

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**ASPEKTY INTEGRACE CCS
TECHNOLOGIE POST-
COMBUSTION DO FOSILNÍHO
ENERGETICKÉHO ZDROJE V
PODMÍNKÁCH ČR**

2019

**VOJTĚCH
SLÁMA**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:..... podpis autora:

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sláma** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **458423**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Aspekty integrace CCS technologie post-combustion do fosilního energetického zdroje v ČR

Název bakalářské práce anglicky:

Assessment of the post-combustion CCS technology integration into fossil power plants in the Czech Republic

Pokyny pro vypracování:

Proveďte zhodnocení vybraných aspektů integrace CCS technologie na bázi post-combustion do vybraného zdroje na fosilní paliva v ČR.

Práce bude obsahovat:

- 1) Rešerši legislativy EU a ČR v oblasti snižování emisí CO₂ z energetických zdrojů se zaměřením na EU ETS systém
- 2) Rešerši technologií zachytu, transportu a skladování CO₂ (tzv. CCS) na bázi post-combustion aplikovatelné pro energetické zdroje
- 3) Zhodnocení vlivu začlenění CCS technologie do vybraného fosilního energetického zdroje pomocí zvolených technických kritérií (účinnost výroby elektřiny, spotřeby paliva)
- 4) Stanovení vybraných parametrů provozní ekonomie zdroje s i bez CCS (CAPEX, OPEX, cena za separovanou a emitovanou tunu CO₂ výrobní cenu elektřiny)

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

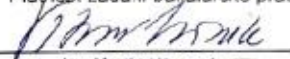
Ing. Monika Vitvarová, ústav energetiky FS

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

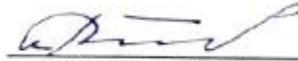
Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

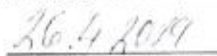

Ing. Monika Vitvarová
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, Dr.Sc.
podpis děkana/ky

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Vojtěch Sláma
Název BP:	Aspekty integrace CCS technologie post-combustion do fosilního energetického zdroje v podmínkách ČR
Anglický název:	Assessments of the post- combustion CCS Technology Integration into fossil power plant in the Czech Republic
Akademický rok:	2018/2019
Ústav/Obor	Ústav Energetiky/Energetika a procesní technika
Vedoucí BP:	Ing. Monika Vitvarová
Bibliografické údaje:	Počet stran: 57 Počet obrázků: 17 Počet tabulek: 17 Počet příloh: 1
Klíčová slova:	CCS, POST-COMBUSTION, EMISNÍ POVOLENKA, TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ
Keyword:	CCS, POST-COMBUSTION, EMISSION ALLOWANCES, TECHNICAL-ECONOMIC ASSESSMENT

Anotace

Tato práce se zabývá aspekty integrace CCS do zdroje na fosilní paliva v podmínkách ČR. V práci jsou identifikovány základní pilíře tzv. nízkouhlíkové energetiky, systém obchodování s emisními povolenkami a základní rešerše potenciálních technologií CCS se zaměřením na technologii typu Post-Combustion. Součástí práce je technicko – ekonomická analýza hodnotící integraci CCS technologie na bázi amoniakové vypírky do modelového paroplynového zdroje. Pro zdroj byl vytvořen samostatný bilanční model v softwarovém prostředí Cycle Tempo 5.0.

Abstract

This work deals with the aspects of integration of the CCS technology into the fossil fuel energy source in the conditions of Czechia. This work contains an identification of foundation pillars of low carbon energetics, allowances trade market and recherche of potential main CCS technologies with a focus on the Post-Combustion technology. Furthermore, the work contains technically – economic analysis evaluating the integration of CCS technology based on chilled ammonia capture into the model NGCC source. For the NGCC source a balance model was developed in the software environment of Cycle Tempo 5.0.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat paní Ing. Monice Vitvarové za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled.

Obsah

Úvod	9
1 Cíle pro ochranu klimatu.....	10
1.1 Mezinárodní politika.....	10
1.2 Vnitrostátní politika	10
2 Nástroje pro regulaci CO ₂	14
2.1 Obchodování a význam emisních povolenek	14
2.2 Obchodovací období emisních povolenek.....	16
2.3 MSR	16
2.4 Obchodovací období 2021 – 2028	17
3 CCS technologie.....	19
3.1 Záchyt CO ₂	20
3.1.1 Pre-Combustion	20
3.1.2 Oxyfuel	21
3.1.3 Post-Combustion (PCC)	22
3.2 Zhodnocení tří základních skupin technologie CCS.....	23
3.3 Transport a ukládání CO ₂	24
4 Způsoby provedení technologie PCC.....	26
4.1 Absorpce pomocí chemických solventů	26
4.2 Kryogenní separace.....	26
4.3 Membránová separace	27
4.4 Zhodnocení separačních metod PCC.....	27
5 Chemické solventy	28
5.1 Výběr solventu.....	28
5.2 Záchyt pomocí chlazeného amoniaku.....	29
6 Popis modelového zdroje na fosilní paliva	31
6.1 Vstupní parametry modelového zdroje pro softwarové prostředí Cycle Tempo 5.0.....	31

6.2	Popis vstupních parametrů dalších technologií souvisejících s integrací CCS technologie.....	34
6.3	Složení spalín.....	36
7	Výsledky výpočtu v softwarovém prostředí Cycle Tempo 5.0.....	39
7.1	Výsledky zdroje bez technologie CCS	39
7.2	Výsledky zdroje s technologií CCS	39
8	Ekonomické zhodnocení	41
8.1	Stanovení ekonomických parametrů.....	42
8.1.1	Stanovení referenční ceny elektřiny	42
8.2	Stanovení referenční ceny zemního plynu.....	43
8.2.1	Stanovení Referenční ceny EUA	44
8.2.2	Stanovení investičních nákladů na technologii zachytu a zdroje	44
8.3	Stanovení výrobní ceny silové elektřiny a ceny separované tuny CO₂	45
8.4	Výpočet NPV a citlivostní analýza klíčových parametrů	48
8.5	Citlivostní analýza	49
8.5.1	Citlivostní analýza zdroje bez CCS	49
8.5.2	Citlivostní analýza zdroje s CCS	50
8.5.3	Zhodnocení citlivostních analýz zdrojů.....	50
	Závěr	52
	Seznam zdrojů	53
	Seznam obrázků.....	56
	Seznam tabulek.....	57
	Seznam Zkratk	57

Úvod

Cílem této bakalářské je shrnout poznatky a přinést základní informace o problematice tzv. nízkouhlíkové energetiky v ČR a zhodnocení jejího implementačního potenciálu, respektive technologií do nich spadající v kontextu ČR.

Vyhodnocení potenciálu, a i samotné fungování nízkouhlíkové, energetiky se opírá o několik základních pilířů. Ty jsou vymezeny v mnoha rovinách, v řešeném případě především geopolitickou situací a tlakem na výrobce energií a tepla ze strany odběratelů, ale i laické veřejnosti na snižování vypouštěných emisí CO_2 , NO_x , SO_x , TZL a těžkých kovů (Hg). Nejvýraznější otázkou jsou emise CO_2 a jejich možný dopad na globální oteplování. Základním nástrojem pro snižování emisí CO_2 , je pak emisní povolenka a schválené cíle pro objem výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie (OZE) a cíle pro snižování emisí CO_2 v následujících letech (s vizemi do roku 2030 a 2050).

Tato práce se tedy bude zabývat rešerší současných trendů v evropské energetice a jejich dopady na ČR. Primárně se zaměří na nastavení emisních cílů EU, mezinárodní dohody a memoranda, jakožto i na regulatorní mechanismy ovlivňující potenciál a rentabilitu nízkouhlíkových opatření. V druhé části budou představeny možné technologie pro snižování CO_2 ze stávajících fosilních zdrojů se zaměřením na technologie CCS (tzv. Carbon Capture and Storage). Pro vybraný modelové energetický zdroj (paroplynový zdroj spalující zemní plyn (ZP)) bude vytvořen bilanční a ekonomický model a provedena zjednodušená technicko – ekonomická analýza integrace vybrané technologie CCS na bázi post-combustion. V závěru bude zhodnocen potenciál uplatnění modelového zdroje CCS v podmínkách ČR.

1 Cíle pro ochranu klimatu

Zásady, mezinárodní dohody a formy spolupráce sloužící k efektivnímu dosažení ochrany klimatu vychází ze základní struktury dohod mezi jednotlivými státy nebo uskupeními jednotlivých států a můžeme je rozdělit na dvě základní kategorie, a to na mezinárodní politiku a politiku jednotlivých států. V principu na mezinárodní úrovni vzniká dohoda/memorandum, jehož výstupem je určitý cíl, který mají jednotlivé státy splnit, např. Kjótský protokol. Další jednotlivá státní uskupení, např. EU, případně jednotlivé státy pak pro splnění cílů přizpůsobují svoji politiku.

1.1 Mezinárodní politika

Základním a první pilířem je Rámcová úmluva OSN o ochraně klimatu z roku 1992, vycházející z Vídeňského (1985) a Montrealského protokolu (1987) o ochraně ozónové vrstvy. Rámcová úmluva tak poskytuje mezinárodní rámec pro vyjednávání o změnách klimatu a snižování emisí. [12]

Další navazující dohody jsou jak Kjótský protokol 1997, který již stanovuje cíle snižování emisí skleníkových plynů, tak poslední Pařížská dohoda, kterou (ostatně jako všechny předcházející úmluvy) Česká republika ratifikovala.

Velkou úlohu pak v politice snižování emisí hrají směrnice Evropské Unie (EU), které určují jednotlivé konkrétní cíle pro členské státy. Směrnice schválené Evropským parlamentem a Radou EU se dále transponují do právního prostředí jednotlivých států EU. Schválené směrnice EU stanoví závazné cíle, avšak forma, jakou jednotlivé státy směrnici transponují do svého právního prostředí a realizují její naplnění, zůstává v roli jednotlivých členských států. V Bakalářské práci (BP) budou podstatné směrnice týkající se nízkouhlíkové energetiky uvedeny.

1.2 Vnitrostátní politika

Vnitrostátní politika ochrany klimatu vychází především z mezinárodních dohod, do kterých musíme řadit i cíle dané evropskými směrnicemi. Ty by měla ČR zohledňovat a přizpůsobovat jim svoji vnitrostátní energetickou politiku za účelem plnění těchto požadavků.

Jako základní závazky můžeme označit následující tři hlavní priority [1]:

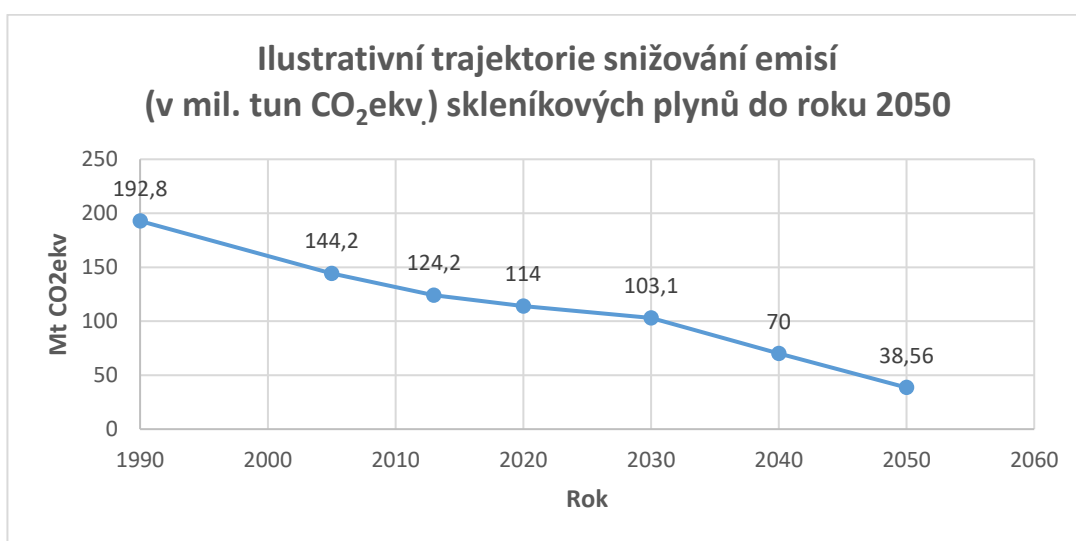
- Snížit emise skleníkových plynů o 20 % z emisí vypuštěných v roce 1990
- Snížit emise skleníkových plynů o 40 % z emisí vypuštěných v roce 1990
- V rámci dlouhodobého plánu se počítá s přechodem na nízkoemisní hospodářství a snížení emisí o 80 – 95 % z emisí vypuštěných v roce 1990

V návaznosti na výše uvedené převzaté cíle si ČR definovala v rámci tzv. Politiky ochrany klimatu v České republice (schválena usnesením vlády č. 207 ze dne 22. března 2017) vlastní cíle pro snížení emisí skleníkových plynů opět na dvě kategorie uvedené v tabulce: *Tabulka 1-1*.

Hlavní cíle Politiky ochrany klimatu v ČR	Dlouhodobé indikativní cíle Politiky ochrany klimatu v ČR
Snížit emise ČR do roku 2020 alespoň o 32 Mt CO ₂ ekv. v porovnání s rokem 2005	Směřovat k indikativní úrovni 70 Mt CO ₂ ekv. vypuštěných emisí v roce 2040
Snížit emise ČR do roku 2030 alespoň o 44 Mt CO ₂ ekv. v porovnání s rokem 2005	Směřovat k indikativní úrovni 39 Mt CO ₂ ekv. vypouštěných emisí v roce 2050

Tabulka 1-1: Cíle Politiky pro ochranu klimatu v ČR [1]

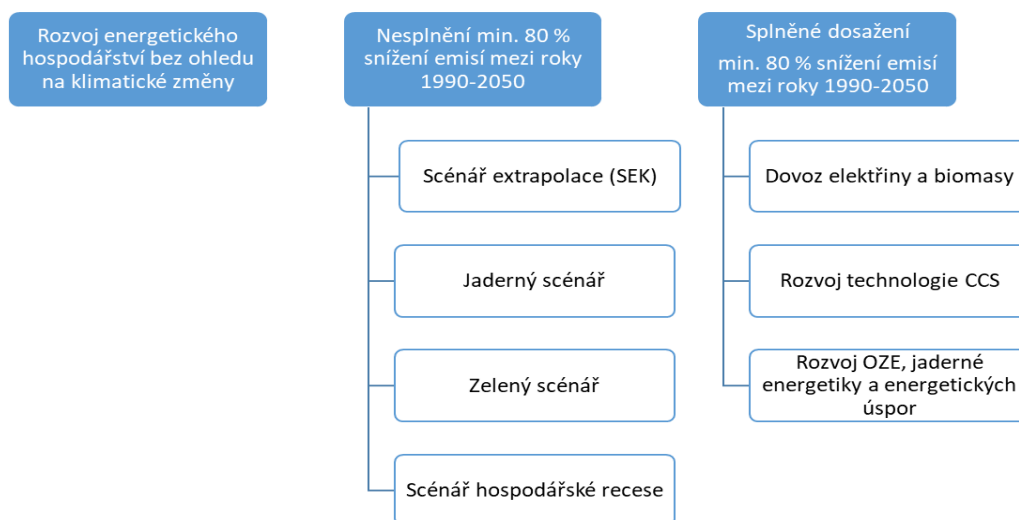
Následující graf ilustruje, jak by mělo probíhat snižování emisí CO₂. Základní hodnota ukazuje, že v roce 1990 bylo emitováno 192,8 mil tun CO₂ekv. Pro splnění cíle pro rok 2050 je potřeba toto číslo snížit o 80 % - cca 156 tun CO₂ekv.



