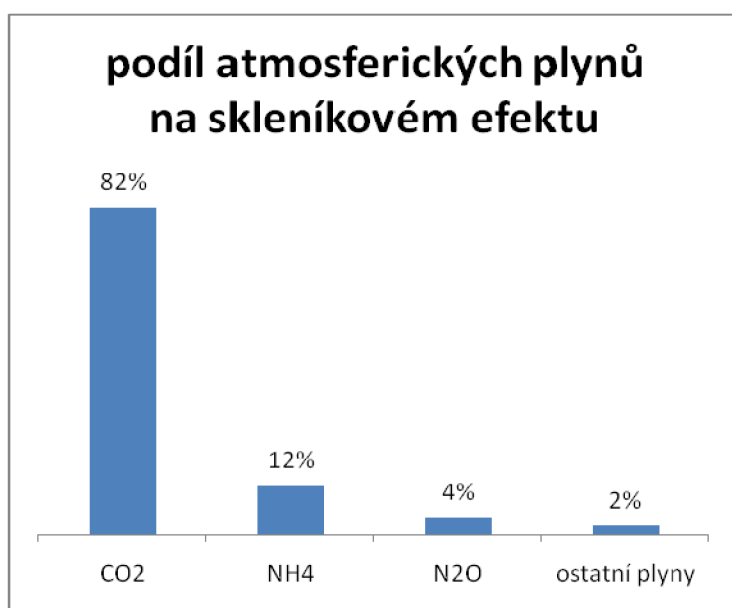
Antropogenní zdroje N_2O nejsou příliš známé. Je však evidentní, že od začátku průmyslové éry, a v posledních letech především, jeho koncentrace v ovzduší prudce stoupá. Odhadovanými zdroji jsou chemický průmysl a zemědělství.

1.2.4. Další plyny

Zde patří jednak plyny, které se bezprostředně podílejí na skleníkovém efektu, a to ozón a freony. Ale také plyny, které se na skleníkovém jevu přímo nepodílejí, zato různými chemickými reakcemi v ovzduší mohou skleníkové plyny vytvářet. Mezi ně patří především CO, který se může přeměnit na CO_2 .

Uměle vytvořené freony jsou nejsilnější skleníkové plyny. Avšak nízké koncentrace v atmosféře redukuje jejich význam ve zvětšování skleníkového efektu. Mnohem větší škody napáchají na ozónové vrstvě. Z toho důvodu jsou v posledních letech poměrně přísně limitovány.

Ozón se v přírodě vyskytuje ve třech sférách. Proto rozlišujeme endogenní, stratosférický a troposférický ozón. Z hlediska skleníkového efektu nás zajímá především ten troposférický, který se nachází v nízkých částech atmosféry a to zejména ve fotochemickém smogu, který jednak působí jako skleníkový plyn ale hlavně jde o prudký jed na rostliny. Například v USA jsou jím způsobené škody na rostlinách odhadovány na 3 miliardy dolarů ročně.



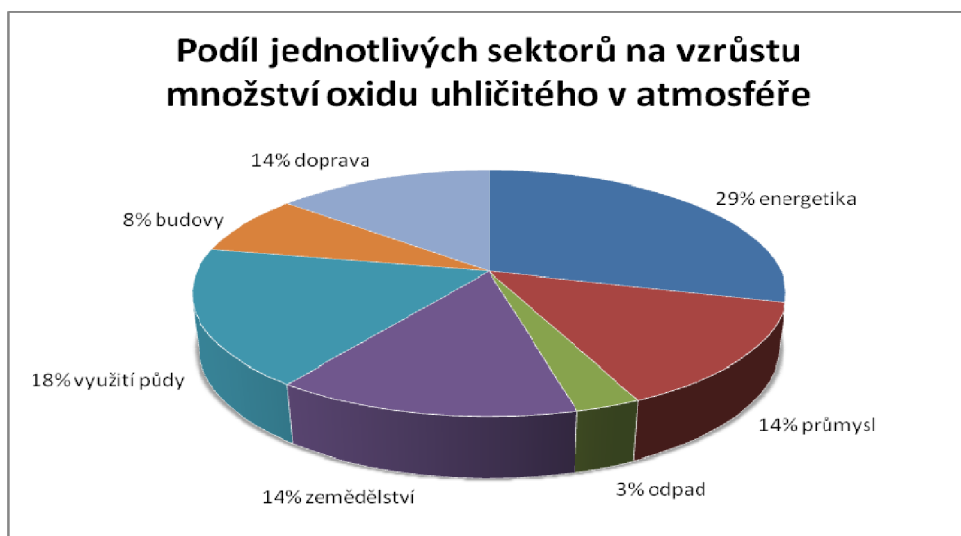
Graf 1: Podíl atmosférických plynů na skleníkovém efektu

1.3. Snižování koncentrace skleníkových plynů

Jak již bylo naznačeno, množství všech skleníkových plynů stále stoupá a s ním i hrozící nebezpečí změn klimatu v důsledku globálního oteplování. V zájmu všech lidí na Zemi by proto mělo být tyto kvóty snížit. Asi nejvýznamnějším krokem v tomto směru bylo uzavření Kjótského protokolu, kterým se státy zavazují snížit množství skleníkových plynů na 94,7 % jejich množství z roku 1990.

Jako nejdůležitější se jeví snižování množství CO₂, který má na skleníkovém jevu hlavní podíl. Jeho koncentrace v atmosféře je dána množstvím rostlinné vegetace a intenzitou slunečního záření, které zajišťuje efektivitu fotosyntézy. Ta potom reguluje jeho množství v ovzduší. Z toho důvodu pak veškerá rostlinná vegetace zajišťuje jistou rovnováhu mezi množstvím kyslíku a CO₂ v ovzduší. Rostlinné vegetace však v posledních letech stále ubývá v důsledku rozmanitých průmyslových a zemědělských aktivit, které naopak v mnohých případech stojí za zvyšováním koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Proto i nadále můžeme očekávat další nárůst hladiny oxidu uhličitého z důvodů intenzivní těžby a spalování fosilních paliv.

Jako možné řešení tohoto problému se jeví zachytávání CO₂ a jeho následné ukládání pod zemský povrch. Z grafu je patrné, že podíl energetických a průmyslových složek na celkové produkci CO₂ je majoritní. Při vhodném využití nových technologií, především pak v nejvíce problémových sektorech, budeme schopni částečně snížit koncentraci CO₂ v atmosféře a tím v určité míře omezit negativní dopady na životní prostředí.



Graf 2: Podíl antropogenních činitelů na vzrůst koncentrace CO₂ v ovzduší

2. ZACHYTÁVÁNÍ A UKLÁDÁNÍ CO₂

Zachytávání uhlíku je nejlépe realizovatelné ve velkých statických objektech jako například elektrárny a v průmyslovém provozu, kde může být CO₂ odděleno v některých částech procesu. Existuje řada separačních technologií založených na různých principech. Některé z nich jsou používány již přes sto let v naftovém průmyslu a již byly aplikovány v některých menších elektrárnách.

