



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

INŽENÝRSKÁ ŘEŠENÍ PRO ZMÍRNĚNÍ KLIMATICKÉ ZMĚNY - METODY APLIKOVATELNÉ V MÍSTĚ ZDROJŮ SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ

ENGINEERING SOLUTIONS FOR MITIGATION OF CLIMATE CHANGE - METHODS APPLICABLE AT THE
SOURCE OF GREENHOUSE GASES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Valentína Remeková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Valentína Remeková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **doc. Ing. František Lízal, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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

Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny – metody aplikovatelné v místě zdrojů skleníkových plynů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Klimatická změna představuje nejzávažnější výzvu pro celou současnou společnost. Aby jí bylo možné čelit, je třeba kombinovat opatření mitigační (předcházení, zmírnění) a adaptační. Cílem bakalářské práce bude provést rešerši dostupných inženýrských možností spadajících do první skupiny, přičemž důraz je kladen na metody aplikovatelné přímo v místě zdrojů skleníkových plynů.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši literatury na téma aktuálně dostupných a do budoucna perspektivních inženýrských metod pro zmírnění klimatických změn – konkrétně metody aplikované v místě zdroje skleníkových plynů.

Zpracovat přehled potenciálně nejúčinnějších metod, jejich principů, energetické a finanční náročnosti a celkové bilance uhlíku.

Analyzovat výhody a nevýhody jednotlivých metod, identifikovat výzkumná témata, jejichž řešení přinese největší pozitivní efekt a nejúčelnější využití prostředků a zdrojů.

Seznam doporučené literatury:

GAGNON, B., R. LEDUC AND L. SAVARD From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. Journal of Engineering Design, Jan-Mar 2012, 23(1-3), 49-74.

OWUSU, P. A. AND S. ASUMADU-SARKODIE A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. Cogent Engineering, 2016, 3(1).

SAMANTA, A., A. ZHAO, G. K. H. SHIMIZU, P. SARKAR, et al. Post-Combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Feb 2012, 51(4), 1438-1463.

SANZ-PEREZ, E. S., C. R. MURDOCK, S. A. DIDAS AND C. W. JONES Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chemical Reviews*, Oct 2016, 116(19), 11840-11876.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Cieľom tejto práce bolo spracovanie rešerše na tému inžinierskych riešení na mitigáciu klimatickej zmeny aplikovateľných v mieste vzniku skleníkových plynov. V prvej časti bola opísaná základná problematika zmeny klímy. Ďalej boli rozobraté technológie CCS (Carbon capture and storage), ktoré slúžia na zachytávanie a sekvestráciu oxidu uhličitého, a možné spôsoby separácie CO₂ zo spalín. Tretia kapitola opisuje technológie CCU (Carbon capture and utilization), ktoré zachytený uhlík ďalej využívajú ako produkt. Budúcnosť týchto technológií a ostatné metódy znižovania emisií sú doplnené v nasledujúcej časti. Okrem technologických výziev sa s problematikou klimatickej zmeny spája aj finančná náročnosť riešení, a táto časť bola spracovaná v kapitole päť. Na konci práce boli zhrnuté výhody, nevýhody, zistenia a nedostatky vo výskume plynúce z rešerše.

Kľúčové slova

Klimatická zmena, oxid uhličitý, zachytávanie a ukladanie oxidu uhličitého, dekarbonizačné technológie, CCS, CCU, skleníkové plyny

ABSTRACT

This work aimed to produce a research study on the topic of engineering solutions designed to mitigate climate change and which are applicable at the source of greenhouse gases. The first part outlines the fundamental matters of climate change. The second part focuses on technologies CCS (Carbon capture and storage) which capture and sequester carbon dioxide and possible options for separating CO₂ from flue gases. The third chapter describes technologies CCU (Carbon capture and utilization) that use captured carbon as a product for further use. The future of these technologies and other abatement methods are addressed in the following section. The financial aspects of solutions for climate change mitigation are discussed in chapter five. The last part summarizes the main advantages, disadvantages, findings, and limitations of research.

Key words

Climate change, carbon dioxide, carbon capture and storage, decarbonisation technologies, CCS, CCU, greenhouse gases

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

REMEKOVÁ, Valentína. *Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny – metody aplikovatelné v místě zdrojů skleníkových plynů*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132487>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Lízal.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny - metody aplikovatelné v místě zdrojů skleníkových plynů** vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

.....
Dátum

.....
Valentína Remeková

POĎAKOVANIE

Ďakujem môjmu vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Františkovi Lízalovi, Ph.D. za cenné a odborné rady, ústretovosť pri konzultáciách a čas, ktorý mi venoval.

Taktiež by som sa chcela poďakovať mojim rodičom za ich veľkú podporu počas celého štúdia.

OBSAH

ÚVOD	13
1 KLIMATICKÁ ZMENA.....	14
1.1 Skleníkový efekt	15
1.2 Skleníkové plyny.....	16
1.2.1 Oxid uhličitý	16
1.3 Vývoj emisí CO ₂	17
1.3.1 Minulost'.....	18
1.3.2 Súčasnost'	18
1.3.3 Budúcnosť	20
1.4 Nízkouhlíkové zdroje energie	21
1.4.1 Obnoviteľné zdroje energie.....	21
1.4.2 Jadrová energia	22
2 TECHNOLÓGIE NA ZACHYTÁVANIE A SEPARÁCIU CO₂ (CCS)	23
2.1 Zachytávanie CO ₂ zo spalín.....	23
2.1.1 Zachytávanie CO ₂ pred spaľovaním	23
2.1.2 Spaľovanie s čistým kyslíkom (Oxy-fuel combustion capture).....	25
2.1.3 Zachytávanie CO ₂ po spaľovaní	27
2.2 Separáčn� metody	28
2.2.1 Chemická absorpcia	28
2.2.2 Fyzikálna absorpcia.....	29
2.2.3 Adsorpcia zmenou tlaku a teploty.....	30
2.2.4 Adsorpcia tuhými rozpúšťadlami.....	30
2.2.5 Kryogénna separácia	31
2.2.6 Membránová separácia	31
2.3 Environmentálna bilancia technológie CCS.....	32
3 ZACHYTÁVANIE CO₂ A JEHO VYUŽITIE (CCU).....	34
3.1 Mineralizácia.....	35
3.2 Výroba nápojov a potravín.....	35
3.3 Biologické využitie	35
3.4 Terciárna ťažba ropy (EOR) a metóda ECBM	36
3.5 Palivá a chemikálie	36
4 BUDÚCNOSŤ TECHNOLÓGII NA ZNIŽOVANIE VYPÚŠŤANIA CO₂	37
4.1 CCS a CCU v budúcnosti.....	37
4.1.1 BECCS (Bioenergia so zachytávaním a ukladaním uhlíka)	37
4.1.2 Vylepšenie absorbentov	37
4.1.3 Porovnanie rozpúšťadiel na báze MEA/voda s rozpúšťadlami bez vody	37
4.2 Technológie s negatívnymi emisiami	38
4.3 Elektrifikácia	39
4.4 Ďalšie technológie s cieľom znižovania CO ₂	40
5 EKONOMICKÉ ASPEKTY MITIGÁCIE KLIMATICKEJ ZMENY	41
5.1 Ekonomická situácia v Českej republike a na Slovensku	41
5.1.1 Energetická transformácia v Českej republike.....	42

