

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE

2019

MIROSLAV
RATHAN



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rathan** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **466592**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

CCS technologie pro snižování emisí oxidu uhličitého

Název bakalářské práce anglicky:

CCS Technologies for Carbon Dioxide Emission Reduction

Pokyny pro vypracování:

Tématem práce je zpracování přehledu problematiky CCS technologií s náhledem na jejich potenciál využití v rámci ČR. Práce bude obsahovat:

- 1) Rešerši jednotlivých typů CCS technologií se zaměřením na post-combustion technologie.
- 2) Popis modelového zdroje s implementací vybrané technologie CCS.
- 3) Bilance produkce emisí CO₂ z výroby elektřiny ve velkých zdrojích v rámci ČR a potenciál jejich snížení pomocí vybrané technologie CCS.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Skopec, ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**


Ing. Pavel Skopec
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „CCS technologie pro snižování emisí oxidu uhličitého“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Skopce, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 5.6.2019

.....
Miroslav Rathan

Anotační list

Jméno autora:	Miroslav Rathan
Název BP:	CCS technologie pro snižování emisí oxidu uhličitého
Anglický název:	CCS Technologies for Carbon Dioxide Emission Reduction
Akademický rok:	2018/2019
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Skopec
Konzultant:	-
Bibliografické údaje:	Počet stran: 41 Počet obrázků: 3 Počet tabulek: 8 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	CCS technologie, post-combustion technologie, emise skleníkových plynů, zachycení oxidu uhličitého
Keywords:	CCS technologies, post-combustion technologies, greenhouse gases emissions, carbon dioxide capture
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá problematikou snižování emisí skleníkových plynů pomocí technologií CCS. Poslední část je věnována bilanci produkce emisí CO ₂ z výroby elektřiny a potenciál jejich snížení pomocí technologie CCS
Abstract:	This bachelor thesis describes the issue of reducing greenhouse gas emissions using CCS technologies. The last part is devoted to the balance of production of CO ₂ emissions from electricity production and their reduction potential using CCS technology.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČR – Česká republika

CO₂ – oxid uhličitý

CH₄ – metan

N₂O – oxid dusný

CCS – Carbon Capture and Storage

MEA – monoethanolamin

HCL – kyselina chlorovodíková

NGCC – natural gas combined cycle

IGCC – integrated gasification combinec cycle

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlovi Skopcovi za vstřícný postup, trpělivost a pomoc s odbornými informacemi.

Obsah

1	ÚVOD	9
1.1	Globální oteplování	9
1.2	Skleníkový efekt	9
1.3	Rizika a dopady globálního oteplování	9
1.3.1	Extrémní výkyvy počasí a změna klimatu	10
1.3.2	Zvedání hladin moří	10
1.3.3	Ztráta mnoha ekosystémů	10
1.3.4	Rizika spojená se zdravím	10
1.4	Politická opatření a mezinárodní smlouvy	11
1.4.1	Kjótský protokol	11
1.4.2	Pařížská dohoda	11
1.5	Oxid uhličitý (CO ₂)	13
1.5.1	Stoupání koncentrace CO ₂	13
1.5.2	zdroje nárůstu koncentrace	14
2	CCS	15
2.1	Post-Combustion	15
2.1.1	Chemická absorpce	15
2.1.2	Fyzická absorpce	17
2.1.3	Adsorpce	17
2.1.4	Membránová separace	18
2.2	Oxyfuel	19
2.3	Pre-Combustion	20
2.4	Transport	21
2.4.1	Potravní doprava	21
2.4.2	Lodní doprava:	22
2.4.3	Železnice	23
2.5	Uskladnění CO ₂	23
2.5.1	Skladování v geologických strukturách	23
2.5.2	Hlubokomořské skladování	25
3	Popis modelového zdroje s implementací vybrané CCS technologie	27
3.1	Popis elektrárny před instalováním technologie CCS	28
3.2	Použitá technologie CCS	29
4	Bilance produkce emisí CO ₂ z výroby elektřiny ve velkých zdrojích v rámci ČR a potenciál jejich snížení pomocí vybrané technologie CCS	30

4.1	Cíle bilance	30
4.2	Produkce elektřiny za rok 2016.....	30
4.3	Produkce CO ₂ ekv. v ČR.....	31
4.3.1	CO ₂ ekv.	31
4.3.2	Samotná produkce CO ₂ ekv.	32
4.4	Vstupní hodnoty do bilance	32
4.5	Spáleného uhlí na kWh	32
4.6	Celkově spáleného uhlí a vyprodukovaného CO ₂ z výroby elektřiny	33
4.7	Bilance	34
4.8	Zhodnocení bilance	35
5	Závěr	37
6	REFERENCE.....	38

SEZNAM TABULEK:

Tabulka 1: Souhrn funkčního potrubí používaného pro přepravu CO ₂	22
Tabulka 2: Parametry modelového bloku před zavedením technologie CCS.....	28
Tabulka 3: Parametry modelového bloku po zavedení CCS technologie	29
Tabulka 4: Podíl jednotlivých paliv na celkové produkci elektřiny v ČR za rok 2016 [22].....	31
Tabulka 5: příklad koeficientů některých skleníkových plynů, pro stanovení objemu CO ₂ ekv.[8]	31
Tabulka 6: Tabulka bilance požadované procentuální hodnoty zachytu	34
Tabulka 7: produkce chybějící elektřiny bez použití technologie CCS	35
Tabulka 8: produkce chybějící elektřiny s max. použitím technologie CCS(zachycení 90% CO ₂)	35

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 1: Graf měsíčního průměru CO ₂ , vodorovná osa: roky, svislá osa: množství částic CO ₂ na milion částic, červená barva: průměrné měsíční hodnoty, černá barva: průměrná měsíční hodnota po korekci pro průměrný sezónní cyklus [6].....	13
Obrázek 2: Schéma kolony postcombustion [13]	17
Obrázek 3: Ilustrační foto elektrárny Prunéřov I a II.....	27

1 ÚVOD

1.1 Globální oteplování

Globální oteplování je globální změna klimatu na Zemi způsobená člověkem. Lidé svojí činností způsobili globální oteplení průměrně o 1°C oproti době před průmyslovou revolucí a v současné době průměrně stoupá cca o 0,2°C za dekádu. Podle různých pravděpodobných scénářů by mohlo globální oteplování dosáhnout i o 2°C oproti před industriální době, pokud bude trend oteplování nadále pokračovat. V souhrnu je globální oteplování v průměru větší nad pevninou než nad oceány, přičemž v Arktických oblastech je v průměru dvakrát až třikrát větší, oproti celkovému průměru. Vznik globálního oteplování je spojen se spoustou faktorů, přičemž největším z nich, je zvyšující se koncentrace skleníkových plynů v atmosféře a vznik jevu, tzv. skleníkového efektu.

[1]

1.2 Skleníkový efekt

Skleníkový efekt je často skloňován s globálním oteplováním jako jeho příčina, avšak jeho přítomnost pro život na Zemi je velmi důležitá, protože díky němu jsou na Zemi podmínky vhodné k životu. Slunce vyzařuje záření, které se postupně dostává k Zemi a její atmosféře. Jedna třetina tohoto záření je následně odražena atmosférou zpět do Vesmíru a zbytek pronikne a zahřívá svojí energií zemský povrch a atmosféru. Zemský povrch a oceány dále také vyzařují energii zpět, ale část tepelného záření je zachycena atmosférou a odražena zpět k povrchu, a to je podstata skleníkového efektu, díky němuž se na Zemi dokáže udržet relativně konstantní teplota.

Nejdůležitější podstatou skleníkového efektu jsou tzv. skleníkové plyny které svojí přítomností v atmosféře právě způsobují skleníkový efekt.

Vodní pára je nejdůležitější skleníkový plyn a druhý nejdůležitější je CO₂ (Oxid uhličitý). Lidstvo svým chováním, kácením deštných pralesů a spalováním fosilních paliv způsobuje nárůst koncentrace těchto skleníkových plynů atmosféře a způsobuje tím globální oteplování, jelikož při spalování fosilních zdrojů se uvolňuje do ovzduší CO₂ a rostliny jsou schopny pohlcovat CO₂ a vodní páru v procesu zvaném fotosyntéza.

[2]

1.3 Rizika a dopady globálního oteplování

Globální oteplování je spojeno se spoustou klimatických změn, které budou mít vliv na společnost i na přírodu jako takovou.

Globální oteplování o 1,5°C oproti době před průmyslovou revolucí bude mít s největší pravděpodobností tyto dopady:

1.3.1 Extrémní výkyvy počasí a změna klimatu

Dojde k zvýšený počtu srážek v několika regionech stejně tak jako ke srážkovému deficitu a riziku sucha ve spoustě vnitrozemských regionech. Hrozí riziko častějších požárů a také možné roztání ledu v oblastech permafrostu.

[1]

1.3.2 Zvedání hladin moří

S nárůstem teploty souvisí postupné a nenávratné odtávání ledovců, které způsobí nárůst hladiny oceánů, moří až o 0,77m do roku 2100. Hladiny se budou postupně zvedat s vysokou pravděpodobností i po roce 2100 a mohou způsobit až několikametrový nárůst hladin, pokud dojde k roztání většiny pevninských ledovců. Samotná rychlost bude záviset na rychlosti samotného oteplování, ale udržení oteplování pod hranicí 1,5 °C ohrozí oproti oteplení o 2 °C až o 10 milionů lidí méně. Rizika spojená s nárůstem hladin povede k ohrožení spousty obyvatel sídlících v pobřežních oblastech. Mnoho ostrovů zmizí nenávratně pod hladinou moře, v ostatních oblastech budou hrozit silné záplavy a poničení infrastruktury.

[1]

1.3.3 Ztráta mnoha ekosystémů

Studie potvrdili, že dojde také k značnému snížení biodiversity. Až 6 % hmyzu, 8 % rostlin může v budoucnu ztratit až 50 % procent jejich přirozených teritorií při zvýšení teploty o 1,5 °C, což může vést až k jejich kompletnímu vyhynutí. U užitkových zvířat se očekávají problémy s adaptací na zvýšení teploty. S globálním oteplováním dojde také navýšení kyselosti oceánů a snižujícím se obsahem kyslíku ve vodě což povede ke změnám vodních ekosystémů.

[1]

1.3.4 Rizika spojená se zdravím

Předpokládá se, že jakékoliv navýšení teploty s sebou přinese negativa pro lidské zdraví, kdy nejvíce ohroženými budou obyvatelé v chudých oblastech silně závislých na zemědělství. Zvýší se počet lidí ohrožených nemocemi jako je malárie nebo horečka dengue a stejně tak se potenciálně zvětší pásma, které jsou těmito nemocemi postižené. Velká městská sídla budou sužované častými vlnami veder. Ve všech regionech dojde k zmenšení zemědělské

výroby v obilné i živočišné produkci a rybolovu, které budou mít za následek snížení dostupnosti potravin.