Koncept zachytávání CO₂ se skládá ze třech základních procesů:

- **odloučení a zachycení** – Tento proces zahrnuje chycení a izolaci CO₂ buď před spalováním, nebo až po spalovacím procesu.
- **doprava** – Zachycený CO₂ je možné přepravovat jednak v určitém druhu kontejnerů, jednak pomocí potrubí, které je efektivní především pro velké objemy.
- **sklad** – Oxid uhličitý musí být skladován takovým způsobem, aby se nemohl dostat zpět do atmosféry a působit tak změny v klimatu.

2.1. Odloučení a zachycení

Separace CO₂ a jeho zachycení je prvním krokem v procesu CCS. Jeho oddělení je snazší při vyšší koncentraci. To v důsledku znamená zachytávání z elektráren, výrobních procesů rafinace paliva apod., ještě než je vypuštěn do atmosféry.

Emise jsou však většinou nedostatečně koncentrované, což znamená i mnohem vyšší ekonomické náklady. Nízké koncentrace CO₂ ve spalinách se projeví především v nedostatečné efektivitě využívání postupů separace. Mnohem příznivěji se jeví separace CO₂ z vysoce koncentrovaných zdrojů jako jsou kyselinová pára odstraněná ze zemního plynu nebo některé produkty chemického průmyslu, než zředěné proudy emitované konvenčními elektrárnami, rafinériemi a plynovými závody.

Předmětem současného výzkumu je však i modernizace elektráren na fosilní paliva a vývoj nových, účinnějších a čistších energetických systémů zaručujících jednak vyšší účinnost, ale i lepší podmínky pro CCS systémy. Pokroky v energetice, jako jsou GTCC nebo IGCC elektrárny, nabízejí řešení pro snadnější aplikaci separačních technologií a pro budoucí rozvoj.

2.1.1. Technologie separace CO₂ ze spalin

Pro separaci CO₂ z emisí existuje v současné době již poměrně dost metod. Mnohé z nich však zatím fungují pouze v laboratorních podmínkách.

Na druhou stranu se již některé metody řadu let využívají v průmyslovém měřítku. Zachytávání CO₂ bylo zatím úspěšně aplikováno při výrobě amoniaku, železa a oceli, vápence, cementu, dále pak v petrochemii, rafinerii, těžbě zemního plynu a v menším měřítku i v některých dalších průmyslových odvětvích. Nejvýznamnější metody separace:

- chemické pohlcení
- fyzické pohlcení
- adsorpce
- nízkoteplotní zpracování
- membránová separace

2.1.1.1. Chemické pohlcení

Procesy, které spoléhají na rovnovážnou chemickou reakci a dosažení minimální Gibbsovy volné energie se nazývají chemické pohlcení. Touto reakcí se rozumí především absorpce CO₂ do aminů nebo také do čpavku či zahřátého uhličitanu draselného. Aminy mají vysokou účinnost zachycení a velkou selektivitu. Typická absorpční činidla jsou monoethanolamin (MEA), diethanolamin (DEA) a methyldiethanolamin (MDEA).

CO₂ reaguje s těmito rozpouštědly za vzniku meziprojektu se slabými vazbami. Zahřátím se pak vazby tohoto meziprojektu poruší, čímž se regeneruje původní rozpouštědlo a zároveň dojde k uvolnění CO₂. K absorpci dochází asi při 50°C, k desabsorpci pak při teplotách v rozmezí 100-140°C.

Chemické pohlcování může dobře fungovat i při nízkých koncentracích CO₂ ve spalinách, je však důležité aby se ve spalinách nenacházely nečistoty jako SO₂, uhlovodíky a pevné částice, protože jejich přítomnost může mít za následek provozní problémy absorbentu.

Tím, že vazbu mezi absorbentem a CO₂ lze přerušit pouze za zvýšené teploty, klesá energetická účinnost tohoto procesu. Energie potřebná pro regeneraci klesá s rostoucí koncentrací CO₂.

Chemické čištění pomocí aminů je poměrně vyspělá technologie, přesto však pokračuje další vývoj, který do budoucna umožní mnohem lepší energetickou efektivitu a provozní optimalizaci. Nabízejí se nové chemické absorbenty, které mají nižší pevnost vazby mezi rozpouštědlem a CO₂ než je MEA, MDEA či DEA. Jsou jimi například stericky bržděné aminy nebo soli aminokyselin. Díky velkému potenciálu má tato metoda reálné možnosti aplikace v průmyslovém měřítku.

2.1.1.2. Fyzikální pohlcení

Jsou procesy, které jsou poháněny dosažením rovnovážného stavu fází. Efektivita fyzikálních absorbentů je přímo úměrná tlaku a teplotě. Čím vyšší tlak a nižší teplota, tím lépe fungují. Pokud se koncentrace CO₂ ve spalinách zdvojnásobí, množství energie pro zachycení je pak poloviční. Při nízkých koncentracích CO₂ jsou náklady na stlačování nepřiměřené.

Při vysokých tlacích a nízkých teplotách se tedy rozpustí velká část CO₂ a při následném snížení tlaku a zvýšení teploty se opět uvolní. Typickými absorpčními činidly jsou Selexol (dimethylether polyethylenglykol) a Rectisol (methanol). Protože mezi CO₂ a absorpčním činidlem neprobíhá žádná chemická reakce, regenerační energie je poměrně nízká. Fyzikální absorpce dokáže efektivně zachytit CO₂ z vysokotlakých proudů plynů jako je tomu u zařízení IGCC. V těchto případech může být méně nákladná než chemická absorpce.

2.1.1.3. Adsorpce

Adsorbenty jsou pevné látky s velkou plochou, na které je rozložen kladný plošný náboj. Díky tomu se elektronegativní části molekuly CO_2 přichytí k povrchu Van der Waalsovými silami.

Některé porézní látky jsou schopny adsorbovat velké množství plynu na jednotku objemu. Pro separaci CO_2 se používají především adsorpční lůžka z oxidu hlinitého, molekulární zeolitová síta a aktivní uhlí. Po adsorpci plynů mohou být adsorpční lůžka opět obnovena pomocí několika metod. Komerčně se využívají tyto čtyři metody:

- Regenerace tlakem - Snížením vnějšího tlaku jsou zachycené plyny opět vypuštěny. Jedná se o nejběžnější způsob regenerace.
- Termální regenerace - Z lůžka je plyn uvolňován za pomoci zvýšení teploty, regenerační cykly jsou však velmi pomalé, což značně snižuje jejich použitelnost
- Vymývání lůžek pomocí proudu kapaliny.
- Elektricky vodivé lůžko aktivního uhlí selektivně adsorbuje CO_2 , s využitím elektřiny odpadají náklady na změnu teploty či tlaku

Adsorpce není v současné době považována za ekonomicky výhodný způsob separace CO_2 , a to především kvůli nízké kapacitě a selektivitě dostupných adsorbentů. Jediným komerčním využitím této metody je oddělování CO_2 ze směsi CO_2 - H_2 za současného vzniku vodíku.