5.2	Udržitelné modely ekonomiky	43
5.3	Finančná bilancia CCS a CCU	45
5.4	Náklady na ďalšie riešenia klimatickej zmeny	46
5.5	Ďalšie benefity prechodu na nízkouhlíkové zdroje	46
6	ZHODNOTENIE MOMENTÁLNEJ SITUÁCIE.....	48
7	ZÁVER	50
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	51
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK	58
	ZOZNAM OBRÁZKOV	59

ÚVOD

Od vzniku prvého parného stroja a začiatku priemyselnej revolúcie spoločnosť neustále prosperuje a ekonomicky sa rozvíja. So zlepšovaním kvality života prichádza aj zvýšený dopyt po energii, ktorá musí uspokojovať základné ľudské potreby, napríklad vykurovanie, osvetlenie či mobilitu. Vo výrobe energie však dominujú fosílna palivá ako uhlie, zemný plyn a ropa, ktoré vedú k rýchlemu nárastu antropogénnych emisií oxidu uhličitého a ostatných skleníkových plynov. Emisie zo spaľovania fosílnych palív sú hlavným dôvodom historicky najrýchlejšieho rastu teploty, ktorý má za následok ohrozenie biosféry Zeme, ktorej súčasťou sú okrem zvierat a rastlín aj ľudia.

Klimatická zmena je komplexná téma, celosvetovo rezonujúca vo viacerých hospodárskych sektoroch naraz. Jej negatívne dôsledky predstavujú jeden zo súčasných najzávažnejších problémov ľudstva. Spája totiž technologický pokrok, ekologické dopady, výrobu energie či ekonomiku, a vytvára tak problém na globálnej úrovni, ktorý je nutné vyriešiť efektívnym spôsobom. Správne inžinierske riešenia majú obrovský potenciál oslobodiť atmosféru od nadmerných emisií skleníkových plynov produkovaných najmä energetikou a priemyslom.

Aj keď existuje množstvo teoretických technológií, ktoré môžu byť aplikované priamo v mieste vzniku skleníkových plynov, len obmedzený počet je už využívaný aj na komerčnej úrovni. Medzi tie najznámejšie patria technológie CCS (Carbon capture and storage), ktoré je možné využiť v konvenčných elektrárnach, teplárnach a priemysloch spaľujúcich fosílna palivá. Pre producentov skleníkových plynov je technológia zaujímavá, pretože umožňuje využívať rovnaký princíp výroby energie s menšou modifikáciou zachytenia a uloženia vyprodukovaného oxidu uhličitého do podzemných úložísk. Novšou obdobou sú technológie CCU (Carbon capture and utilization), ktoré CO₂ po zachytení namiesto uloženia (sekvestrácie) využijú na výrobu hodnotných produktov ako chemikálie či palivá. Existujú aj technológie s negatívnymi emisiami, ktoré nové emisie nevytvárajú a tie existujúce naopak znižujú. Technologické riešenia, ktoré sa zaoberajú priamym zachytením CO₂, sú doplnené obnoviteľnými zdrojmi energie, ktoré vyrábajú zelenú energiu s minimálnymi emisiami, a rôznymi ďalšími variantami. Pre úspešný výskum a zavedenie inžinierskych riešení klimatickej zmeny sú okrem samotných technológií dôležité aj správne nastavené klimatické politiky, ekonomická podpora a financovanie najmä perspektívnych projektov.

V tejto práci budú analyzované ako komerčné technológie, tak aj najnovšie technológie a možnosti napomáhajúce mitigácii zmeny klímy, ich technologické prevedenie a možné obmedzenia prevádzky, celková bilancia uhlíku pri jednotlivých riešeniach, zhodnotenie momentálnej situácie v Českej republike, na Slovensku a vo svete. Práca prepojí finančnú a environmentálnu časť klimatickej zmeny spolu s technickou, načrtne výhľady do budúcnosti a zhrnie riešenia, ktoré majú najväčší potenciál zredukovať emisie CO₂ v atmosfére.

1 Klimatická zmena

Pod pojmom klimatická zmena je definovaná zmena v klimatickom systéme, spôsobená najmä emisiami skleníkových plynov, ktorá so sebou prináša rad negatívnych dôsledkov [1]. Skleníkové plyny ako oxid uhličitý majú za následok zachytávanie tepla v zemskej atmosfére, odborne nazývaného skleníkový efekt. Zachytené teplo je hnacou silou globálneho otepľovania, prejavujúceho sa na pevnine aj v oceánoch. Zdroje emisií je možné rozdeliť na dva druhy: pochádzajúce z prírodných systémov a antropogénne, spôsobené činnosťou človeka.

Lesné požiare, zemetrasenia, topenie ľadovcov alebo vulkány vypúšťajú množstvo CO₂ (oxidu uhličitého), ktorý bol uskladnený v zemi [1]. **Ľudská aktivita najviac prispieva k vypúšťaniu emisií výrobou energie**, industriálnymi aktivitami a nadmerným využívaním pôdy [2]. Narušenie rovnováhy kolobehu uhlíku v prírode so sebou prináša negatívne dopady zasahujúce okrem atmosféry aj biosféru a hydrosféru, ktorá sa priamo dotýka hospodárstva, životného prostredia a zdravia ľudskej populácie [3].