[1]

1.4 Politická opatření a mezinárodní smlouvy

Dle Mezivládního panelu pro změny klimatu je nutná mezinárodní spolupráce na omezení produkce skleníkových plynů na minimum a snaha udržet globální oteplování pod hranicí 1,5 °C oproti době před průmyslovou revolucí, které s sebou přináší mnohem menší rizika a dává lidstvu a přírodě větší časový prostor se částečně adaptovat na do budoucna probíhající změny. Mezi nejdůležitější cíle patří ukončit antropogenní produkci oxidu uhličitého a dosažení co největší snížení koncentrace oxidu uhličitého pro snížení důsledků globálního oteplování a její prevenci, proti dalšímu vzniku. Jako snaha o dosažení těchto cílů slouží Kjótský protokol a Pařížská dohoda.

[1]

1.4.1 Kjótský protokol

Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu je jedna z prvních mezinárodních smluv, která byla podepsána roku 1997 v Kjótu a měla za úkol omezit důsledek globálního oteplování. Země, jež protokol podepsaly, se zavázaly, že sníží emise skleníkových plynů o min. 5,2 % oproti roku 1990 do konce prvního kontrolního období, které bylo stanoveno lety 2008 až 2012. V roce 2012 bylo schváleno pokračování protokolu a jeho druhé kontrolní období od roku 2013 až do roku 2020. Všechny členské země EU, včetně České republiky, se zavázaly snížit emise skleníkových plynů do roku 2020 až o 20 % oproti roku 1990. Nedostatkem protokolu je, že jeho součástí nejsou rozvojové a rozvíjející se země jako Čína a Indie, které jsou v současné chvíli největší producenti skleníkových plynů.

[3]

1.4.2 Pařížská dohoda

Pařížská dohoda byla přijata v prosinci 2015 v Paříži. Za úkol má nahradit Kjótský protokol do roku 2020 a snaží se nahradit jeho nedostatky. Jedním z cílů je udržení nárůstu průměrné globální teploty výrazně pod hranicí 2 °C. Na rozdíl od Kjótského protokolu ukládá i rozvojovým státům povinnost jednat za účelem snižování produkce skleníkových plynů do budoucna. Česká republika je součástí smluvních stranou Pařížské dohody od dne 4. listopadu 2017. V současné době nejsou součástí smluvních stran Spojené státy Americké, které roku 2017 ohlásili odstoupení od dohody.

Evropská unie si pro rok 2020 stanovila cíle, v rámci ochrany klimatu, snížit emise skleníkových plynů oproti roku 1990 o 20 %. Také si stanovila, že podíl celkové spotřeby energie bude alespoň z 20 % tvořen energií z obnovitelných zdrojů energie. Jako poslední cíl si EU stanovila zvýšení energetické účinnosti o 20 %. Pro rok 2030 si stanovila další cíle, a to snížení emisí skleníkových plynů o 40 % oproti roku 1990, navýšení podílu energetické účinnosti o celkových 27 % a zvětšit podíl spotřeby energie z obnovitelných zdrojů až na 27 %. Tyto cíle si zavázala skrze směrnice Evropského parlamentu a rady 2012/27/EU o energetické účinnosti. Státy Evropské unie tím zavazovala stanovit si vlastní vnitrostátní cíle do roku 2020 v rámci jejího plnění.

Česká republika si v rámci plnění cílů Evropské Unie související s Pařížskou smlouvou a Kjótským protokolem zvolila své vlastní cíle pro splnění, jelikož produkce CO₂ ekv. klesla v porovnání s referenčním rokem 1990 a rokem 2005 o více než 25%, konkrétně ze 197,5 Mt CO₂ ekv, na 147 Mt. CO₂ ekv. Toto snížení bylo dáno hlavně změnou celkového hospodářství, která proběhla se změnou politické situace v zemi. Celkové hospodářství bylo v zemi zaměřené na těžký průmysl, ze kterého se postupem času začalo ustupovat, přičemž došlo k výraznému posílení sektoru služeb na celkovém hospodářství.

Tyto cíle plynou z dokumentu o Politice ochrany klimatu v ČR, který byl zvolen jako náhrada za dokument Národní program na zmírnění dopadů změny klimatu v České republice z roku 2004 a byl schválen vládou ČR dne 22. března 2017.

Úkoly pro splnění jsou v dokumentu stanoveny takto:

- Snížit emise ČR do roku 2020 alespoň o 32 Mt CO₂ ekv. V porovnání s rokem 2005
- Snížit emise ČR do roku 2030 alespoň o 44 Mt CO₂ ekv. V porovnání s rokem 2005
- Dlouhodobě směřovat k indikativní úrovni 70 Mt CO₂ ekv. Vypouštěných emisí v roce 2040.
- Dlouhodobě směřovat k indikativní úrovni 39 Mt CO₂ ekv. Vypouštěných emisí v roce 2050.

Dle posledních průzkumů byly celkové vyprodukované emise CO₂ ekv. v roce 2016 129,6 Mt, což představuje snížení oproti roku 1990 o 34,4 % a oproti roku 2005 o 11,8 %. Dle záznamů z roku 2016 chybělo pro splnění stanoveného cíle rokem 2020 téměř 14,6 Mt CO₂ ekv. [1], [4], [5], [7]

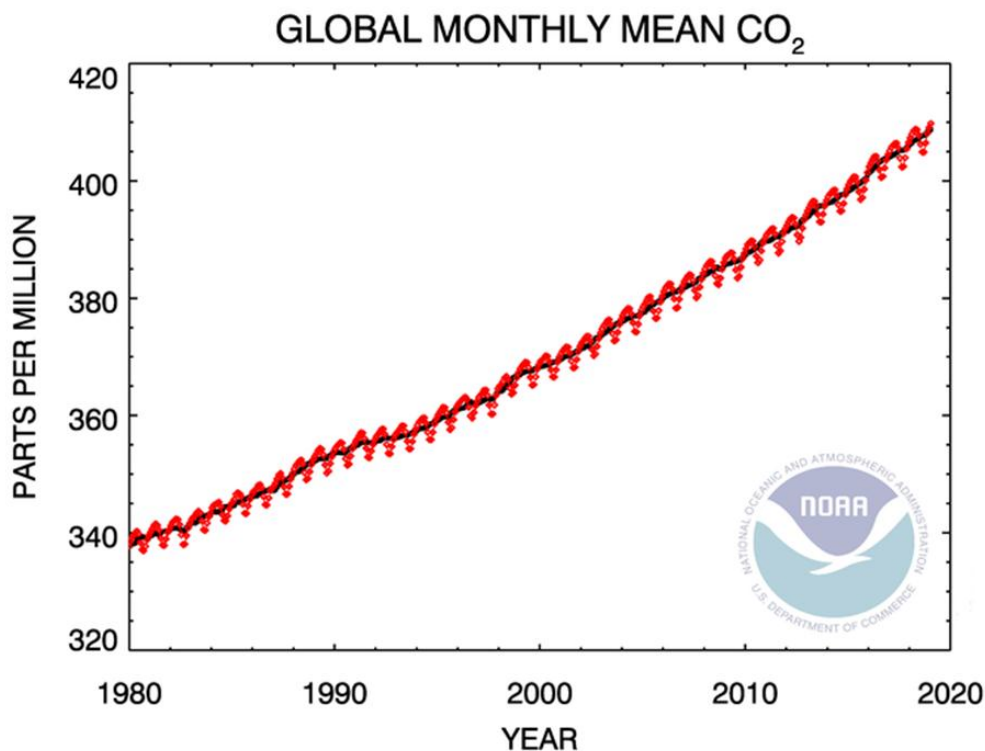
1.5 Oxid uhličitý (CO₂)

CO₂ je bezbarvý plyn bez chuti a bez zápachu. Je tvořen dvěma atomy kyslíku a jedním atomem uhlíku spojenými dvojitou kovalentní vazbou. Je minoritním zástupcem atmosféry, ačkoliv jeho koncentrace neustále narůstá, což má za následek globální oteplování.

1.5.1 Stoupání koncentrace CO₂

Koncentraci CO₂ definujeme jednotkou ppm (parts per milion) vyjadřující množství částic plynu na milion částic vzduchu. V současné době můžeme sledovat obrovský nárůst koncentrace CO₂ oproti začátku sledování. Můžeme také sledovat, že koncentrace v průběhu není stálá, ale naopak fluktuuje kolem určité hodnoty, ale celkový trend v narůstání zůstává stále stejný. Dle meteorologické stanice Amerického národního úřadu pro oceán a atmosféru, Mauna Loa na Havaii, již v roce 2016 překročila koncentrace symbolickou hodnotu 400 ppm. Průměr pro březen 2019 dosáhl 411,97 ppm. Zvyšující se meziróční koncentraci CO₂ můžeme vidět na Obrázek 1.

[6]



Obrázek 1: Graf měsíčního průměru CO₂, vodorovná osa: roky, svislá osa: množství částic CO₂ na milion částic, červená barva: průměrné měsíční hodnoty, černá barva: průměrná měsíční hodnota po korekci pro průměrný sezónní cyklus [6]

1.5.2 Zdroje nárůstu koncentrace

- Největším důvodem nárůstu koncentrace CO₂ v ovzduší je vzrůstající konzumace a produkce elektřiny ve světě související s rozvojem a nárůstem populace. Většina na světě vyrobené elektřiny pochází z fosilních zdrojů, při čemž při jejich spalování se do ovzduší vypouští značné množství CO₂.
- Dalším ze zdrojů vzrůstající koncentrace je do značné míry způsobena dopravním průmyslem a jeho rozvojem.
- S nárůstem koncentrace souvisí i vysoká míra odlesňování deštných pralesů, jelikož vegetace spotřebovává CO₂ při jevu zvaném fotosyntéza.

2 CCS

CCS, Carbon Capture and Storage, je souhrnný název pro technologie zabývající se snižováním produkce oxidu uhličitého ve všech procesech, kde CO_2 vzniká jako vedlejší, nebo odpadní produkt. Jedná se například o cementárny, ocelárny, různé chemické podniky a především elektrárny, které produkují největší podíl CO_2 , ze všech těchto průmyslových podniků.

CCS se zabývá separací CO_2 , dopravou a nakonec i jeho následným ukládáním. Co se týče separace tu můžeme rozdělit do tří oblastí, podle způsobu separace CO_2 na Post-Combustion, Pre-combustion a Oxyfuel.

Tato bakalářská práce se pokusí popsat jednotlivé podoblasti CCS, obsahující všechny možnosti separace, včetně metody dopravy a ukládání.

[8]

2.1 Post-Combustion

Post-combustion technologie se zabývá separací CO_2 z již vzniklých spalin na konci procesu vzniku energie. Tyto technologie je možno využít na současné již plně funkční elektrárny, což přináší určitou výhodu oproti ostatním metodám, které lze aplikovat především na nově vznikající projekty. Mezi současné post-combustion technologie patří chemická absorpce, fyzická absorpce adsorpce, membránová separace a další.