2.1.1.4. Nízkoteplotní zpracování

Oxid uhličitý může být odstraněn ze směsi plynů pomocí kondenzace za velmi nízkých teplot.

Existuje několik základních metod nízkoteplotní separace CO_2 . Všechny tyto metody sdílejí tyto společné znaky; probíhají za teplot mnohem nižších než je teplota okolní (při ochlazení pod $-80\text{ }^\circ\text{C}$ mění plynný oxid uhličitý své skupenství přímo na pevné – desublimuje, na kapalnou fázi ho pak lze přeměnit jen při zvýšeném tlaku, a to při teplotě kolem $-60\text{ }^\circ\text{C}$), spoléhají na rovnováhu mezi kapalnou a plynnou, případně pevnou a plynnou fází látek. Jejich použitelnost nezáleží na tlaku plynů, ale je nejefektivnější pro proudy směsi plynů s vysokou koncentrací CO_2 (často kolem 90%). Také je důležité, aby byly teploty varu jednotlivých složek směsi rozdílné od teploty varu CO_2 .

Tyto procesy jsou energeticky náročné a drahé, protože existuje spousta faktorů komplikujících jejich hladký průběh. Proces mohou narušovat některé nečistoty jako oxidy dusíku nebo SO_2 , proud plynů musí být před chlazením zbaven vodních par a také samotná fáze přeměny CO_2 je poměrně komplikovaná. Během procesu se totiž mohou vytvářet pevné útvary ucpávající přístroje a snižující efektivitu přenosu tepla.

2.1.1.5. Membránová separace

Membránová separace je obvykle proces řízený tlakem, ve kterém se využívá rozdílů mezi fyzikální nebo chemickou interakcí materiálu membrány s komponenty plynové směsi.

Tento proces je určován především selektivitou (schopnost jednoho plynu procházet membránou rychleji než ostatní) a permeabilitou (množství plynu procházející membránou v závislosti na tlaku) membrány. I malá redukce tlaku zajišťuje dostatečnou schopnost

membrány k separaci této složky, díky tomu je tato technologie potenciálně energeticky účinnější než systémy absorpční separace. Ideální situaci představuje zachycování CO₂ z koncentrovaného zdroje tohoto plynu s některými kontaminanty, v kombinaci s prodyšnou membránou, která je pro CO₂ vysoce selektivní. V praxi však mají zdroje CO₂ často nízký tlak a selektivita membrán taky není přímo ideální. Problém selektivitu je jednou z velkých překážek, protože zvýšení selektivitu k CO₂ často vede i ke zvýšení selektivitu k nežádoucím plynům. Tento problém je částečně vyřešen s pomocí vícestupňového průchodu, to však souvisí i s dalším nárůstem nákladů.

V praxi se používá několik typů membrán; polymerové, keramické, pórovité kovové a některé další speciální varianty.

Ke skupině membrán řadíme také plynové absorpční membrány, které jsou založeny na poněkud odlišné technologii než ty separační. Slouží k propojení plyných směsí a tekutých absorbentů (jako např. MEA rozpouštědla), čímž se zvyšuje účinnost fyzikální či chemické absorpce. Tato technologie funguje díky přítomnosti absorpční kapaliny na jedné straně membrány, která selektivně odstraňuje některé prvky z proudu plynů na druhé straně membrány. Na rozdíl od separačních membrán nemusí být tyto membrány selektivní vůči jakémukoliv prvku. Důležitá je pouze existence oblasti styku plynu s absorpční tekutinou, aniž by došlo k vzájemnému mísení. Odstranění CO₂ ze spalin je pak dosaženo s pomocí porézních hydrofobních membrán v kombinaci s vhodnými absorpčními činidly. Použití absorpčních membrán je méně nákladné než aplikace běžných konvenčních membrán, musí být ovšem zajištěny stejné tlakové podmínky pro kapalinu i pro plyn.

V budoucnu se pro energetiku jeví jako nejperspektivnější využití kombinace metody MEA a absorpčních membrán, především díky nízké energetické náročnosti tohoto procesu. Pro rozsáhlejší aplikaci v CCS systémech je však nutný ještě další rozvoj této technologie.

2.1.2. Postupy separace CO₂ pro energetiku

Pro omezování emisí CO₂ z fosilních paliv jsou také využívány již zmíněné separační technologie nebo jejich vhodná kombinace. Protože největšími průmyslovými znečišťovateli jsou elektrárny na fosilní paliva či teplárny, využití CCS systémů může nejvíce pomoci právě zde. Vzhledem k velikosti těchto objektů a ceně paliv je nutné myslet především na energetickou efektivitu a vhodné zařazení separačních technologií do procesu výroby energie. Pro odloučení emisí CO₂ vzniklých spalováním fosilních paliv jsou rozvíjeny především tyto tři postupy:

- **postup post-combustion** Jedná se o metody, kdy dochází k zachycení CO₂ ze spalin generovaných klasickými spalovacími postupy fosilních paliv.
- **postup pre-combustion** Metoda je založena na separaci CO₂ ještě před spalovacím procesem.
- **postup Oxyfuel** Jde o spalování paliva ve směsi obohacené kyslíkem, hlavní složkou spalin je pak CO₂, není tedy nutná žádná další separace.

2.1.2.1. Postup post-combustion

Separace CO₂ probíhá až na konci procesu výroby energie, tzn. že CO₂ je zachytáván až z výstupních kouřových plynů. Tyto spaliny obsahují u běžných uhelných elektráren kolem