Pochopenie faktu, že Zem sa nachádza v stave klimatickej pohotovosti, je kľúčové. Indikátory klimatickej zmeny sú primárne:

- **teplota**, ktorej zvyšovanie vidíme na extrémnych suchách, vlnách horúčav a **požiarioch**, a tie sú priamy zdroj CO₂,
- dažde, ktoré keď sú v abnormálnych množstvách spôsobujú **potopy**, zosuvy pôdy, silné búrky alebo **hurikány**,
- **zvýšenie hladiny mora**, na základe topiacich sa ľadovcov taktiež vznikajú okrem iného aj potopy a vypustenie uložených skleníkových plynov,
- **okysľovanie oceánov**, čo vedie k zmenám v populácii zvierat, zničeniu korálov, a taktiež ovplyvneniu rastlín, pričom niektorým druhom nadmerné CO₂ pomôže, no iným ublíži [1] [4].

Dopady sú synergické a hoci aj zdanlivo malá zmena v prírode ovplyvní ďalšie procesy, ktoré sú prepojené [4]. Prírodné katastrofy sa dejú a budú diať aj bez ľudského zásahu, dôležitým ale ostáva pochopenie priameho prepojenia a zväčšovania ich dopadov [1] [5].

Rôzne vplyvy na podnebie majú rôzne podoby rozoznatelnosti v záznamoch o podnebí. Lepšie pochopiteľný súvis medzi klimatickou zmenou a ľudským konaním je z pohľadu zmeny geografickej a sezónnej, ako zo zmeny jediného čísla, napríklad teploty [5].

Medzi tieto komplexnejšie zmeny patrí spomínané otepľovanie zemského povrchu, predlžovanie sa ročných období a ich náhle zmeny, otepľujúci sa oceán, zvyšovanie atmosférickej vlhkosti, zvýšenie hladiny mora alebo topenie sa ľadovcov [5]. To, akým štýlom sa menia spomínané deje, je predpovedané mnohými počítačovými modelmi, ktoré sú založené na overených fyzikálnych princípoch s ohľadom na ľudské aktivity [3] [5]. Naša klíma tieto modely nasleduje, čo značí, že existuje súvislosť medzi ľudskými aktivitami a urýchlenou klimatickou zmenou.

Klíma sa mení neustále [3] [5]. Dôležité je, že tentoraz sa nemení prirodzene a zmena je príliš rýchla. Momentálna rýchlosť otepľovania je najrýchlejšou známou prírodnou trvalou zmenou v globálnom merítku [5]. Môže sa zdať neveriteľné, že ľudia ovplyvňujú tak obrovský systém, ako je podnebie. Populácia však denno-denne vypúšťa emisie z áut, spotrebovávajú nadmerné množstvo energie kúrením alebo osvetľovaním, konzumuje jedlo privážané z druhého konca sveta lietadlom alebo kamiónom, oberá Zem o fosílnu palivá, a znečisťuje ovzdušie rôznymi inými, priamymi či nepriamymi spôsobmi [6].

Za posledných 200 rokov sa priemerná teplota zvýšila o približne 1 °C [5]. To sa nemusí zo začiatku zdať ako veľké číslo, no ak bude tento trend pokračovať bez potrebných zmien, do

konca 21. storočia môže teplota stúpnuť o ďalších 2,6 – 4,8 °C [5]. Zmena, síce aj o veľmi málo, vážne ovplyvňuje ľudí, zvieratá a prírodu [6].

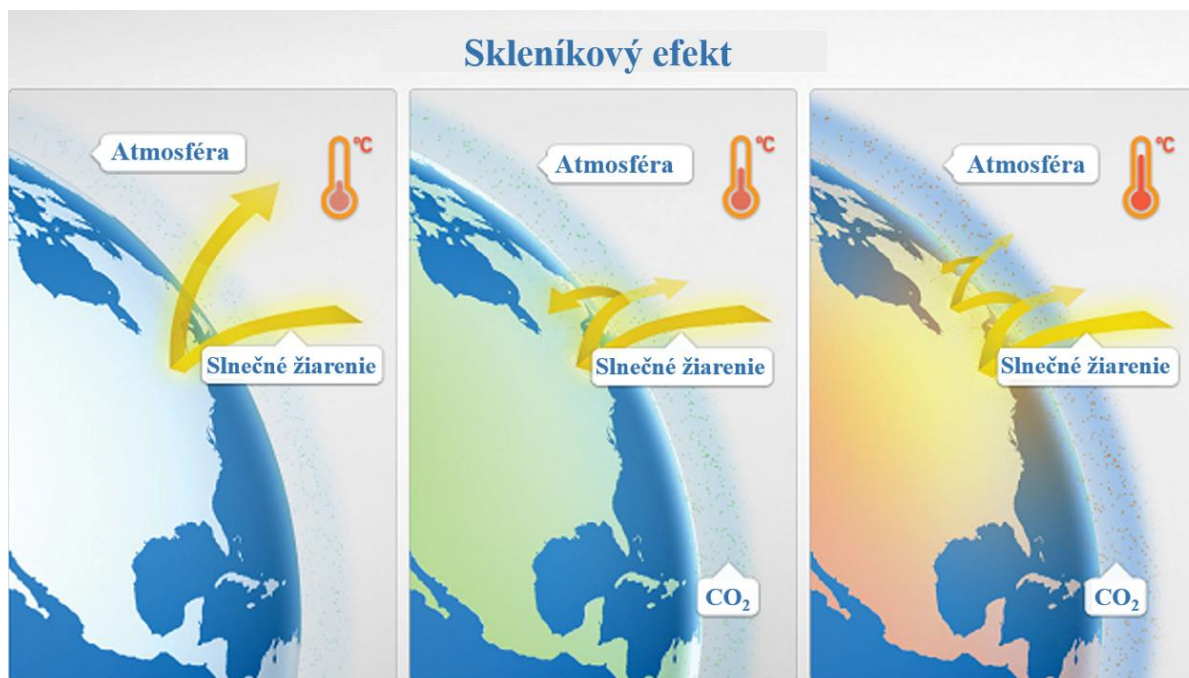
Dôkazom, že klíma sa mení prirýchlo, je napríklad **extrémne počasie**. Zemská spodná atmosféra sa stáva teplejšou a vlhkejšou, to dáva potenciál väčšej energii pre silné búrky a dažde, hurikány, tornáda, náhle návaly tepla a zimy, jednoducho všetky typy počasi, ktoré sme zažívali len zriedkavo, sa teraz opakujú čoraz častejšie a s vyššou intenzitou [5].