Obrázek 1-1: Ilustrativní trajektorie snižování emisí [1]

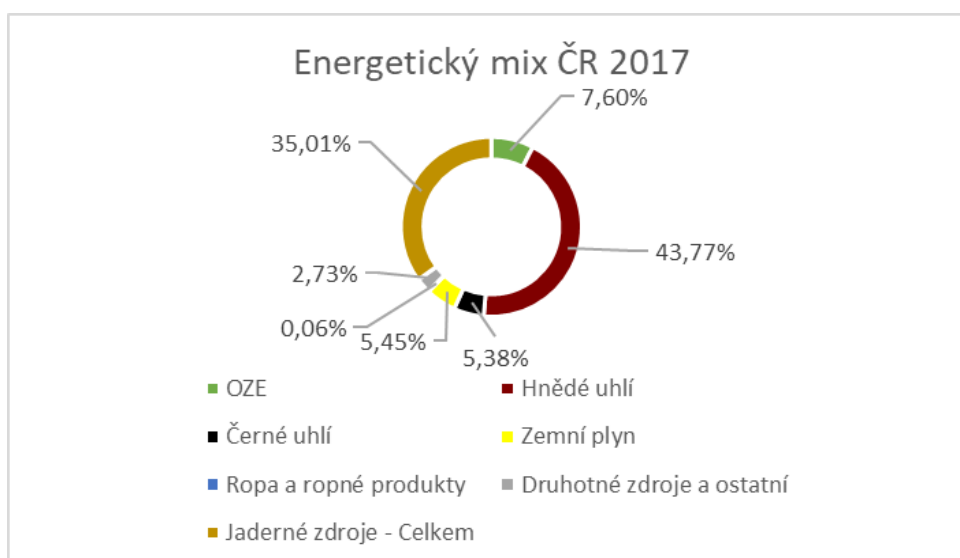
Z hodnot grafu ilustrativního snižování emisí skleníkových plynů je zřejmé, že si situace vyžaduje strukturální opatření pro splnění cíle v roce 2050. Proto byl vyhotoven plán na snížení emisí CO_2 , viz *Obrázek 1-2*.

Ze zprávy o Politice ochrany klimatu v ČR vyplývá, že bude potřeba dosáhnout vysoce strukturálních změn. Proto je pro ČR počítáno s následujícím schématem scénářů, které poskytují příslušnou variabilitu řešení.



Obrázek 1-2: Politika ochrany klimatu v ČR [2]

Takto radikální snížení nemusí být pro ČR jednoduchý cíl, podíváme-li se na energetický mix ČR (*Obrázek 1-3*). Jak je vidět z příloženého grafu, energetika ČR je založena především na energii z fosilních paliv a energie z jaderných elektráren. Proto bude snižování emisí na tak nízkou úroveň výzva a splnění závazku pro rok 2050 si bude



Obrázek 1-3: Energetický mix ČR 2017 [3]

vyžadovat velké změny. Nevýhodou pro ČR je nízký potenciál v rozvoji OZE. Státní energetická koncepce (SEK) počítá s podílem výroby energie z OZE na celkové spotřebě až 23 % do roku 2050.

2 Nástroje pro regulaci CO₂

Jak ji bylo zmíněno, globální politické směřování míří ke snižování emisí skleníkových plynů oproti hodnotám naměřeným v roce 1990. Klíčovým nástrojem pro snižování emisí skleníkových plynů jsou v rámci EU jsou jednak nastavované cíle podílu vyrobené elektřiny z OZE, dosahování energetických úspor a dále pak represivním nástrojem – Evropskou emisní povolenkou (EUA – European Union Allowance) pod záštitou systému evropského obchodování (EU ETS – European Union Emissions Trading System).

2.1 Obchodování a význam emisních povolenek

Emisní povolenku musí uplatňovat každý provozovatel stacionárního zdroje znečištění a to za emitovanou tunu CO₂. Pravidla a právní předpisy pro nakládání s emisními povolenkami vychází ze směrnice 2003/87/EC o vytvoření systému pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů ve Společenství a o změně směrnice Rady 96/61/ES. [20]

Emisní povolenky se začaly obchodovat v roce 2005 a mají tak za sebou mnohaletý vývoj. Pro názornost bude lepší představit si časovou osu vývoje emisích povolenek (*Obrázek 2-2*), obchodovací období a jaké směrnice původní směrnici 2003/87/EC upravovali (heslovitě) spolu s přidruženými jednotlivými obchodovacími obdobími.

Cena emisních povolenek je pro provozovatele finanční zátěží a při vysoké ceně EUA může dojít až ke znevýhodnění celého provozu zařízení. Vývoj ceny tedy musí provozovatelé (emitenti) sledovat, případně predikovat jejich cenu a celkový ekonomický dopad na provoz energetického zařízení.

System EU ETS vychází z praxe ze Spojených Států Amerických, kde na konci 70. let 20. století dosáhli významné emisivity skleníkových NO_x a DO_x do ovzduší a jejich následným snížením významně přispěli ke zlepšení kvality vzduchu. Proto, aby se množství emisí redukovalo, byl uměle vytvořen trh s emisními povolenkami (cap and trade). [5]

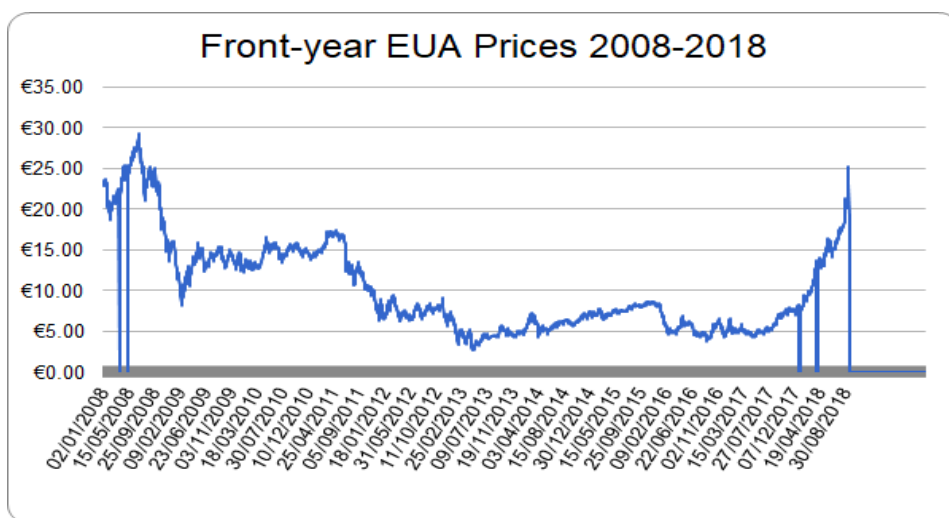
EU ETS je tedy uměle vytvořené tržní prostředí s úmyslem regulovat vypouštěné emise. Subjekty, spadající do poslední upravující směrnice vycházející z již zmiňované 2003/87/EC, jsou nuceny uplatňovat povolenky na každou vypuštěnou tunu (v tomto případě) CO₂.

Povolenky může emitör nabýt dvěma různými způsoby, a to buď obdržéním volně přidělené povolenky nebo nákupem povolenky na trhu. Určitá část povolenek se tedy vždy přidělí a další je potřeba nakoupit formou aukce na trhu. Toto opatření má motivovat emitory k investicím do opatření snižující emise. Povolenky jsou rozdělovány na základě tzv. grandfatheringu, což znamená, že výpočet počtu přidělených povolenek probíhá z historicky naměřených dat. V průběhu obchodovacího období se pak množství emitovaných povolenek snižuje = motivace pro investice (viz *Obrázek 2-3*). [5]

Přidělenou povolenku lze použít dvěma různými způsoby, a to užít povolenku na tunu CO_2 , nebo jako emitör ušetřenou povolenku, kterou neuplatním, prodat na trhu. Ušetření tuny CO_2 tak v sobě nese jak ušetřený náklad, tak zisk, který je potřeba v investiční rozvaze vždy zvažovat.

Příložený graf (*Obrázek 2-1*) ukazuje cenu vývoje ceny povolenek od roku 2008 až do ledna 2019. Při náhledu na další stranu lze sledovat jaké vlivy působily na cenu povolenky a jaká nápravná opatření měla na cenu vliv. Z grafu (viz *Obrázek 2-1*) lze na první pohled konstatovat, že cena povolenky se pohybovala po většinu doby ve velmi nízkých hodnotách. To mělo za následek zásahy do tržního prostředí a zavedení regulatorních mechanismů, které mají vést ke stabilizaci ceny takové, která bude motivovat emitory k investicím do modernizace jejich zařízení.

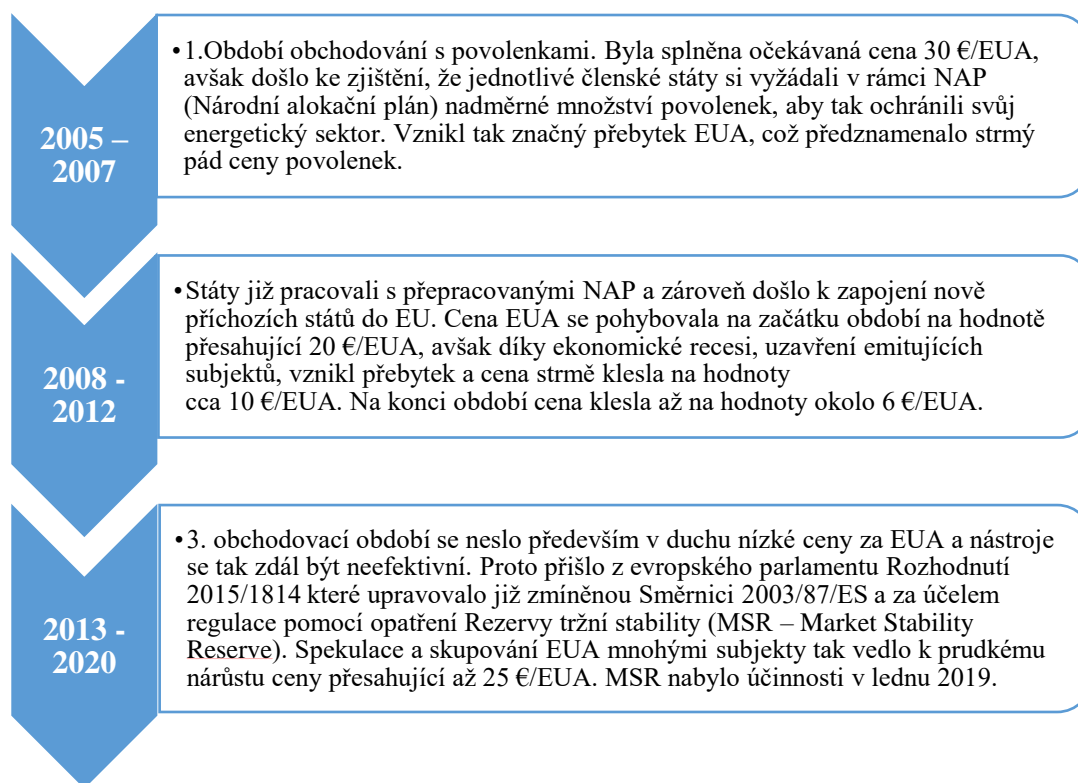
Jedno takové regulatorní opatření bylo právě zavedeno s účinností od ledna 2019, což v předchozích měsících před daným datem způsobilo paniku na trhu s povolenkami a zapříčinilo tak jejich skokové navýšení ceny kvůli kumulaci povolenek jednotlivých subjektů.



Obrázek 2-1: Vývoj ceny ETS, EUR/tCO₂ [4]

2.2 Obchodovací období emisních povolenek

Obchodování s emisními povolenkami provázelo od jeho vzniku několik základních problémů, které si vyžadovali různá opatření. Vývoj změn v politice obchodování s emisními povolenkami je uveden na následujícím schématu viz *Obrázek 2-2*.



Obrázek 2-2: Shrnutí obchodovacích období (informace z [5], [20], [21], [22])

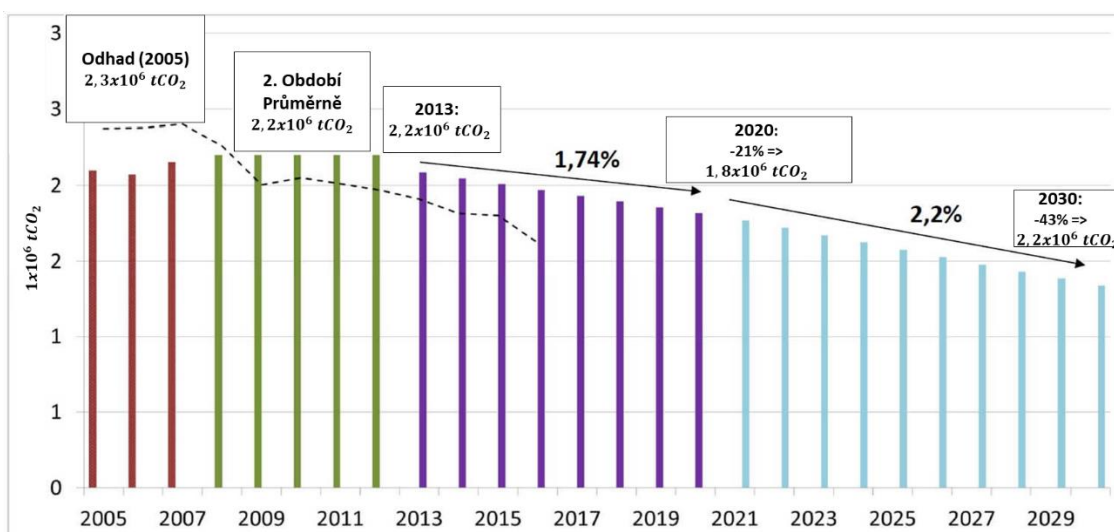
2.3 MSR

Market Stability Reserve neboli rezerva tržní stability přichází na EU ETS jako regulatorní prvek nařízením č. 2015/1814 v reakci na dlouhodobý přebytek emisních povolenek na trhu, který vznikl po finanční krizi v roce 2008. Přebytek měl za následek cenu povolenky v rámci hodnoty jednotek EUR. MSR by měla zajistit především zvýšení ceny EUA na požadovanou hodnotu a tj. 25 €/EUA. To by měla být průměrná předpokládaná cena pro 4. obchodovací období. [22]

Princip činnosti MSR spočívá v odebrání, nebo v opačném případě saturaci počtu povolenek v na trhu.