Důležité pro tyto metody je materiál vstupující do procesu separace. Spaliny vystupující z uhelných elektráren mají poměrně vysokou teplotu, velký objem a nízkou koncentraci CO_2 .

[8], [13]

2.1.1 Chemická absorpce

Ukazuje se, že v současné době je chemická absorpce nejvíce preferovanou Post-Combustion technologií, a to především díky vysoké efektivitě zachycování CO_2 , až 95%, a zároveň nízké ceně provozu. Spousta výzkumných pracovišť pracuje na vývoji této technologie a snaží se jí implementovat v daleko větším měřítku, jelikož se předpokládá, že bude nejvíce využívanou technologií pro již plně funkční elektrárny stejně tak jako pro další průmyslové podniky.

Chemická absorpce pracuje s reverzibilní chemickou reakcí různých, rozpouštědel nejčastěji na bázi aminů, s kyselými plyny. Jako jeden ze základních roztoků se považuje roztok monoethanolaminu (MEA), který je zároveň nejvíce rozšířený.

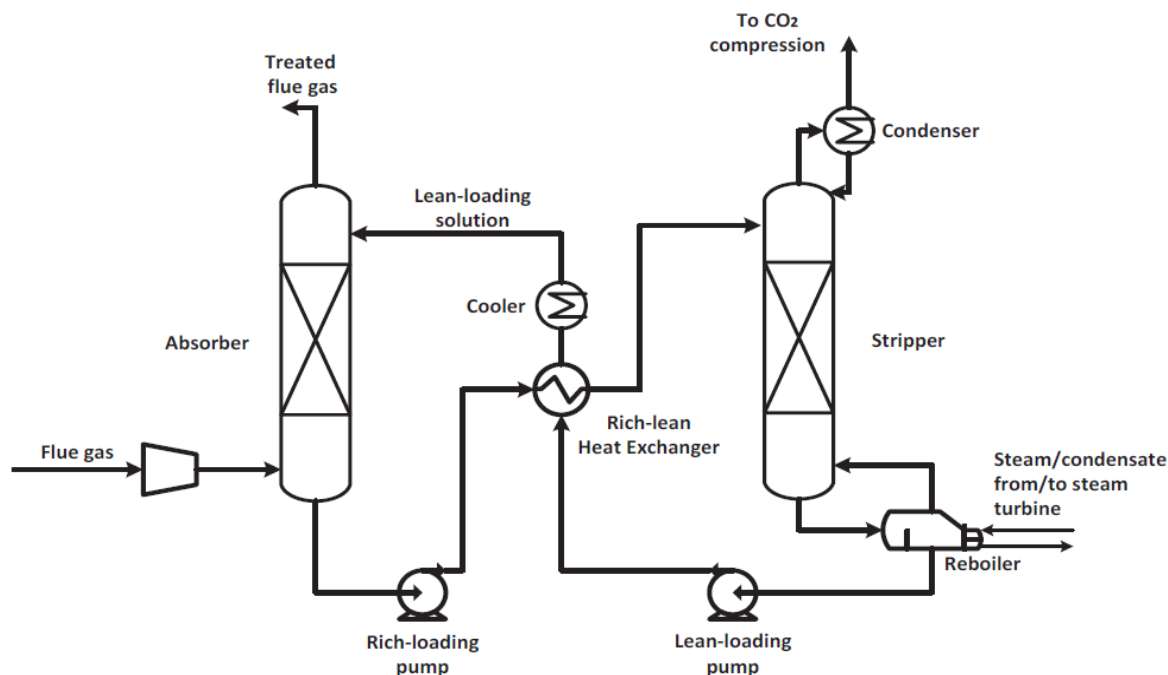
Referenční separační chemickou jednotku s naznačeným postupem můžeme vidět na obrázku 2. Samotná separační jednotka je tvořena dvěma hlavními kolonami, absorberem (Absorber)

a oddělovačem (Stripper). Dále jednotka obsahuje sadu kompresorů, výměníků tepla, kondenzační jednotku pro páru, chladiče atd.

Samotný postup pro většinu chemických roztoků na bázi MEA je stejný. Proud spalin zbavený sloučenin síry a dusíku vstupuje do spodní části první kolony, absorberu. V absorberu se pohybuje průměrná teplota mezi 40 až 60 °C. Uvnitř spaliny proudí ze spodu směrem vzhůru a jako protiproud k nim proudí separační roztok. Většina spalin CO₂ se naváže na molekuly roztoku a společně vytvoří tzv. obohacenou směs. Zatímco spaliny pokračují a jsou nejdříve očištěny o zbytky roztoku, obohacená směs roztoku o CO₂ pak jde přes tepelný výměník do druhé kolony, oddělovače. Zde naopak ze shora proudí obohacená směs proti horké páře, která proudí směrem vzhůru při teplotě cca 100 až 140 °C. Během tohoto procesu se vazba mezi CO₂ a roztokem rozbije a CO₂ je pak proudem páry hnán nahoru. Pára s CO₂ jde do kondenzační jednotky, kde pára zkondenzuje a míří zpět do procesu zatímco zbylý plyn o vysokém obsahu čistého CO₂ (až 99,99% v závislosti na procesu) může být stlačen a připraven k transportu, nebo k uskladnění. Směs roztoku je zde tímto procesem zregenerována, ale má příliš vysokou teplotu, a proto míří dále do tepleného výměníku, kde je opět zchlazena, aby mohla být znovu využita v absorberu a snížila se tak energetická náročnost celého procesu. Dle posledních výzkumů je doporučena hodnota separace CO₂ ze spalin okolo 80-90% v závislosti na použitém roztoku, jelikož při vyšších hodnotách separace dochází ke značnému zvýšení technologických nároků na vybavení a k podstatnému zdražení celého procesu.

Samotnou energetickou náročnost tvoří nejvíce využití páry k regeneraci rozpouštědla a její recyklaci. Dále je energie spotřebovávána na provoz čerpadel, které zajišťují pohyb obohacené směsi a roztoku na chlazení spalin, vstupující do Absorbéru, a páry.

[8], [13], [18]



Obrázek 2: Schéma kolony postcombustion [13]

2.1.2 Fyzická absorpce

Fyzikální absorpce je nejvíce vhodná pro plyny o vysokém tlaku a vysoké koncentraci CO_2 . Proto je nejvíce vhodná pro pre-combustion kde se dosahuje daleko větších tlaků a o použití v oblasti post-combustion se uvažuje pouze okrajově.

CO_2 je z proudu plynu slabě absorbováno v rozpouštědlu za vysokého tlaku a následně při poklesu tlaku dojde ke zpětné regeneraci rozpouštědla. Většina rozpouštědel používaných ve fyzikální absorpci má relativně nízkou afinitu ke kyslíku a oxidům dusíku, avšak jsou poměrně citlivá na přítomnost oxidu siřičitého, který rozpouštědla absorbují. Proto je potřeba oxid siřičitý od plynu před použitím rozpouštědla separovat.

Nejvíce využívaným rozpouštědlem pro fyzickou absorpci je Selexol, který je složen z dimethyletherů a polyethylenglykolu. Dalšími vhodnými, alternativními roztoky jsou Purisol, Rectisol a další.

[8],[18]

2.1.3 Adsorpce

Při adsorpci se CO_2 z proudu plynu postupně usazuje na povrchu pevných rozpouštědel. V současné chvíli se jako rozpouštědla nejvíce používá oxid hlinitý, zeolit nebo aktivní uhlí. Samotný proces adsorpce je možné rozdělit do tří skupin podle toho, jakým způsobem dochází k regeneraci rozpouštědla. Jedním z těchto způsobů je regenerace pomocí změny tlaku.

Plyn obsahující CO_2 postupně proudí skrze rozpouštědlo za nízké teploty a vysokého tlaku. Tento proces trvá dokud není dosaženo rovnovážného stavu a rozpouštědlo již není schopno absorbovat více CO_2 . K regeneraci dochází rozpouštědla dochází postupným snížením tlaku. Druhou možností je regenerace pomocí zvýšení teploty. Tento způsob je poměrně náročný a má několik nevýhod. Nevýhodou je poměrně velká energetická náročnost procesu a čas mezitím, než je rozpouštědlo zregenerováno a může být znovu použito. Třetí možností je také regenerace za pomoci zvýšení teploty, ale k zvýšení teploty se používá elektrický proud, který mění téměř hned všechnu energii v teplo podle Joulova zákona. To je rozdíl oproti obvyklému zvyšování teploty, které nejčastěji využívá teplo z produkce elektrárny.

Pomocí technologie adsorpce je možné separovat až 99% CO_2 ze spalín, ale je poměrně ještě v rané fázi vývoje. Do budoucna je potřeba zvětšit objem, který je tato technologie schopná zpracovat, což je například hlavní nedostatek oproti chemické absorpci. Zároveň je také velmi energeticky náročná, jelikož je potřeba vynaložit velké množství energie na regeneraci rozpouštědla. Využití by tato technologie mohla do budoucna naleznout například v menších elektrárnách, pro které by použití chemické adsorpce nemuselo být z různých důvodů atraktivní.

[8], [18]

2.1.4 Membránová separace

Technologie membránové separace je již používaná v chemickém průmyslu, kdy její hlavní komerční využití je odstraňování CO_2 ze zemního plynu. Technologie membránové separace pracuje dobře za vyšších koncentrací a tlaků CO_2 , avšak spaliny z uhelných elektráren obsahují daleko menší koncentrace 12-14% a jsou vedeny za téměř atmosférického tlaku. Při použití této technologie za atmosférického tlaku není možné dosáhnout stejné efektivity separace, jako je tomu u chemické adsorpce. To přináší nutnost použití kompresorů za účelem zvýšení parciálního tlaku CO_2 . Právě využití kompresorů způsobuje energetickou náročnost celého procesu, která je vyšší oproti použití standardní technologie chemické adsorpce. Nejvíce výzkumu se v současné chvíli podílí na vzniku nových membrán a postupů, které by byly schopny jednak zmenšit energetickou náročnost celého procesu, ale zároveň ho implementovat v dostatečně velkém objemu, který je potřeba v energetickém sektoru.

Princip membránové separace funguje na principu vyrovnávání tlaků, kdy při reakci plynu s povrchem a strukturou membrány jeden materiál disponuje schopností difundovat membránou rychleji než jiný.

Membránový materiál je nejdůležitější složkou při membránové separaci. Dvěma nejdůležitějšími parametry je propustnost a selektivita, které ovlivňují rychlost separace a výslednou koncentraci plynu. Čím vyšší je permeabilita, tím menší velikost membrány je

potřeba. Existují tři základní typy membrán, které dělíme podle materiálu: membrány polymerní, keramické a hybridní.