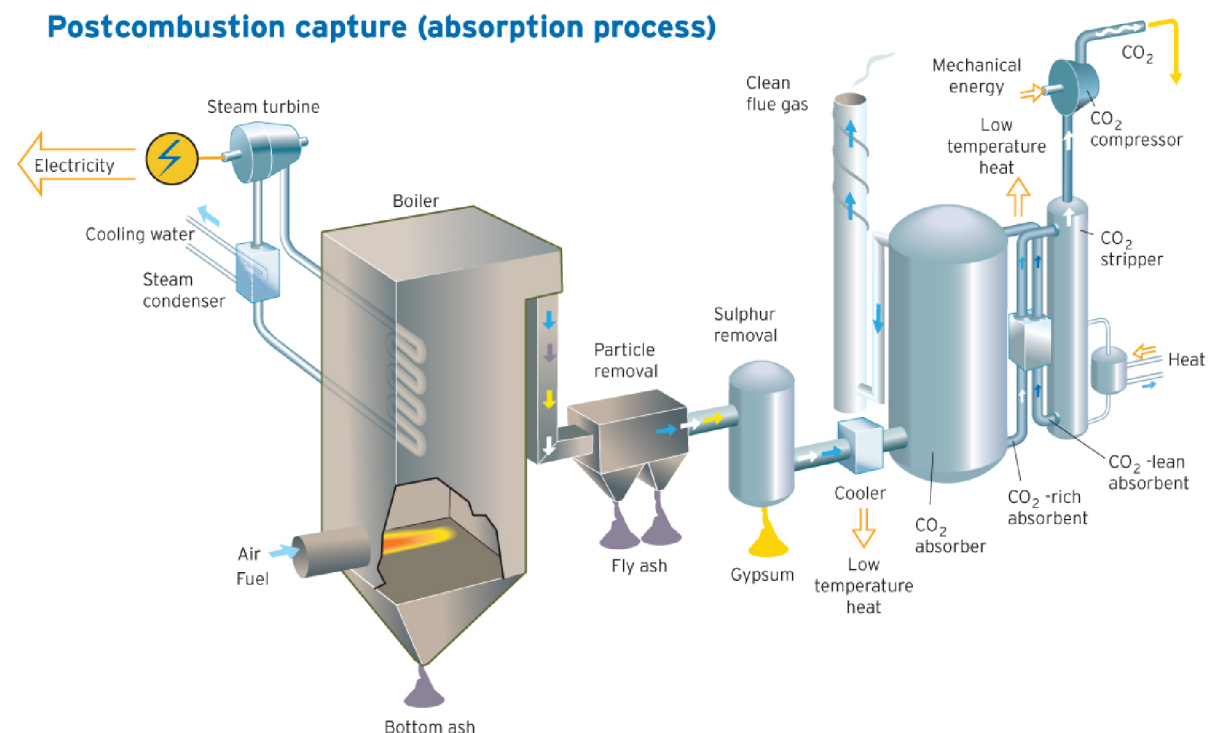
15 % CO₂, u elektráren na zemní plyn je tato hodnota přibližně pětina. Koncentrace CO₂ je tedy poměrně nízká a tlak výstupních plynů je atmosférický. Pro takto nízké koncentrace se nabízí technologie chemického čištění, čili absorpce do aminů. Výstupní kouřový plyn musí být ovšem zbaven některých nečistot ještě před tím, než projde samotným procesem CCS. Této metody se úspěšně využívá u menších zařízení, ale aplikace na běžné uhelné elektrárny, by vedla ke snížení jejich účinnosti v důsledku neefektivního vynaložení energie na separaci produkovaného CO₂. Aby se postup ekonomicky vyplatil, je třeba zvýšit tlak a koncentraci výstupních plynů. Z toho důvodu nelze efektivně napojit tuto metodu na elektrárny starého typu. Vyšší koncentraci lze dosáhnout pouze zásahem do vlastního spalovacího procesu, což v budoucích moderních elektrárnách budou zajišťovat postupy Pre-combustion a Oxyfuel.

výhody:

- vhodné pro dovybavení některých elektráren a průmyslových závodů
- 60 let zkušeností s touto technologií
- v současné době využívána při zachycování CO₂ pro potravinářský průmysl

nevýhody:

- vysoké provozní náklady
- energetická náročnost
- málo zkušeností s aplikací v rozsáhlejší měřítku



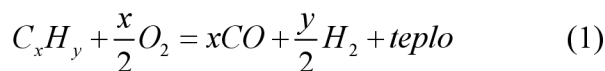
Obr. 2: Schematický náčrt postupu Post-combustion [14]

electricity – elektřina, heat – teplo, steam turbine – parní turbína, cooling water – chladicí voda, steam condenser – parní kondenzátor, boiler – kotel, air – vzduch, fuel - palivo, bottom ash – popel, particle removal – odstranění částic, fly ash – popílek, sulphur removal – odsíření, gypsum – sádra, clean flue gas – čisté spaliny, cooler – chladič, low temperature heat – nízkoteplotní teplo, mechanical energy – mechanická energie, CO₂ compressor – CO₂ kompresor, CO₂ stripper – oddělovač CO₂, CO₂ absorber – pohlcovač CO₂, CO₂ rich absorber – pohlcovač spalin bohatých na CO₂, CO₂ lean absorber – pohlcovač spalin chudých na CO₂

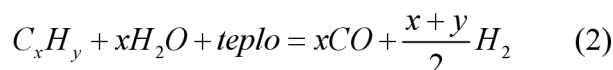
2.1.2.2. Postup pre-combustion

Základním pilířem této metody je přeměna běžných fosilních paliv na ušlechtilější paliva s větším podílem H/C.

Prvním krokem je získání syntézního plynu (směs CO a H₂), a to buď částečnou oxidací paliva s kyslíkem:

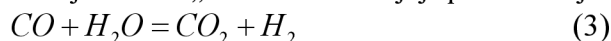


nebo reakcí paliva s vodní párou:



Reakce (1) se uskutečňuje za teplot okolo 1300°C a je možné použít několik druhů paliv. Reakce (2) probíhá za nižších teplot a to okolo 800°C. Jako palivo jsou používány lehké uhlovodíky. Teplo, které musíme dodat v reakci (2) je možné dodat reakcí (1), čehož se také někdy využívá a obě tyto reakce se uskutečňují v jednom reaktoru.

Následným krokem je obohacení syntézního plynu vodíkem. Tato reakce bývá označována jako tzv. „shift“ reakce a její podstatou je reakce CO s vodní párou:



Tato reakce probíhá při teplotě asi 450°C za přítomnosti katalyzátoru FeO nebo Cr₂O₃.

K separaci CO₂ ze směsi lze využít fyzikální absorpce, např. absorpcí do Selxolu. Využitím vodíku se dnes zabývají mnohé výzkumy, jejichž snahou je vytvoření turbíny schopné pracovat s plynem o vysokých koncentracích vodíku (v současnosti turbíny snesou max. koncentraci vodíku okolo 50 %) nebo nejlépe na čistý vodík. Další vývoj se týká využití vodíku v palivových článcích.

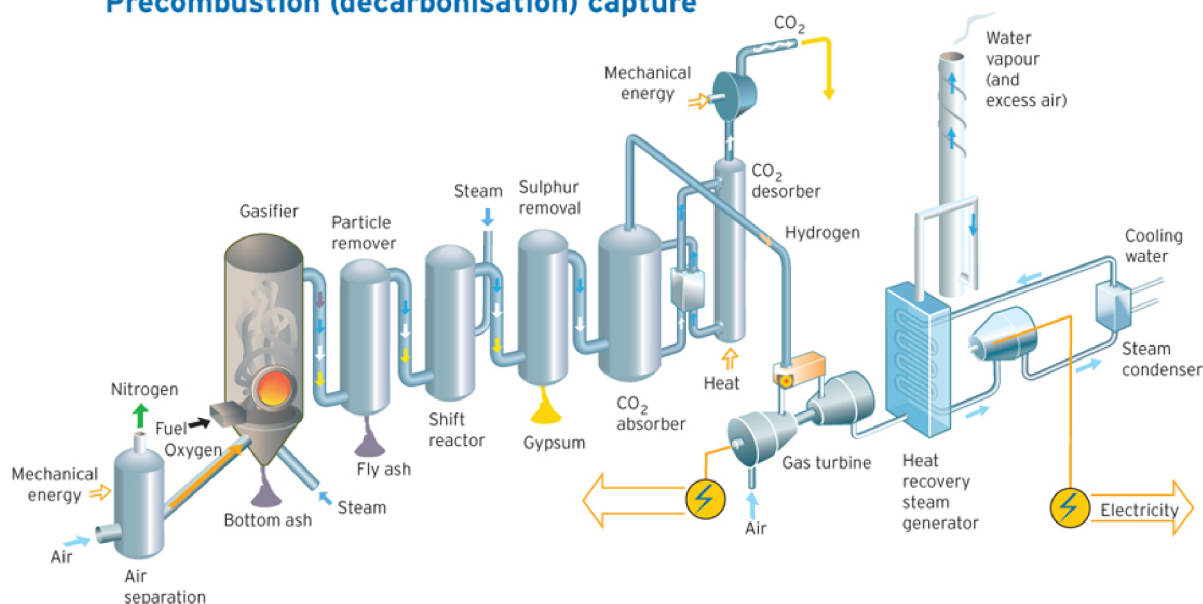
výhody:

- osvědčená metoda v průmyslovém měřítku
- velmi účinné zachytávání CO₂ (zachytí 90 – 95 %)
- nižší náklady a spotřeba energie než u předchozí metody
- lze očekávat další technologický vývoj a snižování nákladů
- zdroj vodíku
- použitelný pro elektrárny IGCC

nevýhody:

- potřeba pyrolýzní jednotky
- vysoké investiční náklady na stavbu nového závodu
- současná nízká účinnost vodíkových turbín
- nedostatečná flexibilita

Precombustion (decarbonisation) capture



Obr. 3: Schematický náčrt postupu Pre-combustion [14]

electricity – elektrina, heat – teplo, gas turbine – plynová turbína, cooling water – chladicí voda, steam – pára, steam condenser – parní kondenzátor, heat recovery steam generator – rekuperační parní generátor, water vapour – vodní pára, excess air – přebytek vzduchu, air – vzduch, hydrogen – vodík, fuel – palivo, bottom ash – popel, particle remover – odstranění částic, fly ash – popílek, sulphur removal – odsíření, gypsum – sádra, mechanical energy – mechanická energie, CO₂ desorber – deosbér CO₂, CO₂ absorber – pohlcovač CO₂, gasifier – zplynovač, oxygen – kyslík, nitrogen – dusík, air separation – separace vzduchu

2.1.2.3. Postup Oxyfuel

Hlavním záměrem této metody je vyloučení dusíku z procesu. Dusík významným způsobem ředí spalné plyny, čímž ztěžuje zachytávání CO₂. Následným produktem spalování je pak CO₂ a H₂O, které lze od sebe snadno oddělit. Tato metoda zahrnuje dvě skupiny spalování.

U první z nich se do topeniště vhání kyslík namísto vzduchu. Při spalování v kyslíku je dosahováno teplot nad 2000 °C, což do budoucna vyžaduje použití kvalitnějších materiálů než u běžných elektráren. Na druhou stranu lze díky vysokým spalovacím teplotám dosáhnout lepší přeměny tepla na elektrickou energii. Zatím je však teplota spalování regulována, a to přívodem recyklovaných spalin nebo vodní páry do spalovacího prostoru. Tímto způsobem spalování po ochlazení a následné kondenzaci vodní páry dostáváme spaliny s vysokou koncentrací 80 – 98 % CO₂, což je pro následující separační procesy velmi příznivé. Spalování paliva s kyslíkem může probíhat buď v kotli, nebo plynové turbíně. Kotel se jeví jako lepší řešení, protože může pracovat s libovolným palivem. Zároveň už bylo provedeno mnoho poloprovozních experimentů, na rozdíl od plynové turbíny, kde navíc musí být jako palivo použit zemní plyn nebo plyn syntézní. Problémem spalování paliva s kyslíkem je především nutnost dodávky velkého množství kyslíku (např. uhelná elektrárna typu IGCC spotřebuje 4000 t O₂/den). Aby bylo možné přivádět čistý kyslík, musí být instalována vhodná separační jednotka pro odloučení nežádoucích plynů ze vzduchu, která bude schopna zvládat i velké objemy. Na výzkum a vývoj vhodných jednotek je však soustředěna dostatečná pozornost a v současné době již probíhají poloprovozní zkoušky.

Druhá skupina se zaměřuje na spalování paliva v chemické smyčce. Kyslík v tomto případě dodávají palivu oxidy kovů. Stěžejní je vratná reakce mezi vhodným kovem a jeho oxidem. Vhodné oxidy jsou např. NiO, CuO, Fe₂O₃ nebo Mn₃O₄. V palivovém reaktoru se

oxid kovu redukuje na kov, čímž dostatečně oxiduje palivo. Ve vzduchovém reaktoru se pak kyslíkem ze vzduchu oxid zpětně regeneruje. Kov a oxid kovu cirkulují v kapalném stavu mezi oběma reaktory. Na kov i oxid kovu jsou kladeny požadavky především na jejich dlouhodobou chemickou i mechanickou stabilitu a velikost (částice kovu by měly mít průměr okolo 0,5 mm). Tato technologie je však zatím ve stádiu vývoje a prvních experimentů.

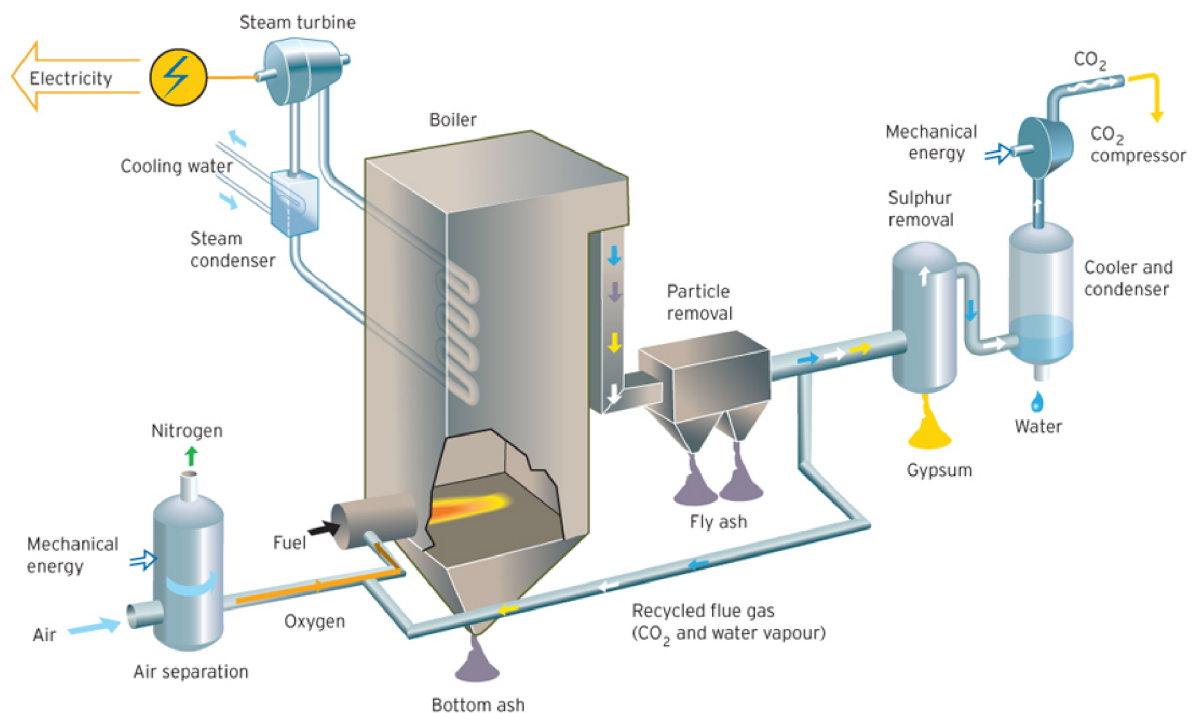
výhody:

- potenciál pro stoprocentní zachytávání CO₂
- účinnější spalování v důsledku eliminace některých látek ještě před samotným procesem spalování
- lze očekávat další technologický vývoj

nevýhody:

- potřeba nových, teplotně odolných materiálů
- potřeba jednotky pro získávání paliva

Oxyfuel (O₂/CO₂ recycle) combustion capture



Obr. 4: Schematický náčrt postupu Oxyfuel [14]

electricity – elektřina, steam turbine – parní turbína, water – voda, cooling water – chladicí voda, steam condenser – parní kondenzátor, boiler – kotel, air – vzduch, fuel - palivo, bottom ash – popel, particle removal – odstranění částic, fly ash – popílek, sulphur removal – odsíření, gypsum – sádra, recycled flue gas – recyklované spaliny, cooler and condenser – chladič a kondenzátor, mechanical energy – mechanická energie, CO₂ compressor – CO₂ kompresor, nitrogen – dusík, oxygen – kyslík, air separation – separace vzduchu, water vapour – vodní pára

2.2. Transport

Již v úvodu této kapitoly jsem zmínil 2 vhodné způsoby pro přepravu CO₂.

Prvním z nich je přeprava pomocí potrubí. V západní Americe je pomocí potrubí přepravováno okolo 60 milionů tun CO₂ ročně v celkové délce potrubí 3100 km. Pro tento způsob transportu je důležité, aby byl přepravovaný CO₂ zbaven sirovodíku a vodní páry kvůli zabránění zbytečnému rozežírání potrubí. Ale bylo by možné navrhnout i korozivzdorné potrubí, které může bezpečně pracovat i s přítomným obsahem sirovodíkem či vody. To by umožnilo vést tato potrubí i přes obydlené oblasti.

Druhou možností je přeprava CO₂ v tankerech či jinou formou kontejnerové dopravy. Vlastnosti zkapalněného CO₂ se příliš neliší od již přepravovaných surovin jako zemní plyn, petrolej či propan. Z toho důvodu mohou být pro přepravu CO₂ bez problémů použity již existující technologie.



Obr. 5: Síť potrubí pro CO₂ v USA [18]

2.3. Ukládání

Oxid uhličitý lze do jisté míry využít v chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu, při těžbě ropy a zemního plynu, pro tvorbu ochranné atmosféry nebo jako chladicí médium. Při aplikaci CCS systémů na elektrárny či větší průmyslové objekty však bude vznikat mnohem více CO₂ než je možné využít. Z toho důvodu se již delší dobu uvažuje o tom, kam s přebytečným CO₂. Nabízí se několik možností:

- ukládání v geologických strukturách
- minerální sklad
- podmořský sklad

2.3.1. Ukládání v geologických strukturách

Podstatou této metody je vstřikování CO₂ do podzemních geologických formací. Nejvíce skladovacího prostoru nabízejí tyto potenciální uložště:

- nevytěžitelné uhelné sloje
- vyčerpaná ložiska ropy a zemního plynu
- podzemní vodní jezera (tzv. aquifery)

Tyto geologické struktury byly vybrány na základě specifických fyzikálních a geochemických mechanismů, které jsou schopny zabránit úniku CO₂ na povrch. Primární nevýhodou je geografické rozmístění těchto útvarů a jejich omezené kapacity (např. v Německu existuje možnost uložit asi 2,6 miliardy tun CO₂. Při uvažování roční emise 345 miliónů tun CO₂ by to znamenalo, že veškerá uložště by byla plná do osmi let).

Ukládání CO₂ do vyčerpaných ložisek ropy a zemního plynu je první metodou, která již úspěšně funguje po mnoho let. Tento nápad přišel v souvislosti s vytěžením posledních zbytků surovin z nalezišť pomocí zvýšení tlaku. Přímá injektáž CO₂ v těchto případech bude mít i určitou návratnost nákladů souvisejících s jeho separací, transportem a ukládáním.

Oxid uhličitý může být ukládán i v nevytěžitelných uhelných slojích, protože se dobře absorbuje do povrchu uhlí za vzniku metanu, který je možné využít v dalších průmyslových odvětvích a tím částečně vykompenzovat náklady. Technická proveditelnost závisí na propustnosti uhelného lože. Je však známo, že tato ložiska zadržovaly metan po milióny let, takže je pravděpodobné, že budou stejným způsobem spolehlivě zadržovat CO₂.

Aquifery jsou geologické formace obsahující vysoce mineralizované solanky. V několika případech už byly tyto formace využity ke skladování chemického odpadu. Jejich hlavní výhodou je poměrně častý výskyt a velké skladovací objemy. Nevýhodou však je nedostatečná znalost těchto struktur a žádná možnost kompenzace nákladů, protože zde nevzniká žádný vedlejší produkt, jako je tomu u uhelných slojí či ropných polí.

geologický útvar	celková kapacita uložště [Gt CO ₂]
nevytěžitelné uhelné sloje	15-60
vyčerpaná ložiska ropy a zemního plynu	920
aquifery	400-10000

Tab. 1: Potenciál uložště CO₂

2.3.2. Minerální sklad

Princip minerálního skladování CO₂ spočívá v zachycení uhlíku ve stabilních minerálech. Výhodou této metody je trvalé uložení CO₂ bez jakýchkoliv možností úniku. Nicméně reakce mezi CO₂ a minerály probíhá velmi pomalu. Z toho důvodu je potřeba minerály modifikovat, což je však energeticky náročná operace. Odhady IPCC naznačují, že elektrárna vybavená CCS technologií využívající minerálních skladů spotřebuje až o 180% více energie než běžná elektrárna. Z toho důvodu se o tomto způsobu skladování hovoří jen okrajově.

2.3.3. Podmořský sklad

Existují dva hlavní způsoby skladování CO₂ v mořích. Prvním konceptem je metoda „rozpuštění“. Principiálně je založena na injektáži CO₂ lodí nebo potrubím do hloubky minimálně 1000 m a následném rozpouštění. Druhá metoda nazývaná „lake“ vidí řešení v ukládání CO₂ na mořském dně v hloubkách větších než 3000 m, kde má CO₂ větší hustotu než voda. Diskutuje se i metodě převedení CO₂ na hydrogenuhličitany (pomocí vápence) nebo hydráty.