2.4 Obchodovací období 2021 – 2028

Nově plánované obchodovací období s EUA přinese od roku 2021 mnoho změn, které by mělo zpřísnit (zdrazit) obchodovací cenu EUA. Jako regulační nástroj pro udržení požadované ceny bude sloužit jak výše uvedené MSR, tak nová hranice „cap“. Cap způsobí snížení lineárního faktoru, neboli procenta, o které se má každý rok redukovat množství emitovaného CO_2 . Hodnota cap (snižování emisních povolenek v oběhu) bude snížena z původních 1,74 % za minulé obchodovací období na 2,2 %. [5]



Obrázek 2-3: Schéma projekce snižování lineárního redukční faktoru v EU [5]

Změny motivující snižování emisí CO_2 byly provedeny novelizací směrnice 2003/87/EC směrnici 2018/410. Směrnice nadále počítá se zachováním bezplatného přidělování povolenek stávajícím stacionárním zdrojům do výše 15 % pro určité případy (např. Teplárny). [22]

Dále směrnice 2018/410, odst. (14) ukládá, že technologie CCS, případně CCU a další nízkouhlíkové technologie nebudou muset uplatňovat emisní povolenky zachycené, nebo uložené CO_2 . Zároveň v zájmu demonstrace komerčních zařízení CCS a inovativních technologií v oblasti obnovitelných zdrojů energie by měli být nevyužité povolenky použity pro odměny za zavádění technologií CCS a CCU. [22]

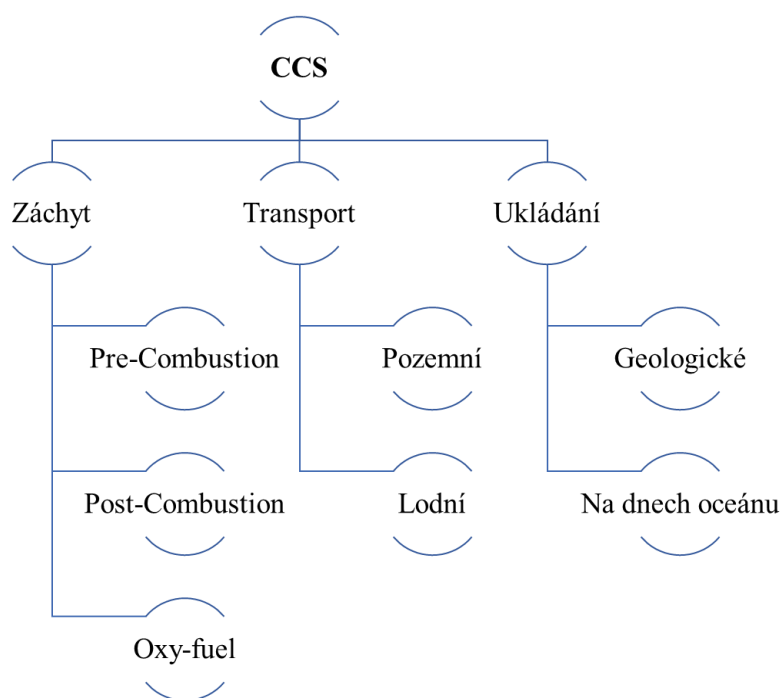
Pro účely technologií CCS, CCU a dalších nízkouhlíkových technologií by měli být vyčleněny povolenky z obchodovacího období 2013 – 2020, které nebyly přiděleny novým účastníkům trhu v oblasti inovací. Počet povolenek nepřidělených novým účastníkům trhu by měl být 300 milionů. Dalších 400 milionů povolenek by mělo být k dispozici za první období pro obchodovací období začínající roku 2021. Stávajících 700 milionů povolenek by

mělo být doplněno o 50 milionů nepřidělených povolenek z rezervy tržní stability (MSR).
[22]

Dle směrnice 2018/410, odst. (16) by měl být vytvořen Modernizační fond, do kterého by putovala 2 % celkového množství povolenek. K Modernizačnímu fondu budou mít v rámci solidarity přístup státy, které nedosahují 60 % HPD na obyvatele v tržních cenách.
[22]

3 CCS technologie

CCS v angličtině Carbon Capture and storage, je druh technologie, jejímž úkolem je zabránit úniku CO_2 do atmosféry. Princip technologie se skládá ze zachytu oxidu uhlíku CO_2 z průmyslových, případně energetických zařízení, z transportu CO_2 a jeho následného uložení. CCS má potenciál jak v aplikaci u velkých, tak středních energetických zdrojů, ale i v průmyslu, zachyt CO_2 v těchto aplikacích může dosahovat účinnosti zachytu 85 – 95 % vzniklého CO_2 . Jednotlivé části, tvořící CCS budou postupně popsány v této kapitole. Rozdělení CCS viz *Obrázek 3-1*.



Obrázek 3-1: Schéma rozdělení technologií CCS

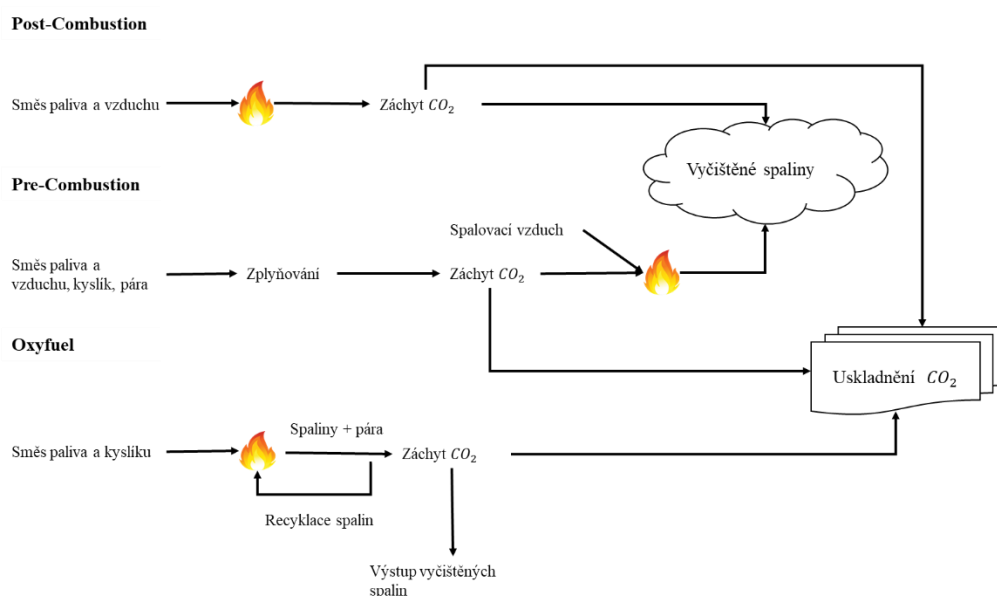
CCS technologie tak dokáží z fosilních paliv udělat mnohem čistší zdroj energie a řeší tak problém států, jako je ČR, která nemají velký potenciál ve výrobě elektřiny z OZE. Je však potřeba zdůraznit, že CCS technologie, ačkoliv funguje několik úspěšných pilotních projektů, s sebou nesou nemalé finanční náklady.

Pokud vztáhneme finanční náklady na činnost české uhelné elektrárny, dostáváme se dle odhadů z různých zdrojů (studií) mezi 20–30 % ceny samotného zařízení na spalování a výrobu elektřiny (blok uhelné elektrárny). Zároveň je potřeba nezapomenout na energetickou náročnost samotné technologie, která zdatelně snižuje celkovou účinnost zařízení. Všechny technologie zachytu CO_2 mají velkou spotřebu energie, a to kvůli nutnému prvotnímu shlazení spalin, které je pak potřeba znovu ohřát tak aby se v prvním kroku CO_2

navázalo na solvent a v druhém kroku solvent opustilo pro znovuvyužití látky a získání čistého CO_2 . Toto má za následek snížení účinnosti zařízení o desítky procent.

3.1 Záchyt CO_2

Záchyt CO_2 můžeme rozdělit na základní tři skupiny (viz Obrázek 3.1-3), a to na **Pre-Combustion** (záchyt před spalováním) **Post-Combustion** (záchyt po spalování) a **Oxyfuel** (spalování v kyslíkové atmosféře). Přístupy se liší jak ve způsobu spalování fosilního paliva a jaké palivo do spalování jde, tak i v použitých látkách, především různých typů solventů a druhů separací (např. dle separačních teplot).



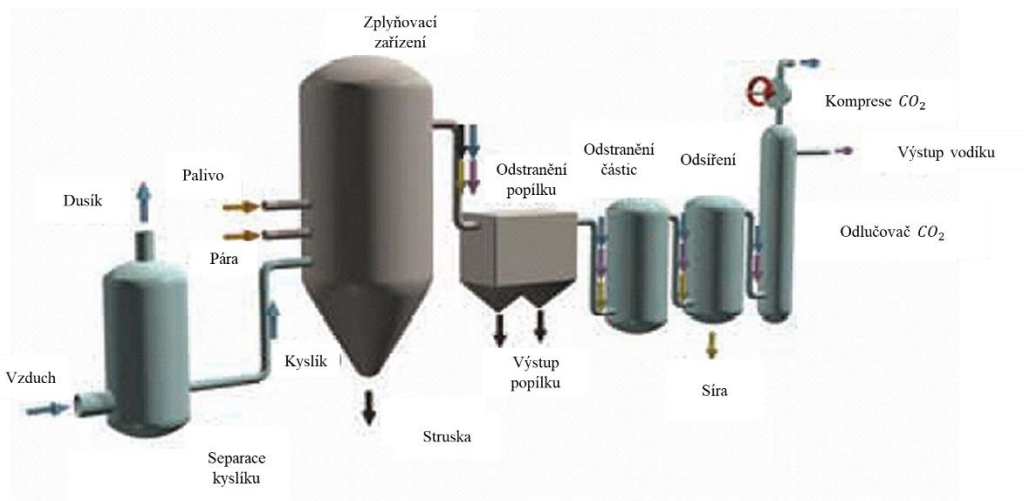
Obrázek 3-2: Základní tři skupiny technologií CCS [6]

Současné technologie separace CO_2 nabízejí širokou škálu řešení a možností jak CO_2 separovat. Ovšem ne všechny způsoby, či použité materiály jsou pro dané technologie vhodné. Výběr správného způsobu separace vždy závisí na typu spalovaného paliva, na teplotě spalin vstupujících do absorberu ze spalování a i na výskytu dalších látek ve spalinách (u Post-Combustion a Oxyfuel).

3.1.1 Pre-Combustion

Pre-Combustion můžeme rozdělit na: Rectisol, Selexol a Purisol. U Pre-Combustion technologie dochází k záchytu CO_2 ještě před spalování. V technologii dochází k redukci paliva před spalovacím procesem a upravuje poměr H/C (zvýšení H). V první fázi se vytvoří směs CO a H_2 (syntetický plyn) reakcí paliva s vodní parou, nebo oxidací paliva s kyslíkem.

V druhé fázi se směs CO a H_2 obohatí vodíkem (přidáním H_2O) zavržením CO_2 a H_2 , které lze dále oddělit. [16]

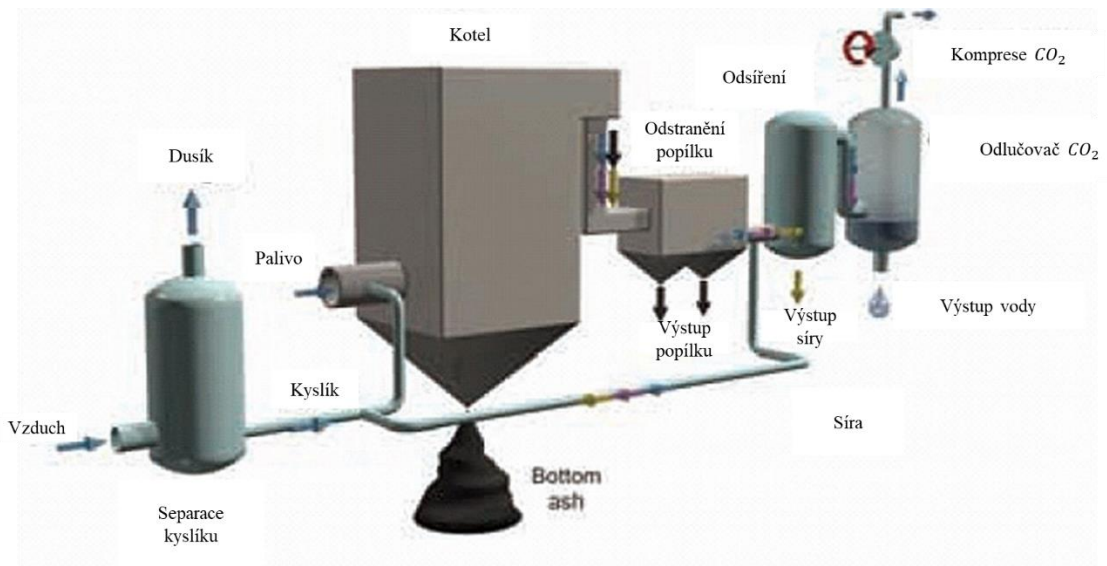


Obrázek 3-3: Schéma technologie CCS Pre-Combustion [6]

Tento princip lze uplatnit jen pro plynná paliva a není možné jej použít pro pevná paliva, např. uhelné zdroje. Pro tento případ lze uhlí zplyňovat, je to však velmi energeticky náročný proces. Zplyňování spočívá v reakci paliva s kyslíkem a/nebo vzduchem za vzniku plynu. V reakci dochází k oxidaci uhlovodíku s vodní párou z paliva, poté v reakci dochází k redukci na hořlavé plyny a oddělí se jak dodaná pára, tak minerální zbytky obsahující vysokou koncentraci uhlovodíků jako je například dehet. Nevýhodou zplyňování je především jeho vysoká energetická náročnost a spotřeba kyslíku. Tento plyn je poté dočištěván příslušnou technologií Pre-Combustion jako je Rectisol, Purisol nebo Selexol. Všechny metody jsou vysoce energeticky náročné kvůli chlazení plynu, a to na teploty cca $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ v případě Selexolu, nebo Rectisolu.