Polymerní membrány jsou v současnosti zřejmě nejdostupnější typ membrány, jejich výhodou je že disponují teplenou stabilitou, pevností a mohou být produkovány ve vysokém měřítku, naopak jednou z jejich velkých nevýhod je, že pracují pouze za nízkých teplot a tudíž, je potřeba ochlazení spalin na provozní teplotu, což sebou přináší vyšší energetické ztráty.

Pravděpodobně do budoucna nejperspektivnější jsou hybridní membrány. Tyto membrány jsou kombinací klasické polymerní membrány a rozpouštědla. Polymerní membrána tvoří polopropustnou bariéru mezi plynem a rozpouštědlem. Tato membrána má mnoho výhod oproti chemické absorpci, jelikož nedochází k přímému kontaktu proudu spalin a rozpouštědla, což mělo za následek různé provozní problémy.

[8], [13], [18]

2.2 Oxyfuel

Tato technologie používá pro separaci CO_2 spalování paliva za přítomnosti téměř čistého kyslíku, čímž eliminuje přítomnost dusíku a jeho negativní přítomnost ve spalinách. Tato technologie bylo zprvu určena pro produkci CO_2 jako produktu, který byl využíván pro zvýšení efektivity těžby ropy.

Na samotném začátku je separační jednotka, která produkuje téměř čistý kyslík o koncentraci 95 až 99 %. Tento kyslík je následně přiveden k hořákům, kde dojde ke spalování paliva s čistým kyslíkem. Teplota při spalování paliva s čistým kyslíkem se může pohybovat kolem až 3500 °C, což je velmi vysoká teplota oproti maximálním provozním teplotám materiálů, které se v současnosti používají na konstrukci kotlů a turbín. Maximální provozní teploty pro spalování v turbínách se pohybují kolem 1400 °C, a u kotlů okolo 1900 °C. Z tohoto důvodu se s kyslíkem přivádí i proud recirkulovaných výfukových plynů a vody, které slouží k moderování teploty spalování.

Jako výsledek tohoto spalování jsou spaliny obsahující převážně CO_2 a vodní páru. Po následném ochlazení a odstranění vody ze spalin je výsledná koncentrace CO_2 kolem 80 až 98%, v závislosti na použitém palivu. Spaliny také obsahují v menším množství nečistoty jako oxidy síry a dusíku, kyslík atd. Nečistoty se do spalin dostávají ze spáleného paliva, nebo jako součást nedokonale separovaného kyslíku od vzduchu. Tyto nečistoty musí být společně s vodní párou odstraněny ze spalin, aby produkt mohl být následně bezpečně transportován.

Nespornou výhodou je možnost využití této metody pro jak v budoucnu budované elektrárny, tak již postavené a funkční elektrárny a to s pouze malou změnou celkové konstrukce. Další výhodou je, že není potřeba použití nákladné separační jednotky pro CO_2 . Naopak jednou

z nevýhod je nutné vybudování jednotky pro separaci kyslíku, která tvoří až z 60% veškeré energie potřebné pro zachycování CO₂. Pro možné zvýšení výkonu je potřeba použití materiálu, který je schopný operovat při daleko větších teplotách, než je tomu při klasickém spalování pomocí vzduchu. Při použití tepelně odolnějšího materiálu dosáhneme i snížení objemu spalin a páry, který je potřeba použít pro stabilizaci plamene, a tím dosáhneme také zvýšení efektivity. [8],[15],[16],[17]

2.3 Pre-Combustion

Pre-combustion se zabývají technologií, která umožní separaci CO₂ z paliva před jeho spálením.

Základem této metody je reakce klasického paliva se vzduchem, čistým kyslíkem nebo párou za vzniku tzv. syntézního plynu, který obsahuje oxid uhelnatý a vodík. Oxid uhelnatý poté reaguje v katalytickém reaktoru s párou. Produktem této reakce je CO₂ a ještě větší množství vodíku. CO₂ je poté separován od vodíku, stlačen a připraven k transportu. Vodík, který máme na konci této technologie může být využit ve spoustě aplikacích, například ke generování energie.

Tato technologie byla vyvinuta speciálně pro elektrárny typu IGCC(Integrated gasification combined cycle) a NGCC(Natural gas combined cycle). Tyto elektrárny používají ke generaci elektřiny tzv. syntézní plyn který vzniká zplyňováním uhlí v elektrárnách typu IGCC, nebo zemního plynu v NGCC. Syntézní plyn vzniká reakcí klasického paliva s čistým kyslíkem, nebo párou. Tento plyn následně slouží jako palivo, po očištění od nečistot, nejdříve pro plynovou turbínu a teplo z celého procesu je využíváno k produkci páry, která je používána ke generaci elektřiny v parní turbíně a tím se dosahuje účinnosti až 43%.

Pro použití pre-combustion záchytu je k elektrárně IGCC, nebo NGCC připojena jednotka WGS(Water-gas shift), která je tvořena katalytickým reaktorem, ve kterém syntézní plyn reaguje s párou a vytváří jako produkt reakce právě CO₂ a vodík. Dále je připojena sekce která separuje CO₂ od vodíku. CO₂ je poté stlačeno, případně dočištěno a transportováno do uložště. Vodík, který vznikl je dále využíván jako palivo místo samotného syntézního plynu.

Podle většiny předběžných studií použití Pre-combustion tehologií s sebou přináší poměrně velkou ztrátu účinnosti. Ztráty účinnosti vychází značně vyšší pro zemní plyn v NGCC než pro uhlí v IGCC. Snížení účinnosti pro zemní plyn by podle posledních studií mohla dosahovat až 16%, přičemž největší ztráta je způsobená produkcí syntézního plynu, která tvoří 6% procent ze zmíněných 11%. U uhlí vychází celkové snížení účinnosti o 8,2%. Toto snížení je způsobeno hlavně konverzní sekcí, která se podílí na ztrátě účinnosti až z 44%.

Vysoká náročnost konverzní sekce je způsobena tím, že uhlí obsahuje daleko větší obsah CO v syntézním plynu, a tudíž je potřeba daleko většího objemu páry právě v této sekci.

[8], [9]

2.4 Transport

Transport CO₂ je jednou z klíčových věcí pro správné fungování všech CCS systému, jelikož většina zdrojů produkujících CO₂ nebude vždy v přímé blízkosti s daným uložištěm, tudíž bude potřeba přenášet obrovská množství daného plynu na velké vzdálenosti dosahujících až několik stovek kilometrů.

Cestou k implementaci je potřeba vyřešit spoustu technologických a bezpečnostních otázek, které s sebou transportní technika přináší. Samotné CO₂ může být transportováno v tuhém, plynném a tekutém stavu. Do budoucna se počítá se dvěma způsoby přepravy CO₂ na velké vzdálenosti, a to pomocí potrubních systému, a nebo lodní dopravy.

[8], [10], [11], [12]

2.4.1 Potrubní doprava

CO₂ se transportuje za tzv. superkritického stavu (hustý stav), kdy operativní podmínky plynu jsou pro teplotu mezi 15 až 30 °C a pro tlak 10 až 15 MPa. Jeho hustota je v této fázi podobná vodě, ačkoliv ji nemůžeme považovat ani za plyn, ani za tekutinu. Je nutné, aby plyn nedosáhl tzv. kritického bodu, který je 7,38 MPa a 31°C. Jakákoliv další změna, pokles tlaku, nebo nárůst teploty výrazně mění hustotu daného plynu, jelikož chování plynu v tomto stavu nevykazuje lineární změnu hustoty s měnícím se tlakem nebo teplotou. Z tohoto důvodu a vlivu poklesu tlaku v potrubí jsou nainstalovány tlakové stanice po délce potrubí v průměrné vzdálenosti cca. 150 km mezi sebou, které mají za úkol udržovat v potrubí operativní tlak a teplotu.

Z hlediska vlastností plynu je velmi důležité co nejvíce eliminovat množství nečistot, které způsobují značnou korozi na potrubí. Mezi tyto nečistoty patří H₂S, SO₂, N₂, NO_x a voda, která nejvíce ovlivňuje rychlost koroze. Na potrubní dopravu jsou běžně používány uhlíkové oceli, avšak kvůli obsahu nečistot je za potřebí použít korozi odolnou ocel, čímž se ale stavba potrubí značně prodraží. Obsah H₂S je také kritický z důvodu bezpečnosti. Pokud by došlo k úniku plynu z potrubí procházejícího obydlenu oblastí mohlo by to mít devastující účinky. Z tohoto důvodu je potřeba před transportem, při separaci, odstranit tyto nečistoty, hlavně obsah H₂S, a následně odstranit vodu, která se může v CO₂ vyskytovat po předchozích operacích.

Současné funkční potrubní systémy, které by se zabývali transportem CO₂ na větší vzdálenosti jsou hlavně v petrolejovém průmyslu a jsou využívány pro zvětšení výtěžnosti ropy z ložisek. Tento způsob dopravy je používán už od roku 1970 a největší sít bychom

našli v Severní Americe, kde dosahuje délky přes 2500 km a jeho přepravní kapacity jsou přes 50Mt CO₂/rok. Většina těchto potrubí vede neobydlenými oblastmi v hloubce cca 1 metr pod zemí. Z důvodu ochrany obyvatel a v zájmu zamezení jakékoliv přírodní katastrofě, jsou tato potrubí řízena speciální normou. Nejdelší funkční potrubí na světě se jmenuje Cortez, měří 808 km a jeho přepravní kapacita je přes 19 MtCO₂/rok. Pokud bychom uvažovali počet spalín pro průměrnou 1000 MW elektrárnu, že je 7 Mt CO₂ za rok, bylo by toto potrubí schopné odvádět CO₂, téměř ze tří elektráren tohoto typu. Takováto potrubí můžeme najít i jinde ve světě, například v Turecku, nebo Spojených Arabských Emirátech. Všechny tyto potrubí jsou však používána pro zvětšení výtěžnosti z ropných ložisek. V tabulce 1 můžeme vidět seznam funkčních potrubí v provozu.

Pro budoucí aplikaci CCS technologií je potřeba vybudovat hustou síť potrubí, která bude do budoucna vyžadovat vysoké finanční investice do zdokonalení technologie v oblastech bezpečnosti a efektivity dopravy na velké vzdálenosti.

Název potrubí	Lokace	Přepravní kapacita [MtCO ₂ /rok]	Délka [km]	Rok dokončení
Cortez	USA	19,3	808	1984
Sheep Mountain	USA	9,5	660	-
Bravo	USA	7,3	350	1984
Canyon Reef Carriers	USA	5,2	225	1972
Val Verde	USA	2,5	130	1998
Bati Raman	Turecko	1,1	90	1983

Tabulka 1: Souhrn funkčního potrubí používaného pro přepravu CO₂

[8], [12]

2.4.2 Lodní doprava

S lodní dopravou se počítá pro přepravu CO₂ z pobřežních míst, kam bude přivezeno jiným způsobem, nejpravděpodobněji potrubím a dále bude odvedeno do míst pro uskladnění na moři, jelikož se předpokládá s možností uskladnění velkého množství CO₂ v hlubokomořských dutinách. Jednou z jejích hlavních výhod by měla být schopnost využití jednoho typu plavidla pro dopravu z více míst do více míst vhodných k budoucímu uskladnění.