Ďalšie zmeny sú viditeľné na zvýšení hladiny mora. Hladina sa zvyšuje kvôli otepľovaniu oceánu (termálna expanzia), topeniu horských ľadovcov po celom svete a masovými stratami z grónskych a antarktických ľadovcov [6]. Krajiny ako Holandsko, Bangladéš, alebo ostrovy v Pacifiku už bojujú so záplavami viac, ako hocikedy predtým [6]. Dlhodobé merania hladín, prúdov a dáta zo satelitov odhadli zvýšenie približne o 3,6 milimetra každý rok za poslednú dekádu [5].

Na podporu boja proti klimatickej zmene boli založené viaceré organizácie, napríklad **IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change, Medzivládny panel o zmene klímy). Podpísali sa aj viaceré dohody a zmluvy, medzi najznámejšie patrí nepochybne **Rámcový dohovor OSN o zmene klímy** [7], **Parížska dohoda** [8] alebo **Kjótsky protokol** [9].

1.1 Skleníkový efekt

Slnečné žiarenie dopadajúce na povrch planéty zabezpečilo život taký, aký ho poznáme. Keby sa väčšina žiarenia, ktoré prichádza zo Slnka, iba odrazila zo zemského povrchu, teploty na Zemi by dosahovali rádovo o desiatky stupňov menej [10]. Skleníkové plyny, ktoré sa nachádzajú nad zemským povrchom, bránia úniku slnečným lúčom naspäť do vesmíru, viď obr. 1.1. Vďaka ním odíde len určitá časť a ostatné teplo vyprodukované žiarením ostane pri zemskom povrchu a spôsobuje globálne oteplenie esenciálne pre život [10].



Obr. 1.1: Schéma skleníkového efektu – prerobené podľa [11]

Z tejto skutočnosti vyplýva, že skleníkový efekt je prirodzená a neodmysliteľná časť vývoja a existencie života [10]. Problém nastáva, keď je slnečného žiarenia pri povrchu zrazu

príliš mnoho. To sa deje vtedy, keď sa v atmosfére nachádza zvýšené množstvo skleníkových plynov. Tie zadržia pri povrchu až príliš veľkú časť tepla zo Slnka, čo má za následok prehrievanie sa Zeme.

1.2 Skleníkové plyny

Za skleníkový efekt môžu najmä niektoré druhy plynov, ktoré sú zložené z troch alebo piatich atómov a ich hlavná úloha v skleníkovom efekte je zabránenie úniku tepla a slnečného žiarenia z atmosféry. Dokážu to absorbovaním dlhovlnného infračerveného žiarenia [10].

Medzi najznámejšie skleníkové plyny patria oxid dusný, oxid uhličitý, metán, chlórfluórované uhľovodíky, ale aj obyčajná vodná para. Tieto plyny ostávajú v atmosfére veľmi dlhú dobu [12].

Vodná para je najviac zastúpeným skleníkovým plynom a má tzv. pozitívnu spätnú väzbu, čo znamená, že zosilňuje otepľovanie. Ako sa ohrieva povrch, viac vody sa odparuje, čo ešte napomáha zvýšeniu obsahu pary v atmosfére. Odparovanie vody však z veľkej miery nedokážeme ovplyvniť. V atmosfére sa ako jediná nachádza len niekoľko týždňov [12].

Metán (CH_4) je oveľa aktívnejší skleníkový plyn ako napríklad CO_2 , no vo vzduchu sa nachádza v oveľa menšom množstve. Je zložený z piatich atómov a vzniká prírodnými zdrojmi aj ľudskou činnosťou, v poľnohospodárstve, najmä pri pestovaní ryže, alebo pri rozklade odpadu [12].

Oxid dusný (N_2O) vzniká pri využívaní komerčných, ale aj organických hnojív, spaľovaní fosílnych palív alebo biomasy, je pokladaný za silný skleníkový plyn [12].

Chlórfluórované uhľovodíky (známe aj ako CFC z anglického chlorofluorocarbon) sú známe najmä kvôli ich schopnosti ničiť ozónovú vrstvu. Sú to syntetické plyny vytvorené v priemysle [12].

1.2.1 Oxid uhličitý

Nadmerné emisie CO_2 z antropogénnych zdrojov majú veľký dopad na globálne otepľovanie a vytvorili nerovnováhu v zemskej atmosfére a oceánoch (okysľovanie a zvyšovanie hladiny) [11].

Oxid uhličitý je najznámejší, trojatómový skleníkový plyn. Vzniká napríklad pri dýchaní, vulkanickej činnosti, odlesňovaní alebo horení. Od industriálnej revolúcie sa koncentrácia oxidu uhličitého v atmosfére zvýšila až o 47 % [12].

Uhlík je ale všade okolo nás – a samozrejme aj v našej DNA. Ako štvrtý najviac obsiahnutý prvok vo vesmíre, plní dôležitú úlohu v pomalom aj rýchlom uhlíkovom cykle. Pomalý cyklus funguje medzi kameňmi, pôdou, oceánom a atmosférou a trvá stovky miliónov rokov. Rýchly cyklus sa skladá z pohybu uhlíku v prírode a biosfére v období značne kratšom, okolo 70 rokov. Ak sú tieto cykly nerušené, udržujú v atmosfére, rastlinách aj oceánoch takmer stabilnú koncentráciu uhlíka [4].

Už v minulosti sa uhlíkový cyklus zmenil v reakcii na zmenu podnebia [13]. Dnes sa cyklus mení rýchlejšie kvôli ľudskému zásahu. Oplyvňujeme ho spaľovaním fosílnych palív a odlesňovaním. Tým pádom sa uhlík presúva z pomalého cyklu do toho rýchleho [4].