3.1.2 Oxyfuel

Další technologií záchytu CO_2 je technologie Oxyfuel, neboli spalování v kyslíkové atmosféře, ke kterému je zapotřebí velmi čistý kyslík s čistotou 95 až 99 %. Použití kyslíku, namísto vzduchu má výhodou především v tom, že do spalovací komory se dostává jen minimum dusíku, což umožňuje snadnější separaci CO_2 , které se pak separuje prakticky jen z vodní páry. [16]



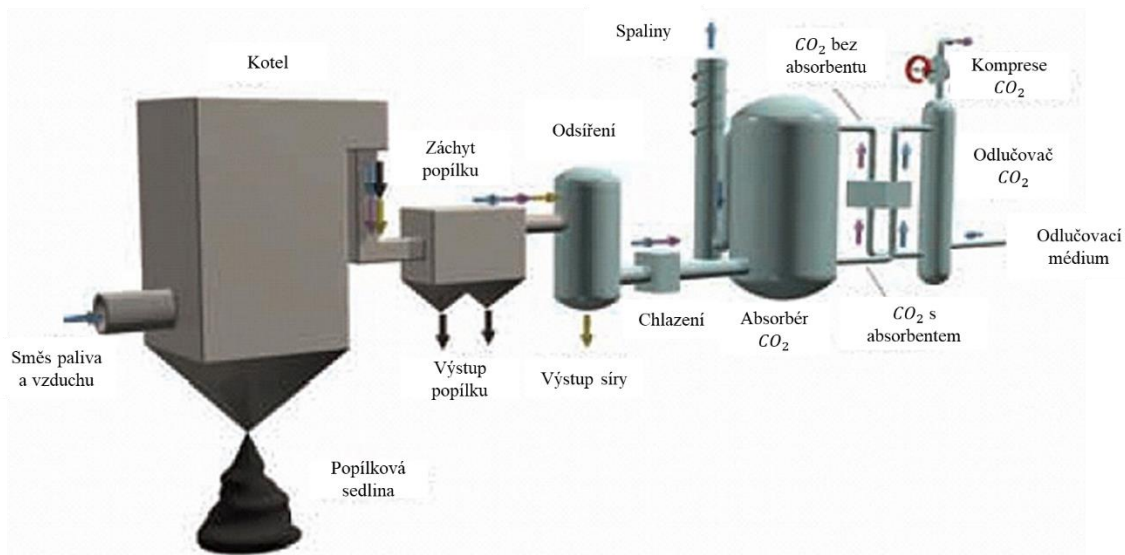
Obrázek 3-4: Schéma uspořádání CCS technologie Oxyfuel [6]

Ačkoliv technologie Oxyfuel sama o sobě nezhoršuje celkovou účinnost zařízení a jejím přínosem je absence velkého množství NO_x ve spalinách, tak i jednodušší separace CO_2 , je potřeba se zaměřit na používaný kyslík. Výroba (separace) kyslíku je energeticky velmi náročný proces ($0,16 - 0,2 \text{ kWh/kg } \text{O}_2$) a to s sebou nese vysokou finanční náročnost. Pro realizaci takového řešení na větší energetický zdroj by tak bylo zapotřebí vybudovat vlastní separační jednotku kyslíku a zároveň se ani nezbavíme opět energeticky náročného zachytu po spalování. Problém u Oxyfuel vzniká také tím, že zde není možnost jednoduchého chlazení jako například u běžných fluidních kotlů, kde se spalování chladí vzduchem. Zároveň při spalování v kyslíkové atmosféře je možno dosáhnout teplot až $3\,500 \text{ }^\circ\text{C}$, což by běžné materiály používané pro konstrukci nevydržely. Proto se pro chlazení používá recirkulace vlastních, již zchlazených spalin. Pro finální dočištění CO_2 je pak potřeba separovat od CO_2 malé poměry NO_x a síry. Toto lze provést například kryogenní separací. [10]

Výhodou u spalování v kyslíkové atmosféře je redukce emisí NO_x , ale zároveň je potřeba vyhnout se palivům s vysokým podílem síry, kvůli čistotě výstupního CO_2 .

3.1.3 Post-Combustion (PCC)

Poslední ze tří základních skupin technologií zachytu CO_2 je tzv. Post-Combustion (PCC), neboli zachyt CO_2 po spalování. Proto, abychom byli schopní CO_2 ze spalin odstranit, musíme nejdřív spaliny vyčistit, což znamená odstranění popílku a odsíření. Achillovou patou této technologie je potřeba spaliny schladit na velmi nízké teploty a kvůli regeneraci solventu znovu ohřát (oddělení CO_2 od solventu).



Obrázek 3-5: Schéma technologie CCS Post-Combustion [6]

Nejčastější technikou záchytu CO_2 ze spaliny je absorpce chemickými solventy (nejčastěji aminy) se schopností regenerace. Solventy jsou proti-proudě sprchovány na ochlazené spaliny, aby došlo ke sloučení solventu a CO_2 . Následně se v další fázi procesu směs solventu a CO_2 zahřeje, čímž dojde k porušení vazby a uvolnění relativně čistého CO_2 . CO_2 je pak nutno odvodnit a stlačit, pak je již připraveno pro transport. Regenerovaný solvent se pak vrací zpátky do absorbéru, kde vykoná reakci znovu. [6]

Mezi další technologie záchytu patří: Absorpce pomocí fyzikálních solventů, Kryogenní separace a Membránová separace.

3.2 Zhodnocení tří základních skupin technologie CCS

Při srovnání technologií Pre a Post – Combustion a Oxyfuel zjišťujeme, že všechny jsou značně energeticky náročné. Zároveň se jedná o drahá a složitá zařízení, která jsou z finančního hlediska velmi nákladná.

Pro srovnání lze tedy použít univerzálnost uvedených technologií a jejich možnosti aplikace na nové, nebo současné zdroje.

Oxyfuel technologie lze použít pro většinu paliv, nicméně aplikovatelnost na stávající zařízení by byla zbytečně nákladná především kvůli novému systému chlazení spalovacího prostoru a nutnosti drahé výroby kyslíku.

Pre-Combustion je již ověřená technologie, je jednoduše použitelná na stávající zdroje a zároveň vyzkoušená. Pro tento záchyt CO_2 lze uplatňovat jen plynná paliva. I zde platí

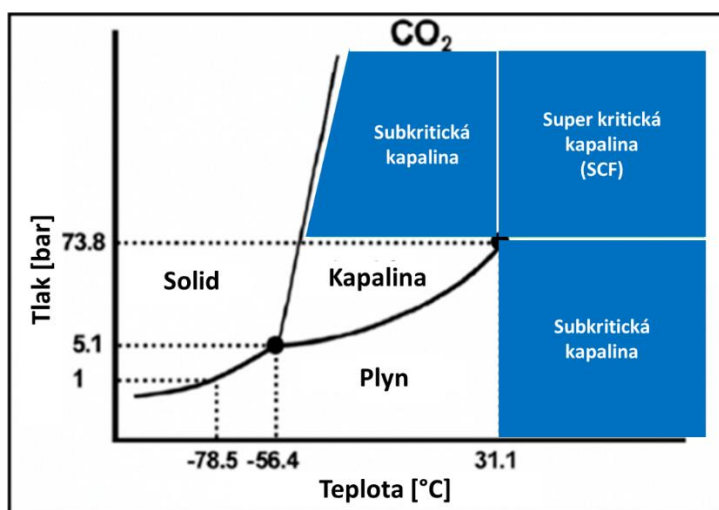
vysoká energetická náročnost, a to především kvůli nízkým teplotám chlazení plynu a to na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ v případě Selexolu, nebo Rectisolu.

Post-Combustion technologie lze aplikovat prakticky na všechna zařízení spalující fosilní paliva a zároveň je lehce aplikovatelná i na stávající zdroje. Ale i zde jsou uplatňovány vysoké nároky na energie kvůli chlazení spalin pro sorpci a jejich ohřívání pro desorpci.

Vzhledem k jednodušší aplikovatelnosti technologie Post-Combustion bude v dalším pokračování Bakalářské práce podrobněji rozebrána právě tato technologie, ke které bude následně vyhotoven optimalizační model pro výpočet ekonomické výhodnosti aplikace dané technologie.

3.3 Transport a ukládání CO_2

CO_2 se dopravuje ve formě tzv. superkritické kapaliny (SCF). To odpovídá stavu, kdy se látka chová jako plyn a zároveň jako kapalina. Tohoto jevu lze konkrétně CO_2 využít jako rozpouštědlo s dobrými fyzikálními vlastnostmi. U SCF je skoro nulové povrchové napětí a viskozitou se blíží vlastnostem plynu, přičemž hustota se blíží kapalnému stavu. Kritický bod se nachází na tlaku 73,8 bar a nad teplotou $31,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 3-6: Fázový diagram CO_2 [7]

To má za následek lepší dopravu s menšími místními a podélnými odpory, přičemž se dopravuje velké množství CO_2 vzhledem k dopravovanému objemu. Stlačení CO_2 je také

energeticky náročný proces a vyžaduje (dle různých zdrojů) 500 – 700 kJ/kg stlačeného CO_2 .

Možnosti dopravování CO_2 můžeme rozdělit přibližně na tři základní způsoby, a to potrubní dopravu, lodní, nebo pozemní dopravu. Jako pozemní doprava se uvažuje doprava v tlakových nádržích pomocí vlaků a aut. Dále je možnost využití lodního transportu, pakliže je zdroj umístěn poblíž vhodného přístavu/pobřeží. Současná infrastruktura v ČR prakticky neexistuje a pro přechod k nízkouhlíkové energetice spojené s technologií CCS bude zapotřebí tuto klíčovou infrastrukturu vybudovat.

4 Způsoby provedení technologie PCC

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, u PCC dochází k zachytu CO_2 až po spalování a CO_2 se zachytává ze spalin. Pro účinný záchyt CO_2 je potřeba spaliny vždy vyčistit, aby při chemické reakci (absorpci) nedošlo i k navázání nežádoucích jiných látek ve spalinách a to především NO_x a v případě spalování uhlí i SO_x .

Pro správnou funkčnost technologie je potřeba před zařízení PCC zařadit sekundární opatření pro redukci již vzniklých oxidů dusíku použitím technologií jako SCR, či SNCR. V případě zdrojů spalujících uhlí bude potřeba spaliny ještě odsířit například vápennou vypírkou a odstranit ze spalin popel.

Samotnou adsorpci lze provést několika různými přístupy, které se liší použitým solventem, případně teplotou, při které probíhá sorbce nebo desorbce. Viz předchozí kapitola, budou zvažovány následující aplikovatelné druhy separací:

- Absorpce pomocí chemických solventů
- Kryogenní separace
- Membránová separace

4.1 Absorpce pomocí chemických solventů

Chemisorpce pomocí solventů je chemická reakce plynu, kapaliny nebo pevné látky tvořící volně vázané sloučeniny. V praxi se solventy vážou při určité teplotě, která je pro každý solvent jiná, na CO_2 . Solventy jsou většinou roztoky různých alkanických solí, nebo aminů ve vodě. Poté, co se solvent naváže s CO_2 , odvede ho ze spalin. V další části technologie, v tzv. desorbéru je směs ohřáta a solvent recyklován. Separační faktor technologie dosahuje 80 – 95 %. [6], [16]

4.2 Kryogenní separace

Kryogenní separace probíhá za velmi nízkých teplot (cca $-50\text{ }^\circ\text{C}$) a tlaků vyšších než 2 MPa. Kryogenní separace se používá především k dočišťování proudu plynu velmi bohatým na CO_2 (nad 80 %). Výhodou kryogenní separace je především to, že CO_2 díky nízké teplotě a vysokému tlaku rovnou zkapalněné, ale její použití je vhodné spíše v kombinaci s Oxyfuel technologií, kde vznikají spaliny bohatší na CO_2 . [6], [16]

4.3 Membránová separace

Existuje několik způsobů, jak CO_2 separovat pomocí membránové separace, ale základními principy jsou buďto separace plynů, založená na tom, že jeden plyn se v kontaktu s daným materiálem pohybuje rychleji než druhý a dochází tak k separaci. Materiál může být z paladia, polymerů a dalších materiálů, ale zachyt membrán není stoprocentní a vyžaduje několikanásobnou recyklaci proudu spalin. [6]

4.4 Zhodnocení separačních metod PCC

Pro optimalizační model bude vybrána absorpce pomocí chemických solventů a to především po zvážení lepších vlastností v oblasti využití na různých typech zařízení, dobrým separačním faktorem a kvůli tomu, že se jedná o vyzkoušenou technologii (viz solventy MEA, nebo KS1). [6], [7], [4]

5 Chemické solventy

Ve vývoji nebo na trhu existuje velké množství solventů na bázi amoniaku. Klíčovým faktorem pro tuto práci bude srovnat především jejich energetickou náročnost pro daný systém.

Pro tuto práci budou uvažovány jen solventy na bázi amoniaku, neboli aminy, které jsou nejpreferovanějším typem solventu v praxi i výzkumu. Aminy jsou organické sloučeniny odvozené od amoniaku a lze je dělit na tři typy, právě podle počtu náhrad vodíku v jejich chemické stavbě. Aminy dělíme na primární, sekundární a terciální. V následující kapitole bude srovnáno několik typů solventů. Všechny uvedené solventy jsou buďto ve finální fázi výzkumu, nebo už jsou používány v praxi.

5.1 Výběr solventu

Výběr správného typu solventu závisí na několika faktorech. Každý solvent je navržený pro jiný typ spalin, tudíž jsou u solventů stanoveny hodnoty, pro jakou koncentraci CO_2 ve spalinách je lze použít. Zároveň vybrat solvent s co nejmenší energetickou náročností, která závisí na potřebném teple pro desorbci směsi CO_2 a solventu, ta se většinou uvádí v GJ/tCO_2 .

Následující tabulka zobrazuje uvažované solventy a jejich klíčové parametry pro výběr.

Srovnání parametrů solventů					
Název	Koncentrace CO_2 ve spalinách [%]	Absorpční teplota	Desorpční teplota	Energ. náročnost regenerace [GJ/tCO_2]	Zdroj
MEA	3 – 14	40 – 60	100 – 130	3,7	[16], [17]
DEA	8,9	35 – 55	100 – 120	6,3	[16]
CESAR1	3 – 14	40	120	3,0	[16]
CESAR2	3 – 14	40	120	3,45	[16]
Chlazený amoniak	3-14	0-10	100 – 200	2,3	[17]

Tabulka 5-1: Srovnání vlastností solventů

Všechny solventy uvedené v tabulce a jsou buďto v konečné fázi testování nebo jsou již komerčně dostupné.

Dle srovnávací tabulky (*Tabulka 5-1*) vychází nejlépe chlazený amoniak. Má sice nízkou teplotu, na kterou je potřeba ochladit spaliny, ale na druhou stranu má výrazně nejnížší energetickou potřebu na separaci jedné tuny CO_2 což bylo definováno jako klíčový energetický faktor. V pokračování práce a v modelu zdroje je tedy uvažováno právě s tímto solventem.