CO₂ je převáženo v kapalném stavu ve velkých tlakových nádobách. Tato technologie je dnes velmi známa a plně používaná pro přepravu zkapalněného zemního plynu nebo zkapalněného ropného plynu z přístavu do přístavu. Nespornou výhodou je, že konstrukce nádob pro přepravu kapalného CO₂ se nijak neliší od konstrukcí nádob používaných pro přepravu

kapalného LPG nebo LNG, tudíž je možná jejich okamžitá výroba. Nejmodernější přepravní lodě dosahují přepravní kapacity až 200,000 m³.

Samotný proces dopravy začíná tankováním, kdy nejdříve jsou tankery naplněny plynným CO₂ aby nedošlo ke kontaminaci kapalného CO₂ a tvorbě suchého ledu. Následně jsou plněny kapalným CO₂ z prozatímního skladu. Během následující cesty tankery ztratí až 4% z celkového nákladu CO₂ na 1000 km, z důvodu zachování bezpečného tlaku uvnitř samotných přepravních komor a zároveň emisemi z paliva spáleného motory lodí. Po dosažení místa uložení je zkapalněný CO₂ vypumpován ven z přepravní komory a nahrazený opět plynným CO₂ o vysokém tlaku pro zachování sterility nákladového prostoru.

[8], [11]

2.4.3 Železnice

Jednou z diskutovaných možností přepravy byla železniční doprava, která se doposud používala pro přepravu LPG, LNG a také v menším množství pro přepravu CO₂ pro potravinářský průmysl. Tato možnost byla ale brzy zavrhnuta, jelikož nemohla dosahovat dostatečného přepravního objemu, který je potřeba, a zároveň v porovnání s potrubní dopravou byly průměrné náklady na provoz dvakrát vyšší.

[8]

2.5 Uskladnění CO₂

Uskladnění je klíčový a koncový prvek celého CCS. Vzhledem k obrovskému množství vznikajících emisí je důležitá otázka týkající se právě konečného uložení. Je potřeba najít metody pomocí kterých by bylo ukládání možné a pokud možno zhodnotit i teoretické velikosti možných úložných struktur.

V současné chvíli můžeme metody ukládání CO₂ rozdělit do dvou skupin, podle geologického měřítko. První skupinou je ukládání CO₂ do geologických struktur. Druhá skupina se zabývá hlubokomořským ukládáním.

[8]

2.5.1 Skladování v geologických strukturách

Skladování v geologických strukturách funguje na principu injektací CO₂ pod vysokým tlakem do horninových struktur, aniž by došlo k pozdějším únikům do atmosféry.

Proto aby bylo geologické uložení vhodné právě pro ukládání je potřeba aby splňovalo určité požadavky. Musí být zajištěna dostatečná kapacita, která je daná velikostí porů v hornině, také je potřeba dostatečná propustnost ložisek k zajištění dostatečné rychlosti injektace

a jako poslední, ale především musí být zajištěna nepropustnost těsnících vrstev, aby nedocházelo k pozdějším únikům.

V současné chvíli je skladování v geologických strukturách nejvíce preferovaným postupem z hlediska skladování CO₂. Oproti hlubokomořskému skladování má několik nesporných výhod, jako je daleko menší ekonomická náročnost skladování, daleko menší nároky na budování dopravní infrastruktury, a také zpětná nepropustnost.

[8], [19]

2.5.1.1 Slané akvifery

Slané akvifery jsou geologické vrstvy, které obsahují lehce či silně slanou vodu. V současné chvíli jsou tato místa považována za místa s největším potenciálem pro budoucí ukládání, jelikož jsou zdaleka ze všech potenciálních uložišť nejrozšířenější, disponují velkým objemem a mají vysokou propustnost. Většina akviferů se nachází hluboko v sedimentárních pánvích.

Jakmile začne pronikat do horniny superkritické CO₂, začne okamžitě reagovat se slanou vodou. CO₂ má menší hustotu než slaná voda v akviferu, tudíž má tendenci v uložišti stoupat. Z vrchu musí být CO₂ zadrženo nepropustnou vrstvou horniny, která zabrání úniku. To je hlavní mechanismus pro ukládání CO₂ a nazývá se strukturální. Další mechanismus je reziduální zachycení, kdy vstříkované CO₂ velkou rychlostí vytlačuje kapalinu z pórů, která se následně vrací a zadržuje CO₂ v pórech. Třetí ze čtyř mechanismů je, že CO₂ se začne rozpouštět ve slané vodě a je v ní vázáno. Poslední mechanismus se nazývá mineralizace. Během tohoto procesu CO₂ reaguje s vodou a s minerály v uložišti, kdy mezi nimi dochází ke geochemické reakci a CO₂ je následně uvězněno v pevné fázi.

Jedním z nedostatků akviferů je, že ke vhodným místům není vybudována dostatečná infrastruktura a také, že během ukládání nevzniká žádný vedlejší produkt, který by se dal dále využít, jako je tomu například u ložisek ropy a zemního plynu.

[8], [19]

2.5.1.2 Vyčerpané ložiska ropy a zemního plynu

Tyto místa uložení mají velkou výhodu, že k nim často již vede potřebná infrastruktura včetně technického zázemí, která zde byla využívána k předchozí těžbě. Toto technické zázemí lze s malými úpravami používat místo původního těžení ropy, nebo zemního plynu k ukládání CO₂. Zároveň mají tato místa poměrně velkou uskladňovací kapacitu, jejich lokalita, velikost a další specifika jsou již velmi dobře zmonitorovány a ze samotné podstaty ložiska je poměrně velká jistota, že nebude docházet k nechtěnému úniku CO₂.

Další výhodou je, že CO₂ se již v současné chvíli používá také ke zvýšení efektivnosti těžby ropy nebo zemního plynu, která se dále zpracovává. To by mohlo do budoucna snížit celkové náklady spojené s transportem a ukládáním, což by do budoucna mohlo být ekonomicky výhodné.

[8], [19]

2.5.1.3 Nevytěžitelná ložiska uhlí

Ložiska uhlí obsahují poměrně velké množství pórů, díky nimž jsou schopny absorbovat plyny. Většinu plynů absorbovaných v uhlí tvoří metan. Díky tomu, že má uhlí větší afinitu k CO₂, než k metanu může CO₂ metan v uhlí nahradit a uvolnit metan z mřížky, který lze následně čerpat a využít, stejně jako je tomu při využití CO₂ ke zvýšení efektivity těžby z ropných ložisek. Použití CO₂ může uvolnit až 90% metanu, který je v uhlí obsažen, což je o 40% více než při použití dosavadních konvenčních technologií.

Tento fakt by mohl do budoucna také snížit teoretické náklady na ukládání CO₂

[8], [19]

2.5.1.4 Skladování ve formě hydrátu

Při přítomnosti CO₂ a vody za zvýšeného tlaku a nízkých teplot může vznikat tzv. hydrát CO₂. Mechanismus skladování používá právě vzniklý hydrát k vytvoření nepropustné vrstvy, která by nadále bránila úniku CO₂ z ložiska.

Nevýhodou tohoto skladování je potřeba vysokého tlaku a nízké teploty, která musí být menší než 10 °C. Takováto místa bychom našli například pod tlustou vrstvou permafrostu, která však jsou často ve velmi odlehlých oblastech..

[19]

2.5.1.5 Využití pro geotermální energii

Jako jedním z okrajových, využití se jeví použití CO₂, jako pracovní kapaliny pro geotermální energii. CO₂ za specifických podmínek disponuje stejně jako voda stejnými tepelnými vlastnostmi, ale má daleko menší viskozitu, větší stlačitelnost a rozpínavost.

[19]

2.5.2 Hlubokomořské skladování

Jako druhá z možností pro skladování CO₂ se jeví Světový Oceán, který pokrývá více jak 70 % Zemského povrchu s průměrnou hloubkou 3,8 km. Oceány již absorbovaly téměř třetinu kumulativních emisí CO₂ od průmyslové revoluce. Antropogenní emise byly uloženy většinou ve svrchních vrstvách oceánů a snížili pH o 0,1 stupně, avšak hodnota pH se nijak nezměnila ve větších hloubkách. Dle matematických modelů tato metoda umožňuje

uskladnění a izolaci CO₂ v horizontu několika stovek až tisíce let v závislosti na podmořských proudech, lokálních teplotách a hloubce uskladnění, avšak do budoucna se počítá, že dojde v k vyrovnání koncentrací uskladněného CO₂ mezi oceánem a atmosférou. Z hlediska efektivity existuje několik způsobů jak skladovat CO₂ v oceánech. Pravděpodobné ukládání bude probíhat za pomoci lodí, které převezou CO₂ na vestavěné plošiny s pomocí kterých bude CO₂ ukládáno, nebo sami pomocí tažných trubek budou vypouštět postupně náklad. Jako méně pravděpodobné se jeví použití potrubního systému vedeného z pevniny rovnou k místu uložení.

Jednou z možností je nechat CO₂ se postupně rozpouštět ve vodě v hloubkách od 2500 m, kde kapalné CO₂ tvoří oblak kapek, který je postupně unášen a rozpouštěn ve vodě.

Druhou možností je vytváření hlubokomořských jezer z kapalného CO₂ v hloubkách větších než 3000 m. CO₂ je v hloubce 3000 m těžší než vzduch, má tendenci klesat na mořské dno a vyplňovat různé prohlubně. Z vytvořeného jezera dochází k opožděnému rozpouštění CO₂ z svrchních vrstev jezera, a tudíž se jeví jako ideální různé příkopy a prohlubně, které mohou výrazně prodloužit dobu uskladnění až na tisíce let. Jako dalším klíčovým prvkem jsou podmořské proudy, které vzhledem k tomu, že jezera nemají žádnou fyzickou bariéru mohou odnášet CO₂ a tím snížit celkovou dobu teoretického uskladnění.

Z hlediska ochrany životního prostředí jsou tyto metody ve společnosti vnímány velmi kontroverzně, jelikož mění pH vody a její hustotu, což má negativní dopad na faunu, která je na změny pH velmi citlivá.

Tato metoda vyžaduje poměrně velké množství investic do vybudování infrastruktury a velké množství času s vyhledáváním potenciálně nejvhodnějších míst pro uskladnění. V současnosti zatím byly tyto metody pouze laboratorně testovány v menších měřítkách a nedošlo k žádnému většímu využití této metody.