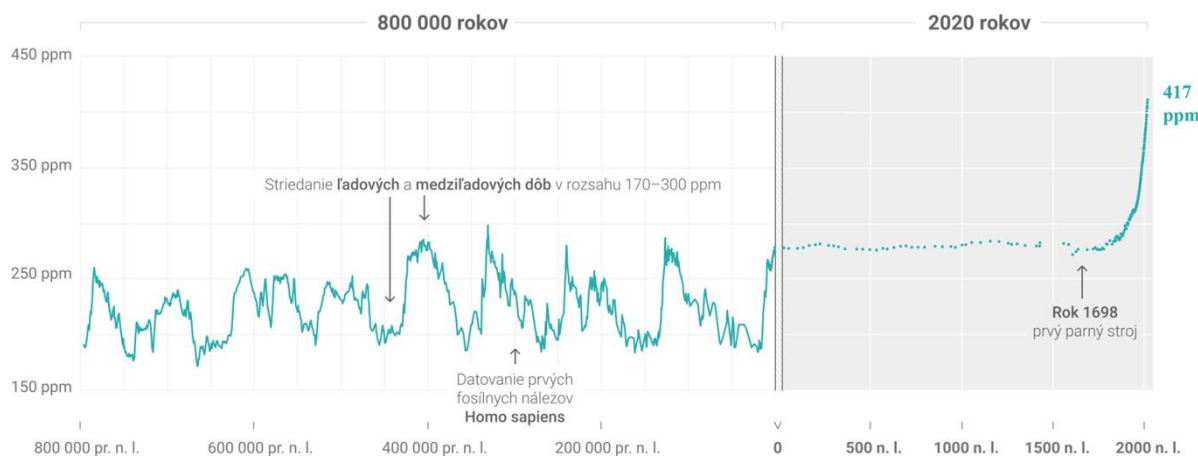
Pri horení primárne fosílnych palív ako hnedé uhlie alebo ropa sa z uhlíku a kyslíku vytvára značné množstvo CO_2 . Ten sa vytvára napríklad aj pri ťažbe a spracovaní zemného plynu, rafinácii ropy, priemyselnej výrobe, alebo sa nachádza v emisiách z dopravy. Ak je ho v atmosfére prirodzené množstvo, plní najmä pozitívnu úlohu pri „chcenom“ otepľovaní zemskeho povrchu, slúži rastlinám na výrobu energie a je dôležitou súčasťou potravinového reťazca väčšiny živočíchov [11].

Najznámejšia a zároveň najľahšia „technológia“ na zachytenie a uloženie oxidu uhličitého je nepochybne strom. Uloženie môže byť dlhodobé, no je ovplyvnené prírodnými a ľudskými zásahmi ako požiare, suchá alebo choroby rastlín [1]. Miesta vhodné na vysádzanie nových lesov sú limitované nadmorskou výškou alebo využívaním pôdy na poľnohospodárstvo.

Za výrub stromov je primárne zodpovedné expanzívne poľnohospodárstvo. Rapídne zvýšenie produkcie sóje a palmového oleja sa v posledných rokoch výrazne odzrkadlilo na lesoch juhovýchodnej Ázie a Amazónie [14]. Aj keď je **plantáž palmy olejnej** schopná absorbovať približne o 20 ton CO₂ na hektár za rok viac ako pôvodný les (64 ton na hektár za rok oproti 42.4 tonám na hektár za rok), výrazne ovplyvňuje biodiverzitu, čistotu vzduchu, ničí a vysušá pôvodné rašeliniská a vypúšťa pritom v nich uschovaný oxid uhličitý [15]. Palma olejná je však plodina poháňajúca ekonomiku vo viacerých štátoch a približne 35 % celosvetovej produkcie rastlinného oleja pochádza z týchto plantáží [16]. Je preto naliehavé rozvíjať trvalo udržateľné pestovanie palmy olejnej [15].

1.3 Vývoj emisií CO₂

Bez zásahu človeka by sa uhlík z fosílnych palív dostal do ovzdušia prirodzenou a postupnou cestou – vulkanickou činnosťou. Tento spôsob by za bežných, nenarušených podmienok trval milióny rokov [4]. Spaľovaním a využívaním fosílnych palív tento proces výrazne urýchľujeme. Uhlík, ktorý je uvoľnený do vzdušia rýchlo, sa však akumuloval milióny rokov a patrí do pomalého cyklu. Vývoj emisií CO₂ a ich rekordný nárast za posledné desaťročia je na obr. 1.2. Hodnota 417 ppm (parts per million) je aktuálna pre máj 2020 [17].



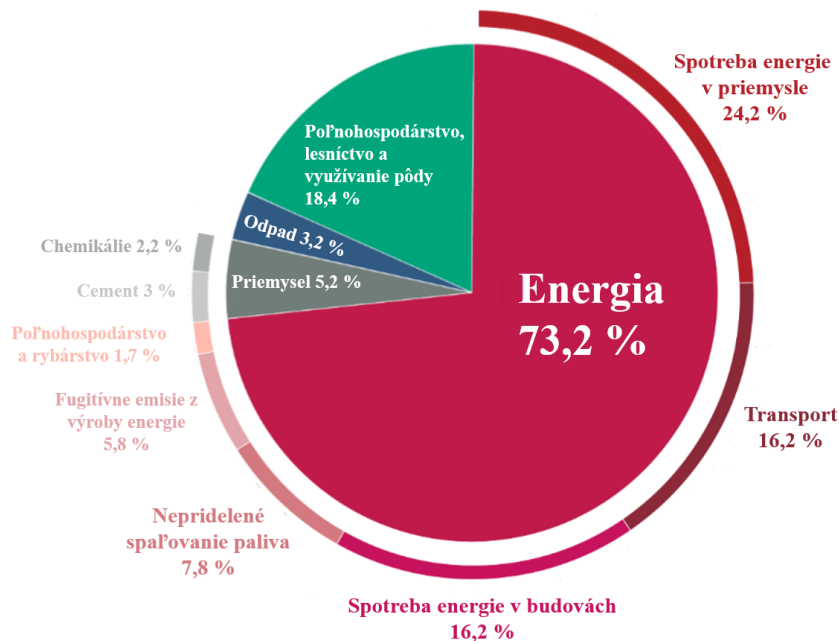
Obr. 1.2: Vývoj emisií CO₂ od 800 000 pr. n. l. do roku 2020 – prerobené podľa [17]

V Paríži sa na konci roku 2015 podpísala právne záväzná medzinárodná zmluva hovoriaca o zmene podnebia, ktorú prijalo 196 zmluvných strán, a nesie názov **Parížska dohoda** [8]. Táto dohoda sa snaží zamedziť zvýšeniu teploty do konca 21. storočia o viac ako 1,5 °C v porovnaní s dobou pred priemyselnou revolúciou.