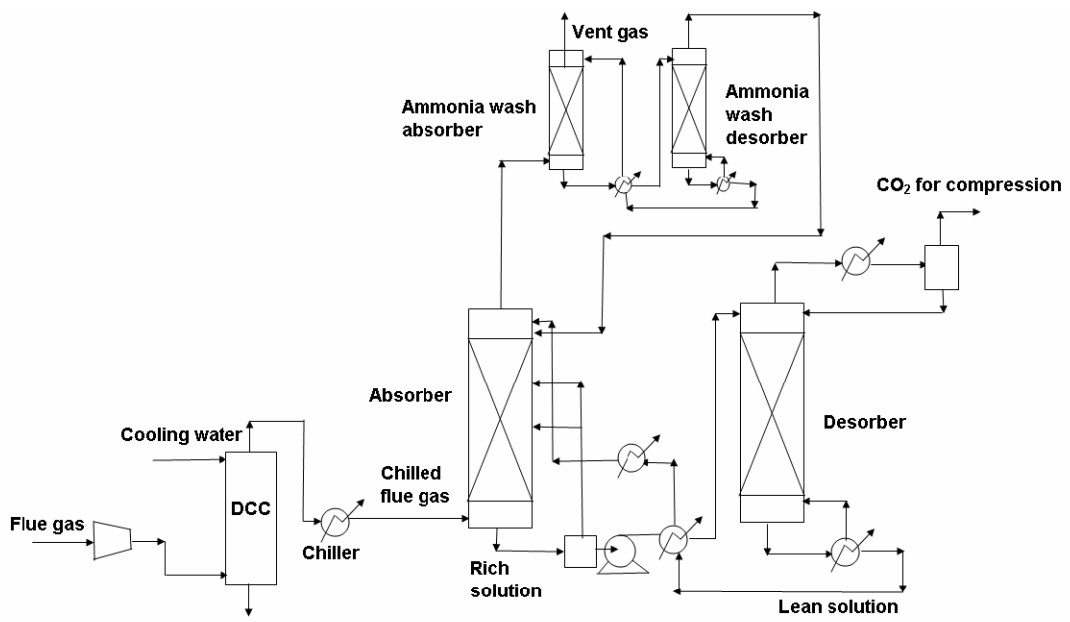
5.2 Záchyt pomocí chlazeného amoniaku

Pro modelový zdroj bude použit sorbent roztoku amoniaku a vody, respektive chlazený roztok čpavku a vody. Tento způsob záchytu CO_2 byl patentován v roce 2006 Eli Galem. Výběrem chlazeného čpavku bychom měli dosáhnout, jednoho z hlavních parametrů nakládání s CO_2 , energetické náročnosti pro desorbci 2 300 kJ/kg CO_2 . To je kupříkladu pro srovnání s často používaným sorbentem MEA o 1 300 kJ/kg CO_2 méně (MEA = 3 700 kJ/kg CO_2). Zároveň separační faktor u chlazeného amoniaku dosahuje separačního faktoru 90 %.[4]

Následující tabulka uvádí základní parametry solventu, které bude potřeba do modelu implementovat. Jak již bylo zmíněno, potřebná energie pro desorbci, vztažená k separované tuně CO_2 bude 2 300 kJ. U tohoto typu sorbentu je pro 90 % separační faktor ochladit, spaliny na 0 – 10 °C. Desorpce bude probíhat v rozmezí 100 – 150 °C. Pro desorbci bude použita pára několik stupňů nad mezí sytosti. Pro model budou uvažovány následující hodnoty. Schéma záchytu pomocí chlazeného amoniaku viz *Obrázek 5-1*, avšak pro modelový zdroj bude technologie záchytu navržena zjednodušeným způsobem.

Parametry solventu	Hodnota	Jednotky
Výpočtová energetická náročnost pro separaci	2300	[kJ/kg CO_2]
Teplota zchlazení spalin	0-10	[°C]
Teplota desorbce	100 - 150	[°C]

Tabulka 5-2: Parametry vybraného solventu zadané do modelu



Obrázek 5-1: Schéma záchytu pomocí amoniaku [8]

6 Popis modelového zdroje na fosilní paliva

Vzhledem ke stávající vizi EU, která bude inklinovat k přesunu od uhelných zdrojů k paroplynovým, které mají oproti uhelným zdrojům mnohem vyšší účinnost, byl pro tuto BP zvolen jako referenční/modelový paroplynový zdroj, a to o středním výkonu do 100 MWe. Pro zdroj budou uvažovány dva scénáře, a to první bez technologie CCS a druhý s technologií CCS, aby bylo možné stanovit hlavní technické aspekty integrace technologie CCS do zvoleného zdroje. Zdroj bude uspořádán v sériovém zapojení jedné spalovací turbíny a jednoho dvoutlakého parního oběhu. Plynová turbína bude vycházet z plynové turbíny firmy Siemens a její návrhový výkon je 63 MW spalující ZP. Parní oběh bude navržen jako dvoutlaký s jedním odběrem pro napájecí nádrž, nebo případnou technologii CCS. Základní schéma navrženého zdroje je níže v práci: *Obrázek 6-1*, zdroj s technologií CCS *Obrázek 6-2*. Pro vytvoření bilančního prostředí bylo využito softwarového prostředí programu Cycle Tempo 5.0. V následujících částech práce budou popsány vstupní parametry modelového zdroje a určeny vybrané parametry jednotlivých komponent modelu (účinnosti, výkony, spotřeby) nejdříve pro zdroj bez CCS a poté pro zdroj s CCS pro případ amoniakové vypírky popsané výše.

6.1 Vstupní parametry modelového zdroje pro softwarové prostředí Cycle Tempo 5.0

V rámci BP budou pro model uvažovány následující zjednodušující parametry:

- a) nulové tlakové ztráty v hlavních trasách paroplynového zdroje
- b) žádné tepelné ztráty v rámci tepelných výměníků (účinnost všech výměníků je uvažována 100%)
- c) model spalovací turbíny byl využit z interní databáze Cycle-Tempo
- d) sjednocení odděleného paralelního ohřevu napájecí vody v obou tlakových hladinách do jednoho bilančního zařízení (tj. dvoustupňový ohřev napájecí vody pro admisní (VT)).

V následující kapitole budou uvedeny hlavní vstupní parametry zdroje, jež vycházejí z literatury a doporučení vedoucího práce. V následující tabulce jsou uvedeny parametry pro plynové turbíny vycházející z řady Siemens KWu (z databáze Cycle Tempo)

Parametry plynové turbíny

Elektrický výkon	63	[MW]
Produkce tepla	10226,2	[kJ/kWh]
Tlakový poměr	16,1	[-]
Teplota spalin	531	[°C]

Tabulka 6-1: : Vstupní parametry plynové turbíny

Izoentropická účinnost obou dílů turbíny (VT i ST) bude uvažována 90% a mechanická 99%. Admisní tlak páry na vstupu do VT dílu parní turbíny byl zvolen 12MPa a tlak páry do NT dílu s ohledem na technologii CCS a napájecí nádrž 0,4 MPa.

Pro výměníky tepla neboli dílčí části kotle na odpadní teplo (HRSG), byly zvoleny vstupní parametry (teploty média) a pinch pointu u výparníků. Parametry byly zvoleny s ohledem na používané zvyklosti (např.: ohřev napájecí vody o max. 5 °C pod mez sytosti atd.) Návrhové parametry jednotlivých částí HRSG jsou shrnuty v následující tabulce.

Nastavené počáteční podmínky tepelných výměníků

Č. 2, Přeřívák – Výstupní teplota páry	515	[°C]
Č. 3 Výparník – pich point – DeltaT min. pára/voda	10	[°C]
Č. 4 EKO – Výstupní teplota vody	320	[°C]
Č. 5, Přeřívák – Výstupní teplota páry	200	[°C]
Č. 6 Výparník – DeltaT min. pára/voda	10	[°C]
Č. 7 EKO – Výstupní teplota vody	143	[°C]

Tabulka 6-2: Vstupní parametry tepelných výměníků

V tabulce jsou jednotlivé části HRSG vždy označeny s odkazem na číslo, odpovídající číslu ve schématu (*Obrázek 6-1*) a jsou označeny v tabulce dle čísla odpovídající obrázku s označením parametru a funkce.

Účinnosti všech čerpadel byly stanoveny na doporučení vedoucího práce a jsou uvedeny v tabulce níže.

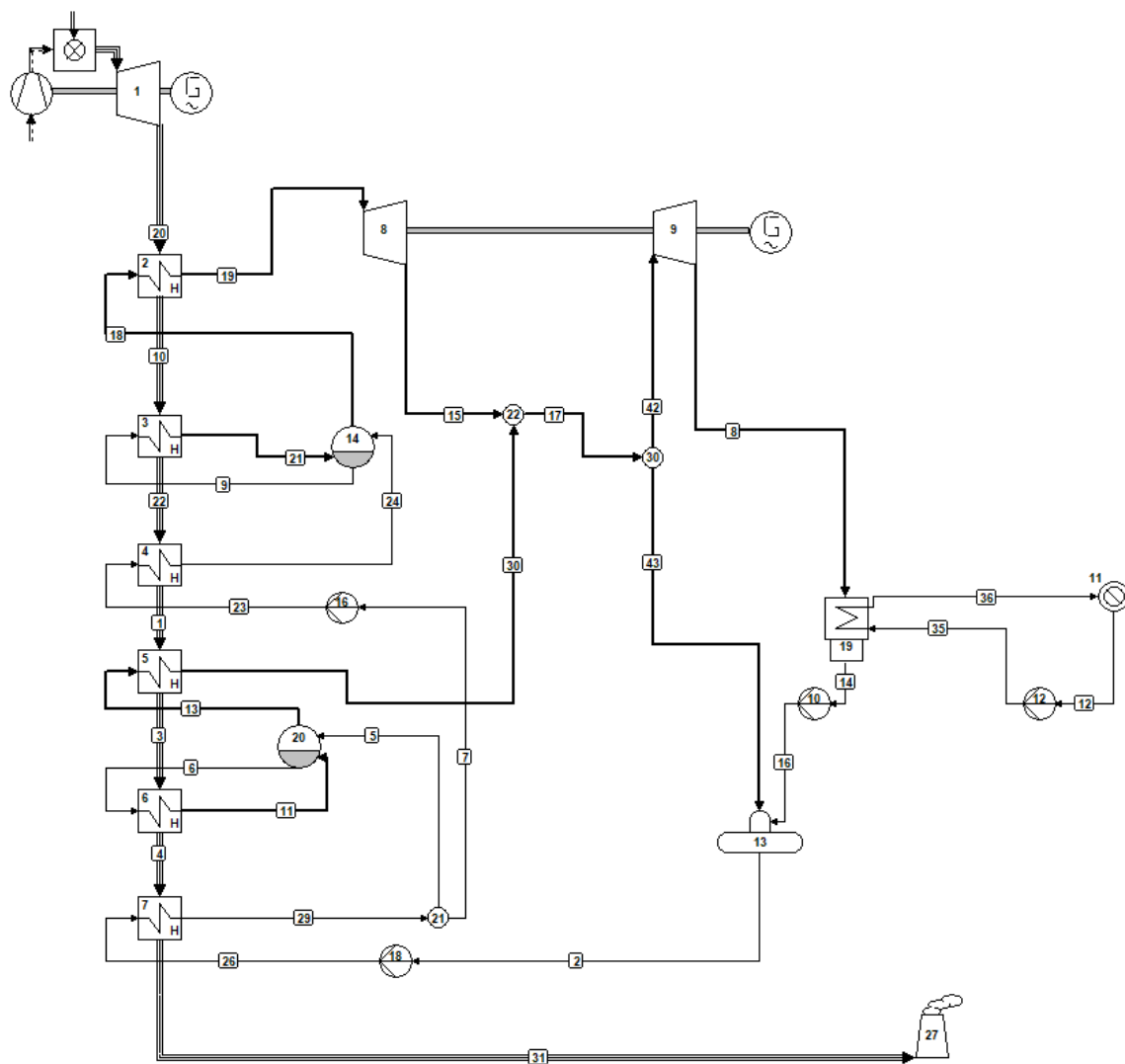
Parametry čerpadel		
Izoentropická účinnost	75	[%]
Mechanická účinnost	95	[%]
Elektrická účinnost	99	[%]

Tabulka 6-3: Vstupní parametry čerpadel

V tabulce níže jsou uvedeny hlavní vstupní parametry modelu pro kondenzátní, chladicí okruhy a okruhu napájecí nádrže parního oběhu.

Parametry ostatních komponent		
Č. 19 Kondenzátor – Výstupní teplota kondenzátu	25	[°C]
Č. 19 Kondenzátor – Vstupní tlak páry	0,05	[bar]
Č. 11 Zdroj chladicí vody – Výstupní teplota vody	18	[°C]
Č. 11 Zdroj chladicí vody – Výstupní tlak vody	1,5	[bar]
Č. 12 Čerpadlo – Výstupní tlak vody	3,5	[bar]
Č. 10 Čerpadlo – Výstupní tlak kondenzátu	1,5	[bar]
Č. 13 Napájecí nádrž – Výstupní teplota kondenzátu	105	[°C]
Č. 18 Čerpadlo – Výstupní tlak kondenzátu	4	[bar]
Č. 18 Čerpadlo – Výstupní tlak kondenzátu	120	[bar]

Tabulka 6-4: Vstupní parametry pro nezařazené komponenty



Obrázek 6-1: Paroplynový zdroj – Cycle Tempo

6.2 Popis vstupních parametrů dalších technologií souvisejících s integrací CCS technologie

Pro splnění technologických podmínek záchytu CO_2 je potřeba nejprve spaliny ochladit na definovaných $7\text{ }^\circ\text{C}$. Chlazení spalin je navrženo jako dvoustupňové. v modelu navrženo jako dva sériově uspořádané výměníky č. 25 a 15 viz *Obrázek 6-2*. Oba chladicí okruhy jsou vodní, kdy první bude realizován pomocí standardní chladicí vody z chladicího okruhu a druhý pomocí ochlazené vody pomocí standardních chladicích okruhů (např. kompresorového chlazení, adsorpčního chlazení). Pro zjednodušení nebude uvažována vlastní spotřeba pro chlazení (spotřeba chladiva). Vstupní parametry komponent prvního a druhého stupně chlazení jsou uvedeny níže.

Parametry komponent prvního stupně chlazení

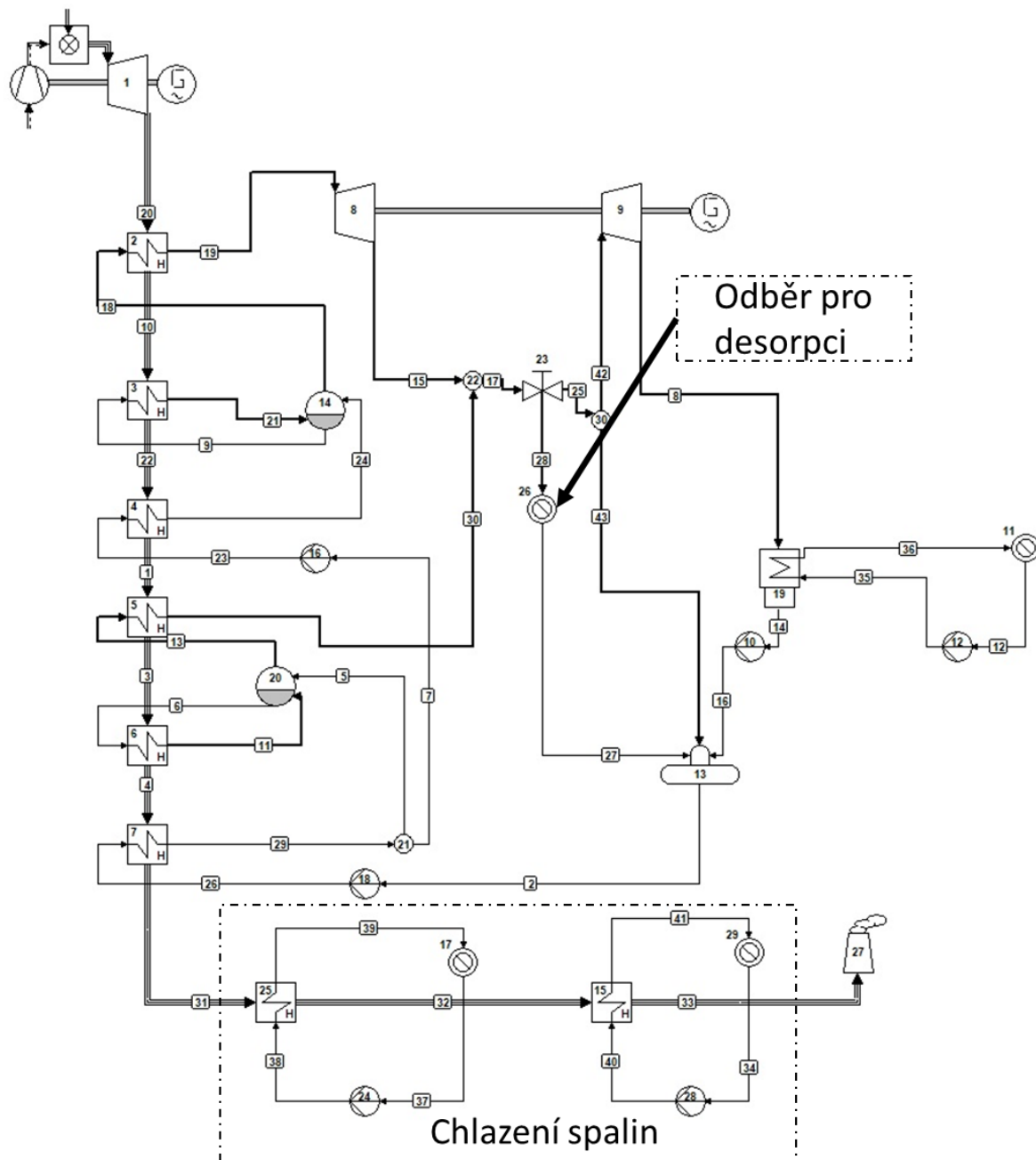
Č. 24 Čerpadlo – Výstupní tlak chladící vody	3,5	[bar]
Č. 25 Tepelný výměník – Výstupní teplota spalin	40	[°C]
Č. 25 Tepelný výměník – Výstupní teplota vody	25	[°C]
Č. 17 Zdroj chladící vody – Výstupní teplota vody	25	[°C]
Č. 17 Zdroj chladící vody – Výstupní tlak vody	1,5	[bar]