[8], [19]

3 Popis modelového zdroje s implementací vybrané CCS technologie

V této krátké části se pokusíme popsat modelový zdroj a jeho parametry před a po implementaci technologie CCS. Informace o snížení účinnosti a procentuální podíl zachyceného CO₂ následně použijeme v bilanci emisí skleníkových plynů z výroby elektřiny v ČR.

Jako modelový zdroj poslouží modernizovaný blok 250 MWe elektrárny Pruněřov II. Elektrárna Pruněřov je největší elektrárenský komplex v ČR, leží na západním okraji severočeské hnědouhelné pánve kousek od Chomutova. Jedná se o uhelné elektrárny, které využívají jako palivo hnědé uhlí. Vlastníkem a provozovatelem komplexu je společnost ČEZ.

Pruněřovský komplex se dělí na dvě části Pruněřov I a Pruněřov II. Pruněřov I byla uvedena zprovozněna mezi lety 1967 a 1968 a obsahovala šest 110 MWe bloků. Následně byly mezi lety 1987 a 1992 zrekonstruovány čtyři bloky a zbývající dva odstaveny z provozu. Elektrárna Pruněřov II., která je v současnosti nejmladší uhelnou elektrárnou, kterou provozuje společnost ČEZ, měla původně pět 210 MW bloků. Všechny bloky byly zprovozněny od roku 1982 a mezi roky 2012-2016 prošli tři z původních bloků komplexní obnovou a instalovaný výkon každého bloku je 250 MWe.

[20]



Obrázek 3: Ilustrační foto elektrárny Pruněřov I a II [20]

3.1 Popis elektrárny před instalováním technologie CCS

Během komplexní obnovy byly postupně obnoveny tři z pěti původních bloků a navýšen výkon každého bloku na 250 MWe, přičemž tím byla navýšena životnost elektrárny o 25 let.

Při rekonstrukci byl nainstalován do každého bloku nový kotel PG575 od společnosti Víkovice Power Engineering. Kotel má jmenovitý tepelný výkon 524,36 MW, teplota přehřáté páry dosahuje 575 až 580°C a tlak přehřáté páry je 18,165 MPa. Tento kotel je průtlačný, dvoutahový s přímým foukáním uhelného prášku přímo do hořákových sekcí a byl vybrán, jelikož je schopný pracovat i s méně kvalitním uhlím které se v dané oblasti těží právě pro chod elektrárny. Pro přípravu uhelného prášku slouží šest ventilátorových mlýnů a pro zapalování a stabilizaci hoření šest plynových hořáků na zemní plyn. Při rekonstrukci byly nainstalovány nové elektrostatické odlučovače popílku, přes které prochází spaliny a poté putují do odsiřovací jednotky. Nové elektrostatické odlučovače popela mají účinnost minimálně 99,94%.

Jako součást obnovy byla i rekonstrukce dané odsiřovací jednotky. Spaliny jsou svedeny do jednotlivých Absorbérů sloužících pro jednotlivé bloky, kde dochází čištění spalin od SO₂, SO₃ a kyselin HCL a HF. Spaliny jsou čištěny protiproudem suspenze absorbentu. Jako daný absorbent pro odsiřovací jednotky se používá vápenec a produkt odsíření je sádrovec CaSO₄.

Elektrárna spaluje hnědé uhlí, které je dodáváno do elektrárny z lomů Nástup-Tušimice. Uhlí je do elektrárny dopravováno za pomoci železnice. Jako hodnotuvýhřevnosti paliva budeme pro budoucí výpočet považovat $Q_{i \text{ hnědé uhlí}} = 9,9 \text{ MJ/kg}$.

Strojovna byla vybavena novými turbínami společnosti Doosan Škoda Power o výkonu 250 MWe. Turbíny jsou rovnotlaké kondenzační s přihříváním páry a každá z nich je vybavena 8 neregulovanými odběry a jedním regulovaným odběrem páry. Parametry modelového elektrárenského bloku před zavedením technologie CCS jsou v tabulce 2.

[20]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Výkon bloku	MWe	250
Vlastní spotřeba	MWe	24
Produkce CO ₂	Kg CO ₂ / kg spáleného uhlí	0,986
Účinnost zachycení CO ₂	%	0
Emise CO ₂ do ovzduší	Kg CO ₂ / kg spáleného uhlí	0,986
Zachyceného CO ₂	Kg CO ₂ / kg spáleného uhlí	0
Výroba elektřiny	MWe	226
Výsledná celková účinnost	%	38,4

Tabulka 2: Parametry modelového bloku před zavedením technologie CCS

3.2 Použitá technologie CCS

V naší modelové elektrárně byla použita metoda chemické absorpce, post-combustion, s použitím roztoku amoniaku jako pracovního roztoku.

Amoniak navzdory tomu, že je jedovatý a korozivní má z hlediska CCS technologie výhodné vlastnosti. Je oproti roztoku MEA schopný zachytit 3 větší množství CO₂, má vyšší stabilitu a energie potřebná na regeneraci roztoku je daleko menší v porovnání s MEA. Amoniak může být také použit pro separaci NO_x, SO_x a dalších nečistot ze spalin, a produkovat tak vedlejší produkty, jako je například dusičnan amonný, které mohou být následně použity jako hnojiva.

Schéma separační jednotky pro amoniak je stejné jako je na obrázku 2. Na začátku zachycovacího cyklu je potřeba vstupující spaliny, jež byly v předchozí operaci odsířeny, zchladit na teplotu kolem 37 °C. V absorbéru je CO₂ zachyceno z proudu spalin zachyceno pomocí protiproudu roztoku amoniaku za teploty nižší, než 20 °C a tlaku okolí. Roztok obohacený o zachycené CO₂ je poté veden do oddělovače, kde dochází k regeneraci roztoku pomocí páry za vysoké teploty kolem 100 °C a tlaku 2 až 4 MPa. CO₂ je poté stlačeno a připraveno k transportu, nebo uložení.

Během zachycování je spousta procesů, které spotřebovávají energii. Tato spotřebovaná energie negativně ovlivňuje účinnost elektrárny. Mezi tyto procesy patří chlazení spalin vstupujících do absorbéru, chlazení zregenerovaného roztoku a absorbéru. Také je energie spotřebovávána na regeneraci roztoku pomocí páry čerpadla, která zajišťují pohyb pracovní kapaliny. Dopady technologie CCS můžeme vidět v tabulce 3.

[21]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Výkon bloku	MWe	238
Vlastní spotřeba	MWe	24
Vlastní spotřeba CCS	MWe	50
Produkce CO ₂	Kg CO ₂ / kg spáleného uhlí	0,986
Účinnost zachycení CO ₂	%	90
Emise CO ₂ do ovzduší	Kg CO ₂ / kg spáleného uhlí	0,099
Zachyceného CO ₂	Kg CO ₂ / kg spáleného uhlí	0,887
Výroba elektřiny netto	MWe	164
Výsledná celková účinnost	%	27,9

Tabulka 3: Parametry modelového bloku po zavedení CCS technologie

4 Bilance produkce emisí CO₂ z výroby elektřiny ve velkých zdrojích v rámci ČR a potenciál jejich snížení pomocí vybrané technologie CCS.

4.1 Cíle bilance

Jako cíl této bilance je určit jakou mírou lze snížit emise CO₂ z výroby elektřiny, pomocí dané CCS technologie, při různých stupních zachycení a jaký bude mít zachycení celkový dopad na energetický sektor. Ze zadaných hodnot pro použitou CCS technologii vidíme, že dochází při použití ke snížení účinnosti výroby elektřiny. To má za následek, že pokud chceme vyprodukovat stále stejné množství elektřiny pomocí tepelných, musíme spálit více uhlí a vyprodukovat tím také větší množství CO₂. Jedním z výstupů této bilance by mělo být zhodnocení k jak velkým energetickým ztrátám dochází při různé úrovni zachycení, zároveň kolik uhlí by bylo potřeba dodatečně spálit, aby produkce elektřiny byla zachována na stejné úrovni, popř. o kolik je potřeba navýšit výrobu z obnovitelných zdrojů. Dalším důležitým cílem je stanovit, jak moc použití technologií CCS může pomoci ke splnění cílů, které si ČR ohledně ochrany klimatu stanovila.

4.2 Produkce elektřiny za rok 2016

Celkový instalovaný výkon v ČR dosahoval v roce 2016 20,1 GWe, z toho 11,38 GWe tvoří elektrárny spalující fosilní paliva a produkující při výrobě CO₂. Další zdroje co se týče instalovaného výkonu tvoří jaderné elektrárny s 4,3 GWe, vodní elektrárny s 2,1 GWe, solární elektrárny s 2,1 GWe a větrné s 282 MWe.

Produkce elektřiny v ČR dosahovala k roku 2016 úrovně 83,3 TWh. Z toho nejvíce elektřiny bylo vyprodukováno ze hnědého uhlí v uhelných elektrárnách, celkem 36,2 TWh, což tvoří 43,5 % z celkové produkce elektřiny. Druhý největší zdroj elektřiny tvoří jaderné elektrárny, které vyrobili v úhrnu 24,1 TWh, což tvoří 28,9 % z celkové produkce elektřiny. Podíl výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů na celkové spotřebě se v posledních letech ustálil na 13%.

Celkové hodnoty produkce elektřiny vzhledem k palivům vidíme v tabulce 4. V tabulce jsou paliva, která svým spalováním produkují CO₂ označena hnědou barvou. Jejich celkovým součtem dostaneme hodnotu 48,6 TWh. S touto hodnotou budeme v naší bilanci počítat a pro zjednodušení budeme uvažovat situaci, že veškerá tato elektřina byla vygenerována spalováním hnědého uhlí.

[22]

Zdroje elektřiny	[GWh]	[%]
Celková produkce elektřiny v ČR za rok 2016 ze všech zdrojů	83 301,9	100,00%
Hnědé uhlí	36 228,1	43,49%
Jaderné palivo	24 104,2	28,94%
Černé uhlí	5 719,9	6,87%
Zemní plyn	3 422,2	4,11%
Ostatní plyny	3 036,2	3,64%
Bioplyn	2 600,5	3,12%
Fotovoltaické	2 131,5	2,56%
Biomasa	2 067,4	2,48%
Vodní	2 000,5	2,40%
Přečerpávací	1 201,5	1,44%
Větrné	497,0	0,60%
BRKO	98,6	0,12%
Ostatní pevná paliva (mimo BRKO)	78,3	0,09%
Odpadní teplo	46,0	0,06%
Topné oleje	44,3	0,05%
Ostatní kapalná paliva	25,0	0,03%
Ostatní	0,8	0,00%
Koks	0,0	0,00%
Paliva produkující CO ₂	48 600,8	58,34%

Tabulka 4: Podíl jednotlivých paliv na celkové produkci elektřiny v ČR za rok 2016 [22]

4.3 Produkce CO₂ ekv. v ČR

4.3.1 CO₂ ekv.

Každý skleníkový plyn je co se týče svého významu na globální oteplování porovnáván s CO₂ a následně je stanoven koeficient, kterým jeho množství vynásobíme abychom získali jeho množství vyjádřené v kg CO₂ ekvivalentního, které poté můžeme použít pro stanovení celkového objemu skleníkových plynů. Například: vypuštěním 1 kg metanu(CH₄) se rovná vypuštění 25 kg CO₂ do ovzduší. Pod tímto textem můžeme vidět příklady koeficientů některých skleníkových plynů v tabulce 5.