Parížska dohoda je dôležitým míľnikom v procese spomalenia zmeny podnebia, spája totižto všetky národy, aj tie s najväčšími emisiami ako Čína, USA alebo India [8].

Medzi najväčších producentov emisií patria najmä sektory využívajúce veľké množstvo energie, ako priemysel a továrne spaľujúce fosílna palivá, spracovanie kovov, všetky druhy dopravy, ktoré využívajú spaľovacie motory a spotreba energie v budovách [2]. V roku 2016 boli emisie z tohto sektoru rovné až 73,2 %. Veľkú časť CO₂ tiež produkuje poľnohospodárstvo

a využívání půdy (18,4 %), cementárne a chemický priemysel (5,2 %) a odpad/skládky (3,2 %) [2]. Presný rozpis producentov globálnych emisií skleníkových plynov za rok 2016 je na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Globálne emisie skleníkových plynov podľa sektorov (2016) – prerobené podľa [2]

1.3.1 Minulosť

Priemyselná revolúcia nepochybne priniesla obrovské množstvo inovácií. S prvým parným strojom okrem výhod prišla aj potreba paliva na jeho pohon. Keď sa hovorí o sledovaní množstva oxidu uhličitého vo vzduchu, ako referenčný bod sa používa najmä začiatok priemyselnej revolúcie [5].

Už vtedy vedci vedeli, že CO₂ je jeden z hlavných skleníkových plynov a má priamy vplyv na teplotu Zeme. Od roku 1850, kedy bol zaznamenaný prvý teplotný záznam z prístroja, je dekáda od 2010 – 2019 najteplejšia [5]. Odvtedy, až do roku 2019 priamymi meraniami z atmosféry a zo vzduchu uviaznutého v ľade sa **koncentrácia CO₂ zvýšila až o 40 %** [5].

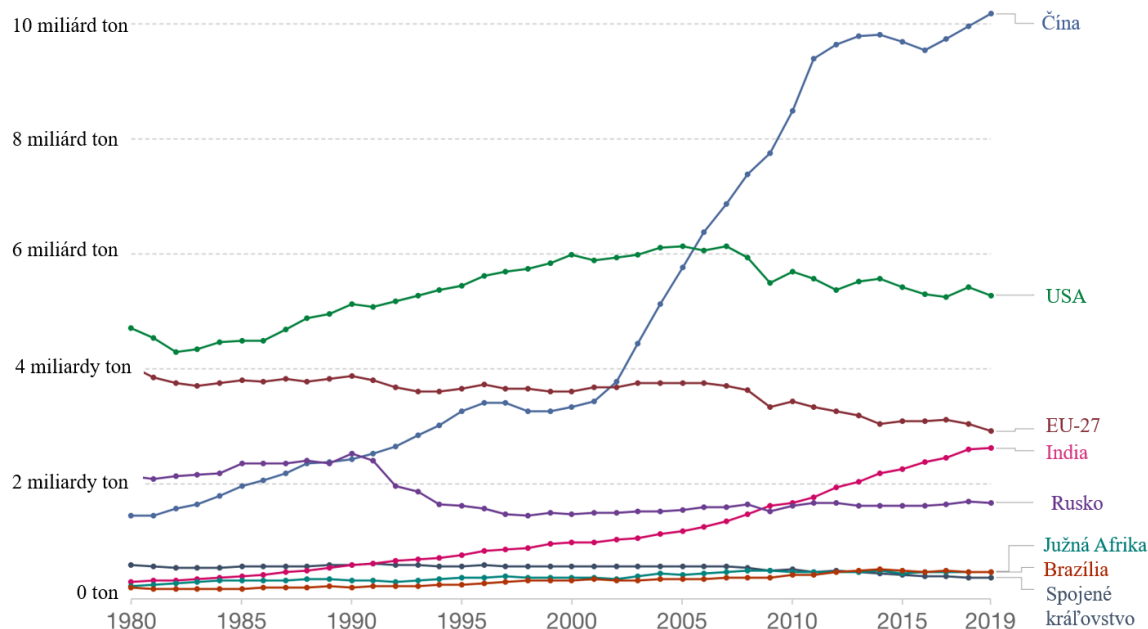
V roku 1959 sa na Havaji v observatóriu Mauna Loa nameralo 316 ppm, čo v praxi znamená, že na milión molekúl v atmosfére bolo 316 z nich oxid uhličitý [10]. V roku 2019 bolo namerané číslo 411 ppm [10]. Táto koncentrácia je najvyššia za posledné dva milióny rokov a zaznamenávajú ju už dlhšiu dobu viaceré nezávislé zdroje [4] [5].

Popri koncentrácii oxidu uhličitého vzrástli aj koncentrácie metánu o 150 % a oxidu dusného o 20 % [10].

1.3.2 Súčasnosť

Globálne emisie v roku 2019 opäť rástli, a to o 0,9 %. Oproti roku 2018 je to polovičný nárast [18]. Čo sa týka výroby energie a cementu, Čína produkuje od roku 2006 najviac emisií zo všetkých krajín [19]. V roku 2019 vyprodukovala viac ako 10 miliárd ton, čo je oproti roku 2018 opätovný nárast. Naopak Európska únia alebo USA jemne znížili trend ako v celkových

emisiách, tak aj v energetike. Ročne sa vyprodukuje celosvetovo okolo 38.0 Gt CO₂ [19]. Vývoj množstva emisií CO₂ v rokoch 1980 – 2019 je viditeľný na obrázku 1.4.