Tabulka 6-5: Parametry komponent prvního stupně chlazení

Parametry komponent druhého stupně chlazení

Č. 28 Čerpadlo – Výstupní tlak chladící vody	1,5	[bar]
Č. 15 Tepelný výměník – Výstupní teplota spalin	7	[°C]
Č. 15 Tepelný výměník – Výstupní teplota vody	3	[°C]
Č. 29 Zdroj chladící vody – Výstupní teplota vody	1	[°C]
Č. 29 Zdroj chladící vody – Výstupní tlak vody	1,5	[bar]

Tabulka 6-6: Parametry komponent druhého stupně chlazení



Obrázek 6-2: Paroplynový zdroj s technologií zachytu

6.3 Složení spalin

Pro stanovení potřebného množství páry, neboli potřebu tepla pro desorpční proces vybrané technologie potřeba znát složení spalin a objemovou nebo hmotnostní koncentraci CO_2 ve spalinách. Předpoklad pro návrh technologie je separační faktor 90 %, respektive odstranění 90 % CO_2 ze spalin. Složení spalin je uvedeno v tabulce níže. Ve vlastním bilanční procesu není uvažována pro zjednodušení potřeba dodatečného čištění spalin (především NO_x)

Složení spalin – objemová koncentrace

N_2	74,71	[%]
O_2	13,38	[%]
H_2O	7,65	[%]
Ar	0,89	[%]
CO_2	3,37	[%]
Celkový objem spalin	282,23	[m ³ /h]

Tabulka 6-7: Složení spalin

Z výše uvedené tabulky je patrné, že objemová koncentrace CO_2 ve spalinách je 3,37 % a dle tabulky (Tabulka 6-7). Celkový hmotnostní průtok spalin je 190,05 kg/s. Aby bylo možné vypočítat energetickou potřebu pro desorbci, je nutné přepočítat koncentraci objemovou na koncentraci hmotnostní a pak vypočítat potřebné množství páry pro uvedené parametry. Koncentrace je přepočítána dle vztahu uvedeného níže, kde:

V_{SPcelk} je celkový objem spalin

$V_{CO_2\%}$ je parciální objem spalin

M_M molární hmotnost CO_2

M_A molární hmotnost vzduchu

$$\dot{m}_{CO_2} = V_{SPcelk} * \frac{V_{CO_2\%}}{100} * \frac{M_M}{M_{VZ}} = 282,23 * \frac{3,37}{100} * \frac{44,0095}{28,43} = 27,975 \text{ kg/s}$$

Parametry páry jsou uvedeny v následující tabulce. Výpočet množství páry jed uveden v rovnici níže, kde

Q_{CO_2des} teplo nutné pro desorbci CO_2

\dot{m}_{CO_2} hmotnostní tok CO_2

$Q_{výp}$ výparné teplo páry

$$\dot{m}_{páry} = \frac{Q_{CO_2des} * \dot{m}_{CO_2}}{Q_{výp}} = \frac{2300 * 27,975}{2133,7} = 30,155 \text{ kg/s}$$

Parametry páry jsou sumarizovány v tabulce níže.

Parametry odebírané páry		
Hmotnostní tok odebírané páry	30,155	[kg/s]
Výparné teplo (pára 144 °C, 4 bar)	2 133	[kJ/kg]
Teplota páry	144	[°C]
Tlak páry	4	[bar]

Tabulka 6-8: parametry páry pro desorpci

7 Výsledky výpočtu v softwarovém prostředí Cycle Tempo 5.0

Rámci BP jsou porovnány dva scénáře, jejichž srovnáním bude posouzena v následující kapitole jejich ekonomická náročnost a rentabilita. Pakliže se výstavba zařízení na záchyt CO_2 nebude vyplácet bude stanovena hodnota případných subvencí.

Pro stanovení těchto hodnot bude důležité sledovat jen některé parametry. Pro smysl modelu se jedná o parametry spotřeby paliva, energie pro pohon čerpadel a elektrické výkony jak parní, tak i plynové turbíny. K energetické náročnosti bude následně dopočítána potřebná energie pro stlačení CO_2 (mimo program Cycle Tempo) na parametry potřebné pro jeho dopravu.

7.1 Výsledky zdroje bez technologie CCS

Modelový zdroj fungující bez zařízení CCS vyšel s účinností 53,95 %. Parní turbína při tomto uspořádání, má možnou instalovanou kapacitu na VT části 15 576 kW a na NT části 14 923 kW. Pára pro desorpci bude v druhém případě odebírána právě z NT části.

Výsledky výpočtu bez technologie záchytu CO_2		
Elektrický výkon plynové turbíny	63 000	[kW]
Elektrický výkon parní turbíny	30 440	[kW]
Příkon paliva (ZP)	178 988	[kW]
Celkový elektrický výkon	93 440	[kW]
Celková spotřeba el. energie (čerpadla celk.)	869	[kW]
Celková účinnost zdroje	53,95	[%]

Tabulka 7-1: Výsledky výpočtu bez technologie záchytu

7.2 Výsledky zdroje s technologií CCS

V této kapitole budou uvedeny výsledky se zapojeným záchytem CO_2 . Pro záchyt CO_2 musely být upraveny určité parametry. Zaprvé bylo nutno snížit teplotu spalin pro úspěšnou sorpci na bázi chlazeného amoniaku a to na 7 °C. Byly také přidány dva výměníky a to č. 25 a 15. Ty jsou zamýšleny jako samostatné chladicí okruhy a pro zjednodušení je jako chladivo

uvažována voda. Dále byl do modelu zařazen odběr na NT páru z odběru viz potrubí č. 28 (Obrázek 6-2).

Pro celkovou účinnost bylo potřeba dále započítat stlačení CO_2 na potřebný dopravní tlak (11 MPa), aby mohlo být CO_2 transportováno na uložení. Tato hodnota není vypočítána v programu Cycle Tempo. Pro kompresní práci bude uvažováno zjednodušení pomocí měrné hodnoty energetické náročnosti odpovídající 625 kJ/kg [8]. Celková spotřeba na kompresi tak bude při navrhovaném výkonu 15 735 kW.

Výsledky výpočtu s technologií zachytu CO_2		
Elektrický výkon plynové turbíny	63 000	[kW]
Elektrický výkon parní turbíny	16 621	[kW]
Příkon paliva (ZP)	178 988	[kW]
Celková spotřeba el. energie (čerpadla celk.)	1 757	[kW]
Separční faktor	90	[%]
Množství odseparovaného CO_2	25,18	kg/s
Celková spotřeba na kompresi CO_2	15 735	[kW]
Celková účinnost zdroje	34,71	[%]

Tabulka 7-2: Výsledky technologie se zachytem

Z výše uvedené tabulky je vidět, že účinnost se značně snížila o necelých 20 % na 34,71 %. Celkové obchodovatelné množství elektřiny po odečtení elektřiny spotřebované na stlačování CO_2 je 62 129 kWh/h. V následující kapitole bude pro oba dva zdroje provedena ekonomická analýza.

8 Ekonomické zhodnocení

Z technické analýzy vyplívá, že integrací CCS technologie do navrženého modelového zdroje dochází ke snížení instalovaného výkonu zdroje (při stanoveném konstantním příkonu paliva o cca 20 %), zároveň zvýšením vlastní spotřeby zdroje a tím i snížením celkové účinnosti celého procesu výroby elektřiny. Tato kapitola se bude zabývat dopadem technických aspektů CCS technologie na vybrané ekonomické parametry provozu modelového zdroje. Hlavními parametry vstupujícími do ekonomické analýzy budou tzv. investiční náklady (CAPEX), prodejní cena vyrobené elektřiny, cena ZP a emisních povolenek CO_2 . Uvažovaná doba životnosti zdroje bude 30 let. V následující kapitole budou popsány postupy stanovení těchto faktorů.

Pro ekonomickou analýzu bude v prvním kroku pro zjednodušení stanovený jen jeden druh provozu, a to s odpovídajícím objemem pracovních hodin, 7 000 h/rok (tzv. base-load, tedy plné vytížení). Pro tento provoz je dále stanovena prodejní cena elektřiny a nákupní cena zemního plynu (popsáno v následujících kapitolách).

Pro zhodnocení dopadů byla vybrána metoda NPV (tzn. Čistá současná hodnota – Net Present Value) stanovená dle vzorce níže. Diskontní sazba také podrobená citlivostní analýze a byla po dohodě s vedoucím odhadnuta na hodnoty: 6 % a 8 %.

$$NPV = \sum_{t=1}^{30} \frac{CF_t}{(1+d)^t}$$

Význam proměnných ve vzorci:

CF_t Casf Flow v daném roce

d Diskontní míra

Cash flow (tok hotovosti) je stanoven jako rozdíl mezi náklady a výnosy zdroje, kde mezi náklady jsou zahrnuty náklady na nákup zemního plynu, emisních povolenek a odpisy paroplynového zdroje (rozpočítaná investice na 15 let – odpisy). Výnosem bude pouze prodej elektřiny vyrobené zdrojem. Prodej druhotných produktů (např. tepla) v této studii není uvažován. Pro zjednodušení v rámci analýzy se bere v úvahu i případný nárůst cen jednotlivých komodit

Výpočet ročního CF:

$$CF_t = \text{Prodaná SE} - \text{Nákup ZP} - \text{Nakoupené EUA} - \text{Odpisy (Investice)}$$

8.1 Stanovení ekonomických parametrů

V ekonomické analýze budou ekonomické parametry rozděleny do třech kategorií a to do fixních nákladů, variabilních nákladů a výnosů. Do fixních nákladů bude zařazena investice rozdělená na 15 let, tedy formou rovnoměrných odpisů. Do variabilních nákladů bude zařazena cena ZP a emisní povolenky. Ostatní náklady na další média nebudou v rámci práce (pro zjednodušení) uvažovány. Výnosy bude tvořit prodej elektřiny.

8.1.1 Stanovení referenční ceny elektřiny

Referenční cena elektřiny (*Tabulka 8-1*), kterou bude zdroj virtuálně prodávat na trhu po celý rok, bude stanovena z níže uvedených 5-ti hodnot. Každá z uvedených hodnot reprezentuje 20 % ceny složky referenční ceny elektřiny pro mnou stanovenou cenu elektřiny. Předpoklad je takový, že se silovou elektřinou vyrobenou zdrojem se nebude obchodovat jen na jednom trhu (například jen na vnitrodenním, nebo bokovém), ale bude rovnoměrně obchodovat jak na denním (DT), tak blokovém (BT), vyrovnávacím (jen VT+), zároveň bude poskytovat i kladnou regulační energii (RE+). Do ceny elektřiny nebudou pro zjednodušení započítány záporné regulační odchylky. Referenční cena je počítána tímto způsobem, aby lépe reflektovala reálnou cenu elektřiny na trhu a byla přesnější pro následující ekonomickou citlivostní analýzu. Všechna data jsou průměrná a pocházejí z historických dat OTE za celý rok 2018.

Stanovení ceny elektřiny		
RE+	2 400	[Kč/MWh]
BT base	1 043	[Kč/MWh]
BT peak	1 326	[Kč/MWh]
DT	1 182	[Kč/MWh]
VT+, peak a off peak	2 131	[Kč/MWh]
Referenční cena elektřiny (prům.)	1 616	[Kč/MWh]

Tabulka 8-1: Složky referenční ceny elektřiny [10]

Průměrná cena elektřiny, skládající se z výše uvedených složek je 1 616 Kč/MWh a tato cena bude uvažována jako referenční pro ekonomické zhodnocení zdroje a následně bude podrobena citlivostní analýze v další kapitole této práce.

8.2 Stanovení referenční ceny zemního plynu

Cena ZP bude vycházet z ceníku k 1. 1. 2019 společnosti Gasnet (Innogy). Dle uváděných hodnot je cena 1 MWh 110 Kč a za roční cena za denní rezervovanou pevnou distribuční kapacitu 115 196,25 Kč/tis.m³. Podrobnější popis je uveden dále v kapitole. V tabulce níže (*Tabulka 8-2*) pak jsou uvedeny roční náklady (7 000 h provozu ročně), které budou tvořit variabilní náklad v CF. Jako koeficient pro převod plynu z MWh na m³ bude použita hodnota 10,55. [9]

Výpočet ceny za distribuovaný plyn (C1):

$$C_1 = P_{\check{r}} * H * C_{MWh} = 178.988 * 7000 * 110 = 137\,820\,760 \text{ Kč/rok}$$

Výpočet roční ceny za denní rezervovanou distribuční kapacitu (C2):

$$C_2 = h * \frac{P_{\check{r}}}{10,55} * C_{ROK} = 24 * \frac{178,988}{10,55} * 115192,25 = 46\,903\,579 \text{ Kč/rok}$$

Kde:

$P_{\check{r}}$	Hodinový příkon paliva zdroje
H	Provozní hodiny rok
h	Počet hodin ve dni
C_{MWh}'	Cena za MWh ZP
C_{ROK}	Roční cena za denní rezervovanou distribuční kapacitu

Stanovení ceny Plynu

Cena za distribuovaný plyn	110	[Kč/MWh]
Roční cena za denní rezervovanou pevnou distribuční kapacitu	115,196	[Kč/MWh]
Roční platba za distribuovaný plyn	137 820 760	[Kč/rok]

Roční cena za denní rezervovanou distribuční kapacitu	46 903 579	[Kč/rok]
Celkové roční náklady na plyn	184 724 339	[Kč/rok]

Tabulka 8-2: Stanovení ceny plynu

8.2.1 Stanovení Referenční ceny EUA

V této kapitole je popsána a stanovena referenční cenu emisní povolenky (EUA). Vzhledem k její rostoucí tendenci v posledním roce bude brána průměrná hodnota ceny EUA. Průměrná hodnota ceny EUA je odhadnuta z grafu jako průměr hodnot za posledního půl roku, tedy od 1. 1. 2019 do 1. 6. 2019. Hodnoty pocházejí z Energetické evropské burzy, neboli EEX. V rámci citlivostní analýzy bude v následující kapitole zkoumán vliv ceny emisní povolenky na ekonomický provoz modelového zdroje. Referenční cena emisní povolenky bude stanovena na 24 EUR/tCO₂, neboli převedeno kurzem 1 EUR = 26 CZK (624 Kč/tCO₂).