Vliv na životní prostředí oceánů dlouhodobým skladováním je ovšem nesporný. Velké koncentrace CO₂ zajisté způsobí úhyn mnohých mořských organismů, nemluvě o tom, že CO₂ rozpuštěné v oceánech nakonec stejně dosáhne rovnováhy s atmosférou. Tento způsob skladování tedy není ani zdaleka tak trvanlivý jako ukládání v geologických formacích. Než bude možné tuto metodu v rozsáhlejší měřítku aplikovat, pokud vůbec, bude třeba ještě mnoha výzkumů.

3. SOUČASNÉ PROJEKTY VYUŽÍVAJÍCÍ TECHNOLOGIE CCS

Výzkumy v oblasti CCS v dnešní době probíhají v mnoha institucích po celém světě. Technologie CCS jsou však stále ještě nedostatečné a prozatím nemají potenciál k využití v tak rozsáhlých průmyslových objektech jako jsou fosilní elektrárny, kde se uvažuje o integraci metod CCS především. Přesto však ze strany energetických společností existují značné tendence o další vývoj těchto metod i přes jejich obrovské náklady. Momentálně již funguje několik málo pilotních programů, které jsou zaměřeny na praktickou aplikaci dosavadních technologií separace nebo ukládání CO₂ a jejich ekonomickou optimalizaci.

3.1. Využití technologie MEA

Tato technologie je v současné době realizována v několika elektrárnách, jejich účelem však není čištění spalin, ale získávání velmi čistého CO₂ pro potravinářský průmysl. Nicméně zkušenosti z těchto elektráren byly využity při vývoji novějších a účinnějších metod separace CO₂.

Elektrárna Shady Point (USA)

Elektrárna s instalovaným výkonem 320 MW pracuje s technologií spalování černého uhlí ve fluidní vrstvě. Zachycené emise CO₂ jsou využity pro potravinářský průmysl a jeho produkce činí kolem 200 t CO₂/den.

Elektrárna Warrior Run (USA)

Tato elektrárna pracuje na stejném principu jako Shady Point, CO₂ je rovněž využit v potravinářském průmyslu. Instalovaný výkon je však nižší, a to 180 MW.

Summitomo Chemicals, Chiba (Japonsko)

Jedná se o elektrárnu spalující zemní plyn a černé uhlí, vyčištěný CO₂ je rovněž požit v potravinářském průmyslu a jeho denní produkce je 150t CO₂/den.

3.2. Využití postupu post-combustion

Pro demonstraci tohoto postupu byla zvolena dánská uhelná elektrárna Esbjergvaerket. Tato moderní elektrárna pro kogenerační výrobu elektřiny a tepla se pyšní účinností 90 % při výkonu 412 MW. Pilotní program CCS dosahuje účinnosti zachycení 90 % a zachytí asi 1 t CO₂/h. Tento program má být provozován minimálně po dobu dvou let.

3.3. Využití postupu Oxyfuel

První jednotka pracující s touto technologií se nachází v německém Schwarze Pumpe a byla uvedena do chodu v září 2008. Výkon jednotky je 30 MW, produkuje téměř stoprocentně čistý CO₂ a to s účinností 95%. Zkušební provoz má trvat 3 roky. V tomto časovém horizontu má být do podzemí uloženo 100000 t CO₂. Jako nejvhodnější uložště byl

zvolen aquifer Altmark. Poté bude zařízení využito pro další testy. Cílem projektu je lepší pochopení dynamiky spalovacího procesu Oxyfuel a demonstrace využití této metody.



Obr. 6: jednotka separace CO₂ ve Schwarze Pumpe [4]

3.4. Uložiště CO₂

Altmark (Německo)

Toto uložistiště je známé spíše v souvislosti s projektem ve Schwarze Pumpe. Jeho kapacita se odhaduje na 500 milionů t uloženého CO₂. Tato lokalita leží 350 km od Schwarze Pumpe. Oxid uhličitý je do Altmarku dopravován v kapalném stavu (při teplotě -25 °C a tlaku 1,5 MPa) nákladními automobily. Zatím však toto uložistiště nefunguje dostatečně dlouho na to, aby byly vyvozeny jakékoliv závěry hovořící o jeho stabilitě, následcích na ekosystém či skladovacích investicích.

Sleipner (Norsko)

Lokalita v Severním moři, kde se v hloubce 1000 m nachází salinický aquifer s odhadovanou celkovou kapacitou 25 milionů t CO₂. Jde o jedno z mála míst na Zemi, kde neprobíhá ukládání CO₂ za účelem zisku. Cena za ukládání v této lokalitě je okolo 32 euro/t CO₂.

Snohvit (Norsko)

Druhá lokalita u Norského pobřeží se nachází v Berentsově moři. Probíhá zde těžba zemního plynu a CO₂ se vtlačí zpět do ložiska za účelem zvýšení výnosu. Je v provozu od roku 2001 a každým rokem přijme okolo 750000 t CO₂.

In Salah (Alžírsko)

Jedná se o ložisko zemního plynu, kde se pomocí metody MEA odstraňuje CO₂ ze zemního plynu a následně se stlačuje zpět do ložiska. Zde má zpětné vtlačení rovněž za úkol zvýšit výtěžnost zemního plynu. Zařízení funguje od roku 2004. Celková kapacita pro potenciální ukládání CO₂ je asi 17 milionů t CO₂.



Obr. 7: Zařízení v In Salah [17]

4. EKONOMICKÉ FAKTORY

Hlavní roli v aplikaci CCS v energetice hrají náklady. Ty závisí na mnohých faktorech, kterými jsou především cena pohonných hmot, geografická poloha uložišť, provozní náklady, náklady na údržbu a bezpečnostní monitoring. Z toho důvodu jsou uváděné hodnoty dosti orientační.

Jedná se o poměrně novou technologii a její aplikace v masovém měřítku může rovněž přinést nečekané výsledky. Náklady na CCS se obvykle počítají v ceně za kWh energie vyrobené v bezuhlíkatých elektrárnách, za přepravu 1 t CO₂/100 km nebo na tunu uloženého CO₂. Systémy pro separaci CO₂ rovněž snižují výkon, a proto je na produkci stejného množství energie jako v běžných elektrárnách potřeba spálit více paliva. To do jisté míry řeší modernizace spalovacích procesů, ovšem ani tak v blízké budoucnosti nebudou žádné technologie, které by předčily v efektivitě spalovací procesy bez systémů CCS ve výrobním procesu. Proto při kalkulacích nesmíme zapomenout i na množství CO₂ vyrobeného samotným zvýšením spotřeby paliva.

Náklady lze v základu rozdělit do tří skupin; náklady na odloučení CO₂ z emisí, na dopravu a na samotný sklad.