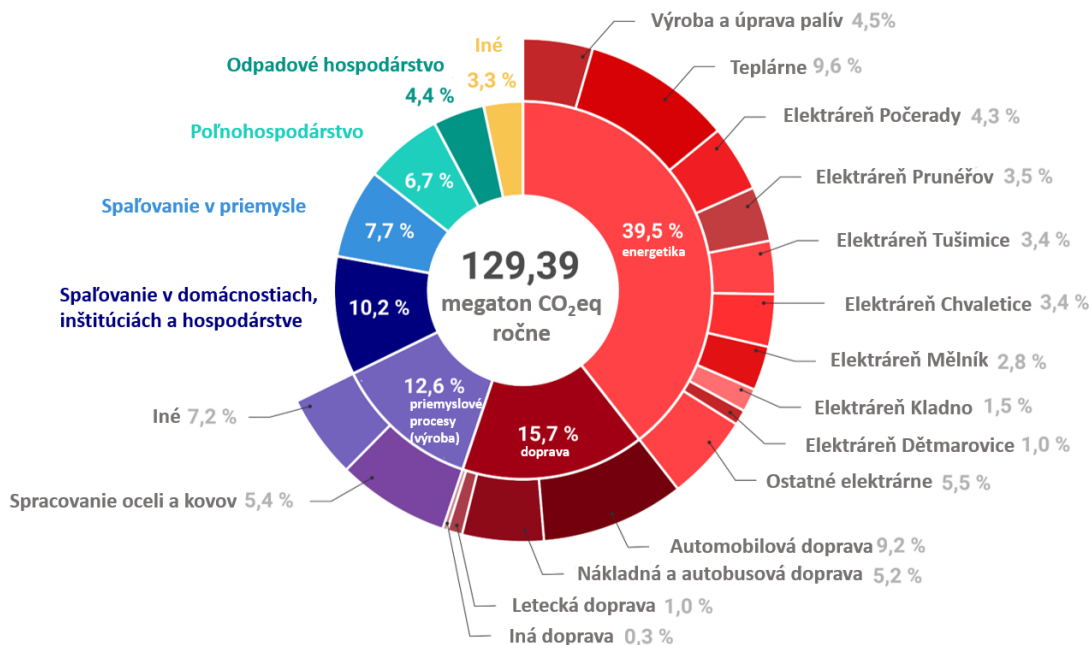


Obr. 1.4: Vývoj emisií krajín s najväčšou produkciou v miliardách ton CO₂ – prerobené podľa [19]

Svetový priemer za rok 2019 je 4,72 ton CO₂ na obyvateľa [18]. Keď s priemerom porovnáme Českú republiku alebo Slovensko, v Česku sa vyprodukovalo takmer 10 ton na obyvateľa, čo je značne nadpriemerné, avšak nižšie ako v roku 2018, kde toto číslo bolo až 12,19 ton [20].

Z detailných údajov o emisiách skleníkových plynov pre Českú republiku z roku 2018 je očividné, že energetika je zodpovedná za najväčší podiel emisií [20]. Až 25,4 % celkových emisií vzniká spaľovaním hnedého uhlia v elektrárňach, 9,4 % pochádza z teplární a ďalších 4,5 % vyprodukovala výroba a úprava palív. Ostatné emisie pochádzajú z dopravy, priemyslových procesov, hospodárstva a iných [20], vid' obrázok 1.5. Všetky druhy skleníkových plynov sú prepočítané na jednotku CO₂eq, ktorá zohľadňuje efekt plynov v atmosfére a prevedie ich na množstvo CO₂, ktoré by malo rovnaký efekt.

Na Slovensku sa v roku 2018 vyprodukovalo približne 8 ton na obyvateľa. V roku 2019 to bolo 6,6 tony, čo je len jemne nad svetovým priemerom [21]. Oproti Českej republike je energetika zodpovedná „iba“ za 17,1 % skleníkových plynov. Viac nechcených plynov sa vyprodukuje v priemyselnej výrobe (22,1 %), doprave (18,2 %) a spaľovaní v priemysle (17,5 %) [21]. Tento zdroj však nepočíta s dopravou a priemyselnou výrobou zaradenou do oblasti energetiky, ako tomu je na obr. 1.3. Je potrebné brať do úvahy, že tieto čísla by mali byť podstatne nižšie ak má byť dodržaná Parížska dohoda. Práve preto sú „zelené“ a uhlíkové neutrálne technológie kľúčovým riešením [8].



Obr. 1.5: Emisie CO₂eq Českej republiky rozdelené podľa zdroja v roku 2018 – prerobené podľa [20]

1.3.3 Budúcnosť

Mnoho komplikovaných procesov ovplyvňuje vývoj našej klímy [10]. Predikcia vývoja je preto obzvlášť komplexná úloha, aj keď sa v posledných rokoch podarilo vedcom urobiť významné pokroky v jej modelovaní. Nie je možné odhadnúť dostatočne dopredu, koľko CO₂ ľudstvo vypustí do ovzdušia. Primárne to totiž závisí na faktoroch ako globálna ekonomika, svetová produkcia a spotreba. Okrem toho, nie je úplne jasné ako funguje „pozitívna spätná väzba“ a ako presne je prepojená teplota s emisiami [10].

Vďaka Parížskej dohode v roku 2020 formulovali zaviazané krajiny svoje dlhodobé stratégie rozvoja technológií s nízkymi emisiami skleníkových plynov. Do roku 2030 by mohli byť „zero-carbon“ riešenia konkurencieschopné v odvetviach predstavujúcich viac ako 70 % globálnych emisií [8].

Keďže markantné množstvo svetových emisií vzniká v uhoľných elektrárnach, väčšina európskych štátov plánuje tzv. „**uhoľný phase-out**“, čo znamená ukončenie výroby energie z uhlia a následná náhrada produkcie čistejšími zdrojmi. Podľa analýzy by malo byť 72 % uhoľných elektrární do roku 2025 zatvorených aby sa dodržal plánovaný uhlíkový rozpočet [22]. K júlu 2020 už existujú viaceré uhlíkovo neutrálne štáty – Rakúsko, Belgicko a Švédsko. V niektorých štátoch, ako napríklad Island, Malta alebo Estónsko, sa nenachádzajú žiadne uhoľné elektrárne. Vo väčšine EU štátov, ako aj na Slovensku, je už rozhodnutý dátum na uhoľný phase-out [23].

Úplný odklon Slovenska od uhlia je očakávaný do roku 2030, prezidentka Zuzana Čaputová a ex-premiér Pellegrini ohlásili koniec využívania uhlia na výrobu elektriny do konca roku 2023 [23]. Slovensko sa taktiež pripojilo k aliancii PCCA (Powering Past Coal Alliance) [23].