Obrázek 8-1: Cena emisní povolenky 2019 [10]

Stanovená cena povolenky

Cena EUA	624	[Kč/tCO ₂],
----------	-----	-------------------------

Tabulka 8-3: Stanovená referenční cena emisní povolenky (EUA)

8.2.2 Stanovení investičních nákladů na technologii záchytu a zdroje

Pro stanovení referenční pořizovací bylo použito měrných investičních nákladů (USD/kWh instalovaného výkonu) z dostupné literatury [11]. Tyto ceny byly roku

definovány pro rok 2015 (rok vyhotovení studie) následně přepočteny pomocí inflačního koeficientu [17] pro rok vyhotovení této BP (2019). Okrajové podmínky stanovím následovně viz tabulka níže (*Tabulka 8-4*). Kurz UDS-CZK byl odhadnut následovně: 1USD = 23CZK.

Stanovení referenčních pořizovacích cen			
Parametry	Optimistický scénář	Pesimistický scénář	Jednotky
Cena zdroje bez technologie záchytu	20 033	34 178	[Kč/kWh]
Cena s technologií záchytu	35 259	65 113	[Kč/kWh]

Tabulka 8-4: Pořizovací cena technologie záchytu a zdroje [11]

Pro vlastní ekonomickou bude dále uvažován pro zjednodušení jen realistický scénář, neboli střední hodnota pesimistického a optimistického scénáře. Hodnoty pořizovacích cen jsou shrnuty níže.

Cena zdroje bez technologie záchytu:	27 106	[Kč/kWh]
Cena s technologií záchytu:	50 186	[Kč/kWh]

8.3 Stanovení výrobní ceny silové elektřiny a ceny separované tuny CO₂

Výrobní cena elektřiny je vypočítána jako poměr součtu fixních a variabilních nákladů ku vyrobené elektřině. Výrobní cena je stanovena dle vzorce uvedeného níže, kdy je v prvním případě uvažována plně dotovaná cena emisní povolenky. Jednotlivé hodnoty jsou pak uvedeny v tabulce (*Tabulka 8-5*). Hodnoty figurující ve vzorci jsou popsány níže.

Výrobní cena silové elektřiny pro zdroj bez technologie záchytu CO₂:

$$E_{výrobní} = \frac{C_{Z/15} + ZP_{rok}}{E_{vyr}} = \frac{168\,852\,309 + 184\,724\,339}{654\,080} = 541 \text{ Kč/MWh}$$

Výrobní cena silové elektřiny pro zdroj s technologií záchytu CO₂:

$$E_{výrobníCCS} = \frac{C_{Z\,CCS/15} + ZP_{rok}}{E_{vyr\,CCS}} = \frac{207\,867\,066 + 184\,724\,339}{434\,903} = 903 \text{ Kč/MWh}$$

Z výsledku je vidět, že pro výrobu elektřiny bez technologie záchytu je potřeba vynakládat daleko menší finanční prostředky. Pro srovnání, započteme-li do nákladu náklady na emisní povolenku, dostaneme následující hodnoty:

$$E_{výrobní} = 1\,213 \text{ Kč}/MWh$$

$$E_{výrobníCCS} = 1\,004 \text{ Kč}/MWh$$

Při respektování vstupních odhadů lze najít bod zlomu, kdy se zdroj s technologií CCS stává výhodnějším, touto hodnotou je cena povolenky 396 EUR/EUA.

Výrobní cena separované tuny CO_2 bude vypočítána jako poměr rozdílu mezi cenou elektrické energie ze zdroje s bez technologie záchytu a s technologií záchytu, viz vzorec níže. Hodnoty jsou uvedeny opět v tabulce (Tabulka 8-5). Hodnoty figurující ve vzorci jsou popsány níže.

$$C_{tCO_2} = \frac{E_{el\ bez\ CCS} - E_{el\ s\ CCS}}{M_{CO_2/rok}} = 502 \text{ Kč}/tCO_2$$

Významy proměnných ve vzorcích (ccs v indexu znamená zařízení s technologií záchytu):

$E_{výrobní}$	Výrobní cena silové elektřiny (i s EUA)
$E_{výrobníCCS}$	Výrobní cena silové elektřiny zařízení s technologií záchytu (i s EUA)
C_{tCO_2}	Výrobní cena separované tuny CO_2
$C_{Z/15}$	Cena zdroje bez technologie záchytu jako rozložený fixní náklad na 15 let
ZP_{rok}	Náklady na ZP za rok
E_{vyr}	Vyrobená silová elektřina za rok
$V_{silE/rok}$	Výnos z prodané silové elektřiny za rok
$M_{CO_2/rok}$	Množství vyprodukovaného CO_2 za rok

Vstupní parametry		
Souhrn vstupních parametrů		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Počet provozních hodin za rok	7 000	[h]
Emitované CO2 za sekundu	27,975	[kg/s]
Emitované CO2 za rok	704 970	[t/rok]
Záchyt	0,9	[-]
Cena EUA	624	[Kč/EUA]
Měrná cena zdroje bez technologie záchytu	27 106	[Kč/kWh]
Měrná cena zdroje s technologií záchytu	50 186	[Kč/kWh]
Výkon s technologií záchytu	62 129	[kWh]
Výkon bez technologie záchytu	93 440	[kWh]
Cena silové elektřiny - prodej	1 616	[Kč/MWh]
Fixní náklady		
Cena zdroje s technologie záchytu (počáteční investice)	3 118 005 994	[Kč]
Cena zdroje bez technologií záchytu	2 532 784 640	[Kč]
Cena zdroje s technologií záchytu jako rozložený fixní náklad na 15 let	207 867 066	[Kč]
Cena zdroje bez technologie záchytu jako rozložený fixní náklad na 15 let	168 852 309	[Kč]
Variabilní náklady		
Náklady na EUA za rok bez technologie záchytu	439 901 280	[Kč/rok]
Náklady na EUA za rok s technologií záchytu (separační faktor 0,9)	43 990 128	[Kč/rok]
Náklady na ZP za rok	184 724 339	[Kč/rok]
Výnosy		
Vyrobená silová elektřina bez technologie záchytu	654 080	[MWh/rok]
Prodaná silová elektřina bez technologie záchytu - výnos v Kč	1 056 993 280	[Kč/rok]
Vyrobená silová elektřina s technologií záchytu	434 903	[MWh/rok]
Prodaná silová elektřina s technologií záchytu - výnos v Kč	702 803 248	[Kč/rok]
Diskontní sazby		
Diskontní sazba 1	3,00%	[%]
Diskontní sazba 2	6,00%	[%]
Diskontní sazba 3	8,00%	[%]

Tabulka 8-5: Vstupní parametry

8.4 Výpočet NPV a citlivostní analýza klíčových parametrů

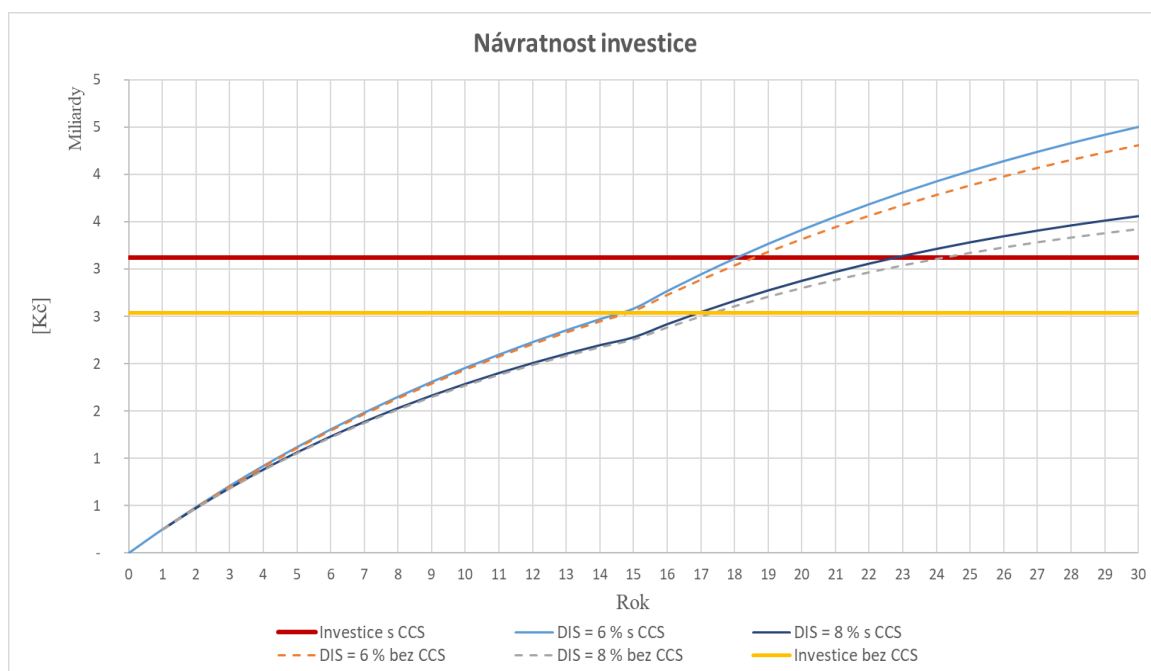
Pro ekonomickou prezentaci modelu jsem pro zdroj a jeho výše uvedené finanční náklady a výnosy (*Tabulka 8-5*) spočítal návratnost investice na základě výpočtu NPV (Čistá současná hodnota) dle vzorce uvedeného níže. Diskontní sazbu jsem zvolil na doporučení vedoucí práce 6 % a 8 %. Cash Flow (CF) bylo vypočítáno přímou metodou jako rozdíl ročních příjmů (výroba silové elektřiny) a ročních výdajů viz vzorec níže.

Výpočet ročního CF:

$$CF_t = \text{Prodaná SE} - \text{Nákup ZP} - \text{Nakoupené EUA} - \text{Splátka investice}$$

$$NPV = \sum_{t=1}^{30} \frac{CF_t}{(1+d)^t}$$

NPV byla vypočítána jak pro zdroj s technologií záchytu, tak pro zdroj bez technologie záchytu. Z grafu je patrné, že zdroje se stejnou diskontní sazbou jsou si v ekonomické návratnosti investice velice podobné. U Zdroje s technologií záchytu (CCS) sledujeme pomalejší návratnost.

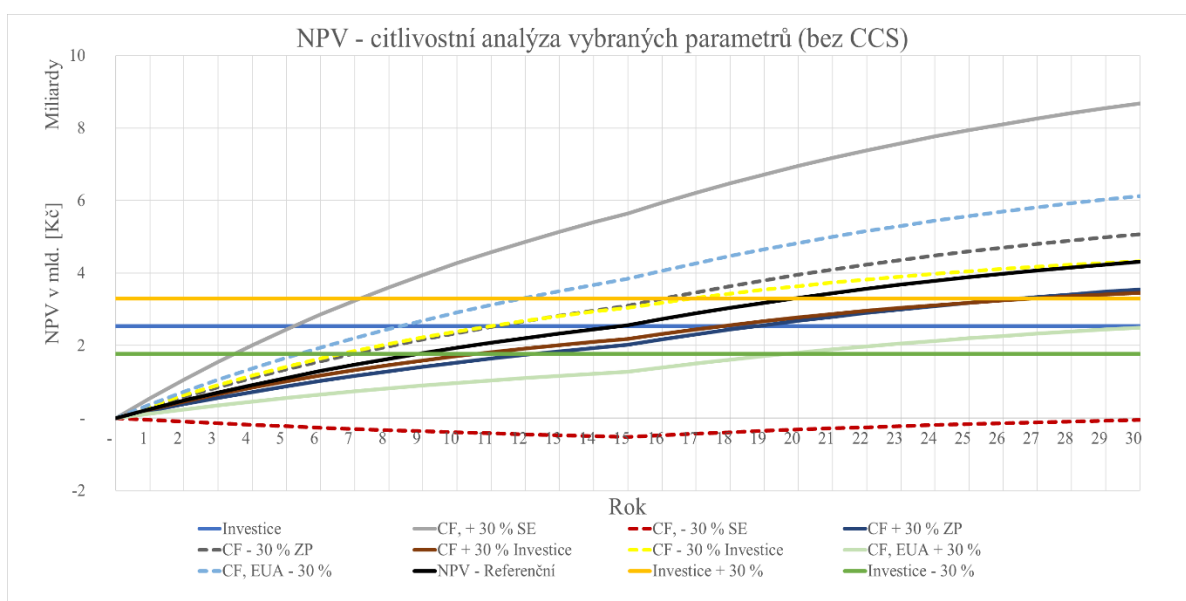


Obrázek 8-2: Graf NPV, srovnání zdrojů

8.5 Citlivostní analýza

Cílem této kapitoly bude definovat klíčový parametr, který nejvíce ovlivňuje rentabilitu modelového zdroje. Citlivostní analýza je vyhotovena jak pro zdroj bez CCS, tak i pro zdroj s technologií. Citlivostní analýza je vyhodnocena pro všechny parametry vstupující do ekonomických výpočtů s rozsahem +/- 30 % (Cena EUA, SE, ZP a pořizovací cena). V následujících grafech jsou všechny hodnoty CF + (+ 30 %) označeny plnou čarou a hodnoty - (- 30 %) čárkovanou čarou. V případě investice je vždy zavedena nová hranice (křivka) bodu návratnosti investice (označeno v grafu jako: Investice +/- 30 %). V citlivostní analýze bude pro zjednodušení uvažována diskontní sazba pouze 6 %.