Podstatnou část celkových nákladů tvoří energetické požadavky na proces a samozřejmě také náklady na provoz a údržbu. V neposlední řadě rozhoduje i cena samotné výstavby projektu. Z toho důvodu zatím nepřicházejí v úvahu některé nové technologie, které i přes slušnou efektivitu spalování vyžadují stavbu rozsáhlého komplexu zařízení a budov, spojenou s použitím speciálních materiálů. Náklady na separaci se poměrně výrazně liší v závislosti na použité metodě CCS. Odhadovaná cena za zachycení a kompresi CO₂ je 30-60 euro/t CO₂.

Náklady na dopravu jsou závislé především na způsobu dopravy. Pokud bychom zvolili vedení potrubím, musíme počítat s náklady na materiál, výstavbu, provoz, údržbu a monitoring. Tento způsob transportu je nutné volit uvážlivě vzhledem k objemům přepravovaného plynu a kapacitě uložišť. Druhou možností je využití lodní dopravy, která není fixována na kapacitu uložišť a může přepravovat zkapalněný CO₂ na dlouhé vzdálenosti. Cena za přepravu se liší v závislosti na terénu, obydlí a druhu transportu. Většinou se uvádí hodnoty v intervalu 1-5 euro/100 km.

Zbylou část tvoří náklady na skladování. Kapitál potřebný k injektáži CO₂ pod zem se liší v závislosti na typu a kapacitě uložišť a na výkonu skladovacích zařízení. Dále je možno uvažovat o určitém návratu investic díky vytěžení ložisek, nicméně tato nedotěžená ložiska tvoří v celkové síti možných skladovacích prostor jen malou část. Náklady se uvádí v horizontu 7-20 euro/t CO₂.

Celkově pak systémy CCS zvyšují náklady na výrobu energie o 60-150%. A to při uvažování současných cen energie. Metody separace a ukládání CO₂ jsou považovány za perspektivní řešení problému globálního oteplování, nicméně budou muset ujit poměrně dlouhou cestu, aby byl jejich provoz cenově přijatelný. Kýžené výsledky může přinést rozsáhlý výzkum dotovaný velkými energetickými koncerny a Evropskou unií.

ZÁVĚR

V první kapitole bylo pojednáno o skleníkovém efektu a jeho účinku na ekosystém. Byly popsány základní fyzikální a chemické zákonitosti tohoto jevu, na základě kterých lze částečně porozumět problematice a pochopit současnou tendenci snižovat koncentraci některých plynů v atmosféře. Nejvíce pozornosti je soustředěno na možnosti snižování oxidu uhličitého, který má na skleníkovém efektu podle všeho největší podíl.

Cílem další kapitoly této práce pak bylo seznámení s procesem zachytávání a ukládání CO₂ jako jednou z možností redukce globálního oteplování. Technologie využívané k odloučení CO₂ jsou jádrem této kapitoly. Nejperspektivnější se jeví metody chemické absorpce a membránové separace, pro budoucí aplikaci v energetice však nestačí jen pouhé zařazení některé s technologií do procesu, ale bude třeba změnit i samotný princip fungování elektrárny. V současnosti jsou rozvíjeny tři postupy pro omezování emisí CO₂ z elektráren na fosilní paliva. Odborníci si slibují nejvíce od metody Oxyfuel, která nabízí vysokou účinnost zachycení v kombinaci se zvýšením účinnosti spalování. Je třeba rovněž myslet na způsob skladování CO₂, který je značnou komplikací. Nemáme totiž mnoho zkušeností s ukládáním tak velkých objemů CO₂ a nelze s jistotou tvrdit, zda plyn nebude unikat podél zlomů desek nebo zda vysoký tlak plynů nezpůsobí nepředvídatelný pohyb hlubinných vod či mikrozemětřesení, které by mohlo narušit povrchové vrstvy. Důkladná studie geologických struktur určených k ukládání je naprosto nezbytná. Bylo by krajně nemoudré pouštět se do ukládání milionů tun tohoto oxidu, který ve vysokých koncentracích působí jako prudký jed, bez důkladného pochopení geologických útvarů. Vhodnost jejich využití je rovněž rozebrána v poslední části 2. kapitoly.

Dále jsou v práci uvedeny příklady aplikace těchto metod v praxi a ekonomická stránka CCS systémů.

Výsledky výzkumu a měření z hlavních pilotních programů však dosud nejsou známy a proto nelze s jistotou mluvit o jejich možném přínosu energetice. Je však jisté, že technologie CCS není trvale udržitelná. Jde jen o posunutí problému do budoucnosti, to celé navíc za cenu vynaložení mnohých nákladů a rizku dalších environmentálních dopadů.

SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

- [1] Shackley S., Gough C., Carbon Capture and its Storage: An integrated Assessment, Ashgate Publishing Company, 2006. 313 s. ISBN-13: 978 0 7546 44996
- [2] Kadrnožka J., Globální oteplování Země, 1. vydání, nakladatelství VUTIUM, 2008, 467 s. ISBN 978-80-214-3498-1
- [3] Kadrnožka J., Energie a globální oteplování (Země v proměnách při opatřování energie), 1. vydání, nakladatelství VUTIUM, 2006, 189 s. ISBN 80-214-2919-4
- [4] www.nazeleno.cz
- [5] www.energie.tzb-info.cz
- [6] www.chemicke-listy.cz
- [7] www.enviweb.cz
- [8] www.allforpower.cz
- [9] www.ieaghg.org
- [10] www.unfccc.int
- [11] www.sciencedirect.com
- [12] www.theengineer.co.uk
- [13] www.cs.wikipedia.org
- [14] www.vattenfall.com
- [15] www.odpadoveforum.cz
- [16] www.petroleum.cz
- [17] www.co2captureandstorage.info/WorldMapCCSDetail.ppt
- [18] www.nicholas.duke.edu/thegreengrok/co2pipeline

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

zkratka/symbol	jednotka	význam
$q_{0,\lambda}$	$[W*m^{-2}]$	spektrální sálavost tělesa
q_0	$[W*m^{-2}]$	celková sálavost tělesa
c_1		konstanta
c_2		konstanta
c_3		konstanta
e		Eulerovo číslo
λ	[m]	vlnová délka
λ_{max}	[m]	maximální vlnová délka
ε		součinitel poměrné sálavosti
σ	$[W*m^{-2}*K^{-4}]$	celková intenzita sálání
σ_0	$[W*m^{-2}*K^{-4}]$	Stefanova-Boltzmanova konstanta
T	[K]	termodynamická teplota
ppm		jedna miliontina celku (ppm, parts per million)
CCS		zachytávání a ukládání oxidu uhličitého (CCS, carbon dioxide capture and storage)
GTTC		paroplynová elektrárna (GTCC, gas combined turbine cycle)
IGCC		elektrárny se zplyňováním paliva a s kombinovaným paroplynovým oběhem (IGCC, integrated gasification combined cycle)
MEA		monoethanolamin
DEA		diethanolamin
MDEA		methyldiethanolamin
aMDEA		aktivní methyldiethanolamin
IPCC		Mezivládní panel pro změny klimatu (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)