Jelikož samotné CO₂ má koeficient „1“, je hmotnost zachyceného CO₂ získané v bilanci rovno CO₂ ekv., tudíž můžeme tyto hodnoty uvažovat, jako o hodnoty o které došlo ke snížení původní produkce CO₂.

[8]

Plyn	koeficient
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

Tabulka 5: příklad koeficientů některých skleníkových plynů, pro stanovení objemu CO₂ ekv.[8]

4.3.2 Samotná produkce CO₂ ekv.

V České republice se za rok 2016 vyprodukovalo 129,6 kt CO₂ ekv. Z toho tvořilo samotné CO₂ 106,5 kt. Oproti roku 1990, kdy produkce CO₂ ekv. tvořila 197,5 kt. Došlo ke snížení o 34,38 % a ke snížené CO₂ samotného z 164,2 kt o 35,12 %. Největší objem z produkovaných emisí je produkován v energetickém sektoru, který zastupuje veškeré procesy ve kterých dochází ke spalování paliva. Energetický sektor je zastoupen produkcí elektřiny, tepla, dopravou atd. Pro nás je důležitá produkce samotného CO₂ ve výrobě elektřiny. Dle zdrojů vychází, že hmotnost produkovaného CO₂ z výroby elektřiny bez spalování biomasy, má hodnotu 46 845 kt CO₂. Tuto hodnotu následně použijeme pro porovnání s hodnotou z výpočtu, kterou získáme stanovením množství CO₂ vzniklého produkcí elektřiny z tabulky č. 4.

[23]

4.4 Vstupní hodnoty do bilance

Na začátku budeme pracovat se vstupními hodnotami technologie, které nám byly zadány. Pro bilanci budeme potřebovat množství uhlí, které se na produkci elektřiny spálí a množství CO₂, které spalováním vznikne. Množství CO₂, které spalováním vznikne porovnáme s naší známou hodnotou CO₂, které v ČR bylo vyprodukováno právě na produkci elektřiny, abychom věděli, jestli se naše hodnota od této příliš neliší. Pro budoucí bilanci budeme uvažovat, že veškeré palivo, které se na produkci elektřiny využije bude pouze hnědé uhlí.

- Výhřevnost hnědého uhlí činí cca $Q_{i \text{ hnědé uhlí}} = 9,9007 \text{ MJ/kg}$
- Při spálení kg uhlí vznikne cca 0,986 kg CO₂
- Při použití CCS jsme schopni zachytit 90 % CO₂ vzniklého ze spáleného uhlí
- Při nepoužití CCS dosahujeme účinnosti 38,4 %
- Při využití CCS technologie dosažená účinnost klesne na 27,9 %
- Produkce elektřiny z fosilních zdrojů za rok 2016 byla 48 600,8 GWh
- Elektřina byla vyrobena spalováním pouze hnědého uhlí

4.5 Spáleného uhlí na kWh

Pro další výpočty budeme potřebovat hmotnost spáleného paliva na produkci 1 kWh.

$$Q = m \cdot H \cdot \eta$$

- $Q \text{ [J]} \dots\dots\dots 1\text{kWh} = 3\,600\,000 \text{ J}$
- $m \text{ [kg]} \dots\dots\dots$ hnědé uhlí použité pro
- $Q_{i \text{ hnědé uhlí}} = 9,9 \text{ MJ/kg}$
- Účinnost: $\eta_{\text{bez CCS}} = 0,384$, $\eta_{\text{CCS}} = 0,274$

$$m = \frac{Q}{\eta_{bez\ CCS} \cdot H_{hnědé\ uhlí}} = \frac{3\ 600\ 000}{0,384 \cdot 9,9 \cdot 10^6} = 0,947\ kg$$

$$m = \frac{Q}{\eta_{s\ CCS} \cdot H_{hnědé\ uhlí}} = \frac{3\ 600\ 000}{0,274 \cdot 9,9007 \cdot 10^6} = 1,303\ kg$$

Z výsledků vychází že, na produkci 1 KWh bez použití technologie CCS je potřeba spálit 0,974 kg hnědého uhlí a 1,303 kg při použití CCS technologie.

4.6 Celkově spáleného uhlí a vyprodukovaného CO₂ z výroby elektřiny

- Produkce elektřiny za rok 2016 z fosilních zdrojů = 48 600,8 GWh
- Spotřeba uhlí bez CCS = 0,947 kg/kWh = 0,947 kt/GWh
- Produkce CO₂ = 0,986 kg CO₂/ kg hnědého uhlí = 0,986 kt CO₂/ kt hnědého uhlí

$$\begin{aligned} \text{spotřeba hnědého uhlí [kt]} \\ &= \text{množství elektřiny [GWh]} \cdot \text{spotřeba uhlí} \left[\frac{\text{kt}}{\text{GWh}} \right] \\ &= 48\ 600,80 \cdot 0,947 = 46\ 020,23\ \text{kt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vyprodukovaného CO}_2 \text{ [kt]} \\ &= \text{objem spáleného uhlí [kt]} \cdot \text{produkce CO}_2 \left[\frac{\text{kt CO}_2}{\text{kt hnědého uhlí}} \right] \\ &= 46\ 020,23 \cdot 0,986 = 45\ 375,08\ \text{kt} \end{aligned}$$

Z výpočtů jsme získali množství hnědého uhlí, které by bylo potřeba spálit, abychom vyprodukovali stejné množství elektřiny jako v roce 2016, konkrétně se jedná o 46 020,23 kt. Dale jsme získali objem spalin CO₂, který vznikne spálením právě uvažovaného hnědého uhlí, což vychází 45 375,08 kt CO₂. Naši vypočítanou hodnotu jsme porovnali s hodnotou, která odpovídá dle statistických analýz produkci CO₂ z výroby elektřiny v ČR. Naše hodnota se od hodnoty 46 845 kt CO₂ liší o 3,24 %, což není vzhledem k tomu, že jsme uvažovali jako palivo pouze hnědé uhlí velký rozdíl a ověřili jsme si tím, že naše výsledky bilance lze uvažovat jako adekvátní. V bilanci zachyceného CO₂ budeme pracovat s právě námi vypočtenou hodnotou.

[23]

4.7 Bilance

V uvedené bilanci byly použity hodnoty pro zachycení 20, 40, 60, 80 a 90 procent z původních 45 375,08 kt CO₂. Výsledky bilance můžeme vidět v tabulkách č. 6, 7 a 8. V tabulce č. 6 vidíme jaké množství kt CO₂ je potřeba zachytit k požadované hodnotě procentuálního zachytu. Ke každé hodnotě zachytu je uvedena také o jaké množství v GWh a procentech klesne produkce elektřiny v porovnání s rokem 2016.

Vzhledem k snížení produkce nastává otázka, jakým způsobem lze nahradit elektřinu, k jejímuž snížení použitím CCS technologie došlo. Jako jednou z možností se jeví použití obnovitelných zdrojů energie. Tato kompenzace je uvážena také v tabulce č. 6, kde jsou pod zelenou barvou uvedeny hodnoty o kolik procent by se musela současná produkce elektřiny z OZE navýšit. Jako druhá uvažovaná možnost je navýšit výrobu spálením více uhlí. Tyto metody jsou uvedeny v tabulkách č. 7 a 8, kde je také uvedeno o kolik je nutné spálit více uhlí a o kolik procent se zvýší jeho roční spotřeba. Tabulka č.7 obsahuje výsledky, které bychom získali, pokud by zbytek elektřiny byl získán bez použití CCS technologií, jen prostým spalováním bez dodatečného zachytu. Naopak v tabulce č.8 jsou uvedené hodnoty pro případ, kdy pro produkci elektřiny byla použita technologie CCS s 90% zachycením veškerých emisí.

Další důležitou hodnotou a cíl, kterého jsme chtěli dosáhnout je o kolik procent klesne celková produkce emisí v ČR, ze 129,6 kt CO₂, při různé úrovni zachycení. Tyto hodnoty jsou uvedeny ve všech tabulkách modrou barvou.

% CO ₂ zachyceného z původní produkce	20%	40%	60%	80%	max. 90%
zachyceno CO ₂ [kt]	9 075	18 150	27 225	36 300	40 859
vypuštěno CO ₂ [kt]	36 300	27 225	18 150	9 075	4 516
spáleného uhlí skrze technologie CCS [kt]	10 221	20 443	30 664	40 885	46 020
spáleného uhlí bez technologií CCS [kt]	35 799	25 578	15 356	5 135	0
celkově spáleného uhlí [kt]	46 020	46 020	46 020	46 020	46 020
produkce elektřiny [GWh]	45 649	42 697	39 745	36 793	35 311
snížení produkce elektřiny v porovnání s r. 2016 o [GWh]	2 952	5 904	8 856	11 807	13 290
procentuální snížení produkce elektřiny v porovnání s r. 2016 o [%]	6,07%	12,15%	18,22%	24,29%	27,35%
navýšení produkce elektřiny z OZE o %	27,86%	55,71%	83,57%	111,42%	125,42%
snížení produkce CO ₂ v procentech oproti celkové produkci CO ₂ ekv. v roce 2016	7,00%	14,01%	21,01%	28,01%	31,53%

Tabulka 6: Tabulka bilance požadované procentuální hodnoty zachytu

% CO2 zachyceno	20%	40%	60%	80%	max. 90%
potřeba vyrobit elektřiny navíc [GWh]	2 952	5 904	8 856	11 807	13 290
spáleno uhlí navíc [kt]	2 795	5 590	8 385	11 180	12 585
vyprodukováno CO2 navíc [kt]	2 756	5 512	8 268	11 024	12 408
Celkově spáleno uhlí [kt]	48 776	51 532	54 288	57 044	58 428
Spáleno uhlí v porovnání s r. 2016	105,99%	111,98%	117,97%	123,95%	126,96%
celkově vyprodukováno CO2 [kt]	48 131	50 887	53 643	56 399	57 783
výsledné snížení produkce CO2 v porovnání s produkcí CO2 ekv. v r. 2016 o [kt]	6 319	12 638	18 957	25 276	28 451
výsledné procentuální zachycení CO2	13,93%	27,85%	41,78%	55,71%	62,70%
výsledné snížení produkce CO2 v procentech proti celkové produkci CO2 ekv. v roce 2016	4,88%	9,75%	14,63%	19,51%	21,96%