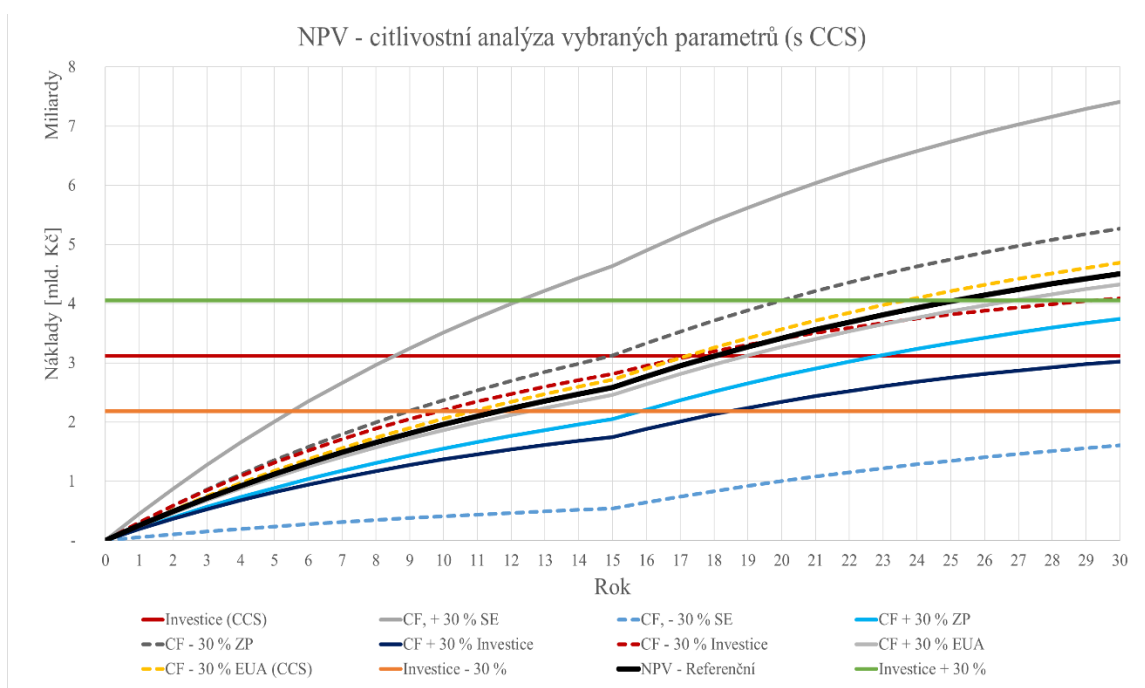
8.5.1 Citlivostní analýza zdroje bez CCS



Obrázek 8-3: Citlivostní analýza pro zdroj bez CCS

Z grafu citlivostní analýzy můžeme vidět, že největší vliv na vývoj výhodnosti má cena elektřiny. Její zvýšení, nebo snížení (o 30 %) mělo fatální vliv na rentabilitu celé investice. V případě snížení ceny elektřiny se zdroj ani po skončení životnosti nezaplatil. Jako druhý parametr ve významu změny rentability můžeme označit emisní povolenku, u které snížení ceny mělo za následek jen zaplacení samotné investice, ale žádný výdělek. Vysokou závislost lze také sledovat i u velikosti investice u zdroje, kdy se zdroj v nejideálnějším případě může zaplatit již za 6 let. Ostatní parametry již neměly tak výrazný vliv.

8.5.2 Citlivostní analýza zdroje s CCS



Obrázek 8-4: Citlivostní analýza pro zdroj s CCS

I u zdroje s CCS se jako nejvýraznější závislá veličina projevila cena elektřiny, která při svém 30 % vzrůstu je schopna zaplatit celou investici za méně jak 10 let, ale v opačném případě se investice (jako u zdroje bez CCS) nevrátí ani po uplynutí doby životnosti. Finanční rentabilita je také významně závislá na velikosti investice, kdy také může dojít k prodělků celého projektu. Na druhou stranu lze u zdroje s CCS sledovat velmi malou závislost na ceně emisní povolenky (cca 3 roky prodloužení návratnosti investice).

8.5.3 Zhodnocení citlivostních analýz zdrojů

Porovnáme-li oba dva zdroje, dojdeme k závěru, že zde platí vysoká závislost návratnosti investice u obou zdrojů k ceně elektřiny, která je v rámci uvedených parametrů klíčová. Rozdílem, mezi oběma zdroji je pak závislost návratnosti investice na emisní povolenke, kdy zdroj s technologií CCS dokáže tento náklad velmi dobře eliminovat a ani při zvýšení ceny emisní povolenky o 30 % není změna příliš výrazná vzhledem k ostatním parametrům. Všechny doby návratnosti jsou uvedeny v následující tabulce s uvažovanou dobou životnosti zdroje 30 let ().

Doby návratnosti investice pro hodnoty z citlivostní analýzy

Parametry	Doba návratnosti investice s CCS [Roky]	Doba návratnosti investice bez CCS [Roky]
Referenční	18	15
SE + 30 %	9	5
SE -30 %	-	-
ZP + 30%	23	19
ZP - 30%	15	11
Investice + 30 %	-	18
Investice - 30 %	10	11

Tabulka 8-6: Doby návratnosti investice pro hodnoty z citlivostní analýzy

Závěr

V první části této bakalářské práce bylo nejprve zmapováno legislativní prostředí EU a ČR se zaměřením se na nízkouhlíkovou energetiku. V rámci této rešerše byl popsán princip fungování trhu s emisními povolenkami EU ETS, i jejich minulý a možný budoucí vývoj. Následně byla zpracována rešerše technologií zachytu, transportu a skladování CO_2 (CCS technologií).

V praktické části této práce byl navržen modelový zdroj na fosilní paliva, pro nějž bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení integrace vybrané CCS technologie na bázi post-combustion (amoniaková vypírka). Modelový zdroj byl navržen jako paroplynový dvoutlaký zdroj o instalovaném výkonu 93 MWe s celkovou účinností 53,95 %. Integrací technologie CCS (Post-Combustion – amoniaková vypírka) došlo ke snížení celkové účinnosti zdroje na 34,71 %, a to při respektování konstantní spotřeby paliva. Pokles byl způsoben především potřebou energie pro desorpci, stlačení CO_2 a potřebou energie pro kompresorové chlazení spalin. Bilanční modely byly vytvořeny v softwarovém prostředí programu Cycle Tempo 5.0. Na závěr mé práce byla zpracováno ekonomické zhodnocení a citlivostní analýza na vybrané ekonomické parametry pomocí kritéria NPV, doby návratnosti, vyrobené ceny elektřiny a ceny za separovanou tunu CO_2 .

Z výsledků ekonomické analýzy vyplývá, že za určitých podmínek lze s dnešní dostupnou technologií postavit a provozovat ekonomicky rentabilní paroplynovou elektrárnu s CCS technologií. Investice má však dlouhou dobu návratnosti, což s sebou nese značná rizika, což vyplývá i z citlivostní analýzy, kde lze sledovat významnou závislost na prodejní ceně elektrické energie. Její zvýšení o testovaných 30 % může mít za následek zmar celé investice. Je potřeba zároveň podotknout, že v práci není započítána cena za dopravu a uskladnění CO_2 , která bude tvořit další vícenáklad na provoz zdroje s CCS.

Jako rozdílový faktor výhodnosti mezi zdrojem s CCS a zdrojem bez CCS působí cena emisní povolenky. Z výsledků lze předpokládat, že pro přechod k nízkouhlíkové energetice bude zapotřebí další zvýšení cen emisních povolenek. To může mít za následek růst cen energií, a nakonec i rychlou návratnost a vysokou ekonomickou rentabilitu zařízení s technologií CCS: V současné době je však investice do zdroje s CCS velmi riziková z hlediska těžko dlouhodobě predikovatelného vývoje cen energií, jak zároveň ukázala historie, i cen emisních povolenek, které paroplynové zdroje bez CCS výrazně znevýhodňují.

Seznam zdrojů

- [1] 82/15 *Analyza proveditelnosti legislativy v rámci snižování závislosti na fosilních palivech v ČR* [online]. Praha: Hospodářská komora ČR, 2015 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <https://www.komora.cz/legislation/8215-analyza-proveditelnosti-legislativy-v-ramci-snizovani-zavislosti-na-fosilnich-palivech-v-cr-t-11-5-2015/>
- [2] *Politika ochrany klimatu v ČR: Manažerské shrnutí* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2017 [cit. 2019-05-30]. ISBN 978-80-7212-625-5. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/\\$FILE/OEO_K_POKMS_20180105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/politika_ochrany_klimatu_2017/$FILE/OEO_K_POKMS_20180105.pdf)
- [3] *Energetický mix ČR* [online]. Praha: OTE, a.s, 2017 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>
- [4] *Record volatility roils EU carbon markets* [online]. Londýn, Anglie: Petroleum economist, 2019 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <https://www.petroleum-economist.com/articles/low-carbon-energy/renewables/2018/record-volatility-roils-eu-carbon-markets>
- [5] *Emisní obchodování po roce 2021 aneb nový EU ETS* [online]. Praha: Oenergetice.cz, 2018 [cit. 2019-06-11]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energeticka-legislativa-eu/emisni-obchodovani-roce-2021-aneb-novy-eu-ets>
- [6] *Available CO2 capture technology types* [online]. Web: CCS global institute, 2009 [cit. 2019-06-11]. Dostupné z: <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/strategic-analysis-global-status-carbon-capture-storage-report-1/b1-available-co2>
- [7] TOUBOUL, David. Lipidomics by Supercritical Fluid Chromatography. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 2015, **2015**(16) [cit. 2019-06-09]. DOI: 10.3390/ijms160613868. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279830372_Lipidomics_by_Supercritical_Fluid_Chromatography
- [8] KOTHANDARAMAN, Anusha. *Carbon Dioxide Capture by Chemical Absorption: A Solvent Comparison Study* [online]. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2010 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: https://sequestration.mit.edu/pdf/Anusha_Kothandaraman_thesis_June2010.pdf. Disertační práce. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- [9] *Ceník distribuce* [online]. Praha: Innogy, 2019 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <https://www.gasnet.cz/cs/cenik-distribuce/>
- [10] *EEX* [online]. Lipsko, Německo: EEX, 2019 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market/european-emission-allowances#!/2019/06/07>

[11] RUBIN, Edward, John DAVISON a Howard HERZOG. The cost of CO2 capture and storage. *International Journal of Greenhous Gas Control*[online]. 2015, 2015 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583615001814>

[12] [HTTP://3POL.CZ/888/PRINT](http://3POL.CZ/888/PRINT). *Rámcová úmluva Organizace spojených národů o změně klimatu* [online]. 1993 [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/ramcova_umluva_osn_zmena_klimatu/\\$FILE/OMV-cesky_umluva-20081120.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/ramcova_umluva_osn_zmena_klimatu/$FILE/OMV-cesky_umluva-20081120.pdf)

[13] DARDE, Victor, Kaj THOMSEN, Willy VAN WELL a Erling STENBY. Chilled ammonia process for CO2 capture. *International Journal of Greenhous Gas Control* [online]. 2010, březen, 2010, , 1-10 [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1750583609001157?token=899D1DA07AB76381D5487C60E9A781C6D7AF8A320E7B60E79980716A81DF91D0BCFD04CE419675EB0A24FBDB6E385A02>

[14] *Oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/evropska-unie/eu-ets-evropsky-system-obchodovani-s-emisemi/>

[15] SVENDSEN, Hallvard. *Absorption as a Method for CO2 Captur*[online]. Department of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2016 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.entek.chalmers.se/~anly/symp/01svendsen.pdf>. Norwegian University of Science and Technology.

[16] ČERNÝ, Ondřej. *CCS Technologie post combustion (amoniaková metoda) pro nadkritický blok 660 MWe* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70797/F2-DP-2017-Cerny-Ondrej-DP_Ondrej_Cerny_CCS_techologie_post_combustion.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT.

[17] ARONSSON, JESPER. *Process Integration and Performance of Chilled Ammonia CO2 Capture Technology* [online]. Gothenburg, Švédsko, 2011 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/145515.pdf>. Diplomová práce. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.

[18] *OTE.cz* [online]. Praha: OTE, a.s, 2019 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocnizprava?date=2018-01-01>

[19] *CPI Inflation Calculator* [online]. San Mateo: Official Data Foundatio, 2019 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <http://www.in2013dollars.com/us/inflation/2015?amount=2626>

[20] *DIRECTIVE 2003/87/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 October 2003*. In: . European Commision: EU, 2003, ročník 2003, 2003/87/EC. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0087&from=EN>

[21] *DECISION (EU) 2015/1814 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 October 2015*. In: . EU: EU, 2015, ročník 2015, 2015/1814. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:JOL_2015_264_R_0001

[22] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/410 ze dne 14. března 2018*,. In: . EU: EU, 2018, ročník 2018, 2018/410. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0410>

Seznam obrázků

Obrázek 1-1: Ilustrativní trajektorie snižování emisí [1].....	11
Obrázek 1-2: Politika ochrany klimatu v ČR [2].....	12
Obrázek 1-3: Energetický mix ČR 2017 [3].....	12
Obrázek 2-1: Vývoj ceny ETS, EUR/tCO ₂ [4].....	15
Obrázek 2-2: Shrnutí obchodovacích období (informace z [5])	16
Obrázek 2-3: Schéma projekce snižování lineárního redukční faktoru v EU [5]....	17
Obrázek 3-1: Schéma rozdělení technologií CCS	19
Obrázek 3-2: Základní tři skupiny technologií CCS [6].....	20
Obrázek 3-3: Schéma technologie CCS Pre-Combustion [6].....	21
Obrázek 3-4: Schéma uspořádání CCS technologie Oxyfuel [6]	22
Obrázek 3-5: Schéma technologie CCS Post-Combustion [6]	23
Obrázek 3-6: Fázový diagram CO ₂ [7].....	24
Obrázek 5-1: Schéma zachytu pomocí amoniaku [8].....	30
Obrázek 6-1: Paroplynový zdroj – Cycle Tempo	34
Obrázek 6-2: Paroplynový zdroj s technologií zachytu.....	36
Obrázek 8-1: Cena emisní povolenky 2019 [10].....	44
Obrázek 8-2: Graf NPV, srovnání zdrojů	48
Obrázek 8-3: Citlivostní analýza pro zdroj bez CCS.....	49
Obrázek 8-4: Citlivostní analýza pro zdroj s CCS.....	50

Seznam tabulek

Tabulka 1-1: Cíle Politiky pro ochranu klimatu v ČR [1]	11
Tabulka 5-1: Srovnání vlastností solventů	28
Tabulka 5-2: Parametry vybraného solventu zadané do modelu	29
Tabulka 6-1: : Vstupní parametry plynové turbíny	32
Tabulka 6-2: Vstupní parametry tepelných výměníků	32
Tabulka 6-3: Vstupní parametry čerpadel	33
Tabulka 6-4: Vstupní parametry pro nezařazené komponenty	33
Tabulka 6-5: Parametry komponent prvního stupně chlazení	35
Tabulka 6-6: Parametry komponent druhého stupně chlazení	35
Tabulka 6-7: Složení spalín	37
Tabulka 6-8: parametry páry pro desorpci	38
Tabulka 7-1: Výsledky výpočtu bez technologie záchytu	39
Tabulka 7-2: Výsledky technologie se záchytem	40
Tabulka 8-1: Složky referenční ceny elektřiny [10]	42
Tabulka 8-2: Stanovení ceny plynu	44
Tabulka 8-3: Stanovená referenční cena emisní povolenky (EUA)	44
Tabulka 8-4: Pořizovací cena technologie záchytu a zdroje [11]	45
Tabulka 8-5: Vstupní parametry	47
Tabulka 8-6: Doby návratnosti investice pro hodnoty z citlivostní analýzy	51

Seznam Zkratek

CCS	Carbon Capture and Storage
EUA	European Union Allowance
ZP	Zemní plyn
SE	Silová elektřina
MSR	Market Stability Reserve
NPV	Net Present Value
CF	Cash Flow
BT	Bokový trh
DT	Denní trh
VT	Vnitrodenní trh
RE	Regulační energie