Tabulka 7: produkce chybějící elektřiny bez použití technologie CCS

% CO2 zachyceno	20%	40%	60%	80%	max. 90%
potřeba vyrobit elektřiny navíc [GWh]	2 952	5 904	8 856	11 807	13 290
spáleno uhlí navíc [kt]	3 847	7 694	11 541	15 389	17 321
zachyceno CO2 [kt]	3 416	6 831	10 247	13 663	15 379
vypuštěné CO2 [kt]	378	755	1 133	1 510	1 700
celkově spáleno uhlí [kt]	49 867	53 714	57 562	61 409	63 341
Spáleno uhlí v porovnání s r. 2016	108,36%	116,72%	125,08%	133,44%	137,64%
celkově vyprodukováno CO2 [kt]	49 168	52 961	56 755	60 548	62 453
výsledné snížení produkce CO2 v porovnání s produkcí CO2 ekv. v r. 2016 o [kt]	8 697	17 395	26 092	34 790	39 159
Výsledné procentuální zachycení CO2	19,17%	38,34%	57,50%	76,67%	86,30%
výsledné snížení produkce CO2 v procentech proti celkové produkci CO2 ekv. v roce 2016	6,71%	13,42%	20,14%	26,85%	30,22%

Tabulka 8: produkce chybějící elektřiny s max. použitím technologie CCS(zachycení 90% CO2)

4.8 Zhodnocení bilance

Pokud se podíváme na množství zachyceného CO₂, můžeme vidět, že už při zachycení 40% původní produkce CO₂, bez uvažování o výrobě chybějící elektřiny z dalších zdrojů, přinese splnění snížení produkce CO₂ stanovené ČR pro rok 2020. Dále také můžeme vidět, že zachycení 60% z původní produkce CO₂ již přinese splnění cíle pro rok 2030. Naopak, při jakémkoliv dalším stupni záchytu nejsme schopni dosáhnout dlouhodobých cílů stanovených pro rok 2040 a 2050 o maximální produkci CO₂, které jsou pro rok 2040 max.70 Mt CO₂ ekv. a pro rok 2050 39 Mt CO₂ ekv. Tudíž pro splnění těchto cílů je potřeba uvažovat i o dalších zdrojích emisí a možnostech jejich snížení.

Dále v bilanci můžeme vidět, že dochází k poměrně vysokému snížení produkce elektřiny, která se pohybuje ve velikosti od 6,07 až do 27,35 procent, v závislosti na množství

zachyceného CO₂. Pokud bychom tyto ztráty chtěli doplnit z obnovitelných zdrojů energie, byla potřeba navýšit produkci z těchto zdrojů na úrovni začínající od 27,86 do 125,42 procent, v závislosti na předchozím zachycení, což jsou již poměrně nezanedbatelné hodnoty.

Pokud bychom chybějící produkci elektřiny chtěli doplnit z fosilních zdrojů, tak „v závislosti na uvažovaném postupu s, nebo bez použití technologií CCS dochází k navýšení celkové roční spotřeby uhlí. Toto navýšení, které se pohybuje na úrovni od necelých 9%, při zachycení původních 20% produkovaných emisí a bez použití CCS, až do necelých 38%, při maximálním použití CCS. To může vést ke zvýšení ceny za elektřinu a také ke zvýšení objemu CO₂, které během procesu výroby vznikne. Výsledný objem vzniklých emisí ovlivňuje původní cíl snížení produkce emisí, což je vidět v tabulkách č. 7 a 8. Zároveň dodatečným zachycením CO₂ je navýšeno množství plynu, které je potřeba transportovat a dále uskladnit.

5 Závěr

Snížování emisí skleníkových plynů je jedním z nejdůležitějších prvků, jakými můžeme zmírnit následky nevyhnutelného globálního oteplování. Většina mezinárodních organizací si tento fakt uvědomuje a snaží se pomocí mezinárodních smluv přimět jednotlivé státy, aby přijímaly opatření, která by vedla k omezení produkce skleníkových plynů z fosilních zdrojů. Jednou z možností, jak produkci skleníkových plynů omezit se jeví použití technologií CCS.

Tato bakalářská práce se v první části snažila uvést různé metody CCS technologií pro separaci CO₂. Vysvětluje také, jakým způsobem může být separované CO₂ transportováno a porovnávala možná potenciální uložení, co se týče jejich výhod a nevýhod.

Druhá část práce se snažila ukázat jakým způsobem ovlivní užití dané CCS technologie výkon modelového zdroje z hlediska účinnosti výroby elektřiny.

Ve třetí části jsou použity informace o modelovém zdroji a využity ke stanovení bilance emisí CO₂ z výroby elektřiny v rámci ČR a potenciál jejich možného snížení pomocí dané CCS technologie. Z výsledků bilance můžeme usoudit, že použití technologií CCS v energetickém sektoru je účinným způsob, jakým omezit produkci skleníkových plynů. Jejich použití s sebou nese poměrně velké snížení účinnosti produkce elektřiny. To má za následek její zdražení. Pokud je naším dalším cílem, aby množství vyrobené elektřiny z uhelných zdrojů zůstalo na stejné úrovni, musí dojít ke zvýšení roční spotřeby uhlí a tím i logické zvýšení roční produkce CO₂. Jednou z možností, jak deficit vyrobené elektřiny nahradit, je použití jiných zdrojů, například obnovitelných zdrojů energie, avšak to vyžaduje zvýšení podílu obnovitelných zdrojů paliv na celkové výrobě elektřiny, čehož do budoucna nemusíme snadno dosáhnout.

I když použití CCS technologií v sektoru výroby elektřiny přináší snížení emisí skleníkových plynů, produkce skleníkových plynů, ze všech ostatních procesů spalujících fosilní paliva zůstává nadále stejná, například v sektoru dopravy. Tyto procesy mohou posloužit, jako další oblasti, ve kterých by CCS technologie mohly být teoreticky dále využity, avšak to by vyžadovalo velké investice do budoucího vývoje a průzkumu.

6 REFERENCE

- [1] *Global warming of 1.5°C: Summary for Policymakers*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2018. ISBN 978-92-9169-151-7.
- [2] EAGLE, Robert Guthrie a Joost Alois BUSINGER. *An introduction to atmospheric physics*. 2d ed. New York: Academic Press, 1980. ISBN 0-12-260355-9.
- [3] Ministerstvo životního prostředí České republiky: Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2016 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/kjotsky_protokol
- [4] Ministerstvo životního prostředí České republiky: Pařížská dohoda [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2016 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/parizska_dohoda
- [5] Ministerstvo životního prostředí České republiky: Politika ochrany klimatu v ČR [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2016 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/\\$FILE/OEOK-POK-20170329.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/$FILE/OEOK-POK-20170329.pdf)
- [6] Earth System Research Laboratory: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide [online]. Hawawii: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019. [cit. 2019-04-3]. Dostupné z: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>
- [7] *EVROPSKÁ KOMISE: EVROPSKÁ UNIE: Opatření EU v oblasti klimatu* [online]. Brussels: European Commission, 2016. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_cs
- [8] *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage* [online]. New York: Cambridge University Press, 2005 [cit. 2019-06-07]. ISBN 13 978-0-521-68551-1. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
- [9] JANSEN, Daniel, Matteo GAZZANI, Giampaolo MANZOLINI, Eric van DIJK a Michiel CARBO. Pre-combustion CO₂ capture. *International Journal of*

Greenhouse Gas Control [online]. 2015, **40**, 167-187 [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.05.028. ISSN 17505836. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583615001917>

- [10] NEELE, Filip, Robert DE KLER, Michiel NIENOORD, et al. CO2 Transport by Ship: The Way Forward in Europe. *Energy Procedia* [online]. 2017, **114**, 6824-6834 [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1813. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217320155>
- [11] GOLDTHORPE, Ward a Shabana AHMAD. Policy Innovation for Offshore CO2 Transport and Storage Deployment. *Energy Procedia*[online]. 2017, **114**, 7540-7549 [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1886. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217320891>
- [12] PATCHIGOLLA, Kumar a John E. OAKLEY. Design Overview of High Pressure Dense Phase CO2 Pipeline Transport in Flow Mode. *Energy Procedia* [online]. 2013, **37**, 3123-3130 [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.198. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610213004414>
- [13] WANG, Yuan, Li ZHAO, Alexander OTTO, Martin ROBINIUS a Detlef STOLTEN. A Review of Post-combustion CO2 Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. *Energy Procedia* [online]. 2017, **114**, 650-665 [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1209. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217313851>
- [14] BHOWN, Abhoyjit S. Status and Analysis of Next Generation Post-combustion CO2 Capture Technologies. *Energy Procedia* [online]. 2014, **63**, 542-549 [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.059. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214018748>
- [15] ZHENG, Chuguang, Zhaohui LIU, Jun XIANG, Liqi ZHANG, Shihong ZHANG, Cong LUO a Yongchun ZHAO. Fundamental and Technical Challenges for a Compatible Design Scheme of Oxyfuel Combustion Technology. *Engineering* [online]. 2015, **1**(1), 139-149 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.15302/J-ENG-2015008. ISSN 20958099. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095809916300546>

- [16] UCHIDA, Terutoshi, Takahiro GOTO, Toshihiko YAMADA, Takashi KIGA a Chris SPERO. Oxyfuel Combustion as CO₂ Capture Technology Advancing for Practical use - callide Oxyfuel Project -. *Energy Procedia*[online]. 2013, **37**, 1471-1479 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.022. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610213002658>
- [17] LOCKWOOD, Toby. A Compararitive Review of Next-generation Carbon Capture Technologies for Coal-fired Power Plant. *Energy Procedia* [online]. 2017, **114**, 2658-2670 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1850. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217320520>
- [18] GLOBAL CCS INSTITUTE : *Types of CO₂ Capture technology* [online]. 2011 [cit. 2019-05-9]. Dostupné z: <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/co2-capture-cement-industry/34-types-co2-capture-technology>
- [19] AMINU, Mohammed D., Seyed Ali NABAVI, Christopher A. ROCHELLE a Vasilije MANOVIC. A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy* [online]. 2017, **208**, 1389-1419 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.015. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917313016>
- [20] ČEZ: *Elektrárna Prunéřov* [online]. CEZ GROUP, Praha, 2017 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrany/cr/prunerov.html>
- [21] GLOBAL CCS INSTITUTE: *Aqueous or Chilled Ammonia Process* [online]. 2011 [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/gaseous-emissions-amine-based-post-combustion-co2-capture-processes-and-their-deep-22>
- [22] *Energetický regulační úřad: Roční zpráva o provozu ES ČR 2016* [online]. Praha: Energetický regulační úřad, 2016 [cit.2019-06-06] .Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5

- [23] *National Greenhouse Gas Inventory Report of the Czech Republic (reported inventories 1990- 2016)* [online]. Praha: Czech Hydrometeorological Institute, 2018 [cit. 2019-06-07].ISBN 978-80-87577-82-0. Dostupné z:
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/nis/NIR/CZE_NIR-2018-2016_UNFCCC_ISBN.pdf