Český dátum na úplný odklon od uhlia je stále otvorený. K plánovanému rozhodnutiu 1.2.2021 nedošlo [24]. Rozhoduje sa medzi tromi rôznymi rokmi, a to 2033, 2038 a 2043. Z nich je najviac pravdepodobný rok 2038, čo je jeden z neskorších spomedzi európskych

š státov [24]. Cieľom ČR je znížiť celkové emisie do roku 2030 o 30 % v porovnaní s rokom 2005, čo odpovedá 44 miliónom ton CO₂eq. Vnútroštátny plán taktiež obsahuje dlhodobé ciele do roku 2050, podľa ktorých dôjde, po naplnení politik a opatrení, k poklesu emisií skleníkových plynov o 34 % v porovnaní s rokom 2005 [25].

1.4 Nízkouhlíkové zdroje energie

S rýchlym sociálnym a ekonomickým vývojom narastá aj dopyt po elektrickej energii. Od roku 1850 vo svete vedie energia na báze fosílnych palív, čo sa ukázalo ako nie práve ekologicky výhodné riešenie [26]. Existujú viaceré varianty ako znížiť emisie a zároveň naplniť dopyt ľudstva na energiu. Znížiť spotrebu elektrickej energie, zvýšenie efektivity pri zaobchádzaní a výrobe elektriny, zlepšenie technológií na zachytávanie CO₂ z ovzdušia alebo zmena fosílnych palív na iné, „zelenšie“ druhy paliva, to sú oblasti, v ktorých sa energetika a ľudstvo ešte má kam posunúť. Najlepšia elektrina a teplo sú koniec-koncov tie, ktoré sú vyrobené efektívne alebo nevyužitú vôbec [26].

Okrem spomínaných spôsobov ako ušetriť atmosféru od oxidu uhličitého existujú tzv. nízkouhlíkové zdroje energie, do ktorých sú radené dve kategórie, a to obnoviteľné zdroje energie a jadrová energia.

1.4.1 Obnoviteľné zdroje energie

Ako obnoviteľný zdroj je rozumená energia vo forme solárnej, geofyzikálnej alebo biologickej, ktorá sa prirodzeným spôsobom obnovuje v miere rovnakej alebo prevyšujúcej jej úžitok [26]. Na výrobu elektrickej energie sa využíva slnečná a veterná energia, teplo z geotermálnej energie, vodná energia, biomasa, energia vln a príboja a termálna energia oceánu.

Výhody OZE (obnoviteľné zdroje energie) sú nevyčerpatelnosť zdroja, ekologickosť¹, sebestačnosť, prínos pre ekonomiku a ďalšie sociálne výhody. Naopak, za nevýhodu je braná veľká investícia potrebná na začiatku, ktorá sa navyše vráti až za dlhší čas, a nestálosť zdroja energie. Tieto nevýhody bránia veľkému rozmachu OZE, pretože na začiatku nie sú ekonomicky výhodné [26].

Bioenergia sa získava chemickou reakciou uvoľnenia energie z biomasy. Biomasa je biologický materiál žijúci alebo v začiatkoch štádia rozkladu, pochádza z palivového dreva, dreveného uhlia, poľnohospodárstva a iných zdrojov [26]. Biomasa sa môže použiť na spaľovanie za vzniku tepla alebo na premenu na rôzne biopalivá a následné využitie. Momentálne je to najrozšírenejší OZE. Okrem výhod existujú aj názory, že bioenergia vo veľkých množstvách priamo ovplyvní cenu potravín, vypustí počas minimálne prvých 50 rokov viac emisií ako fosílna palivá (trávnaté porasty a lesy sú úložisko CO₂) a mohla by mať dopad na biodiverzitu a vodu [26].

Slnečná energia je využívaná na výrobu elektrickej energie a tepla [26]. Jej priamy zdroj je vonkajšia vrstva Slnka vo forme tepla a svetla. Delíme ju na štyri hlavné typy:

- solárno-termálna, ktorá najmä ohrieva vodu,
- fotovoltická, ktorá vyrába elektrickú energiu priamo zo slnečných lúčov,
- koncentrovaná slnečná energia (CSP) generuje slnečnú energiu sústredením zrkadiel alebo lúp, a sústredenú svetlo sa mení na teplo,
- produkcia palív využívajúca solárnu energiu.

¹ Pri výrobe elektriny z OZE vzniká malé množstvo emisií (výroba dielov, doprava a zapojenie, oprava...).

Geotermálna energia pochádza z tepla vo vnútri Zeme. Je uložená v horninách a pare alebo kvapalnej vode, používame ju na výrobu elektrickej energie v tepelných elektrárnach alebo iných, domácich či poľnohospodárskych/priemyselných aplikáciách. Elektrická energia primárne slúži na základne zaťaženie, môže ale aj dopĺňať variabilnú výrobu elektriny. Na lokalizáciu sa využívajú podzemné prieskumné metódy a geotermálne vrty siahajú až do 5 km, vrtajú sa pomocou bežných metód rotačného vrtania podobným prístupom k rope a plynu [26].

Vodná energia využíva energiu z pohybujúcej sa vody medzi nižším a vyšším prevýšením. Je to vyspelá a zaužívaná technológia, druhá najviac využívaná z OZE a môžeme ju použiť okamžite alebo uskladniť. Vďaka svojim možnostiam využitia (samostatne aj v sieťach všetkých veľkostí), flexibilita a skladovacej schopnosti (ak sú spojené so zásobníkom) poskytujú širokú škálu využiteľnosti [26].

Energia z oceánov je definovaná ako energia, ktorú technológie získavajú z pohybu morskej vody, z chemického alebo tepelného potenciálu vody. OZE v energii z oceánu delíme na šesť rôznych zdrojov, na každý je potrebná iná technológia na konverziu. Sú to energia z vln, energia z prílivu a odlivu, z prílivových prúdov, energia z oceánskych prúdov, OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) – premena termálnej energie oceánov, a energia z využitia slanosti oceánov. Táto forma spracovania energie je v rannom štádiu vývoja [26].

Veterná energia sa využíva po tisícročia. Využitie na výrobu elektrickej energie začalo až v 70. rokoch minulého storočia pomocou väčších veterných turbín pripojených k sieti. Funguje na princípe premeny kinetickej energie pohybujúceho sa vzduchu na elektrickú energiu. Turbíny sa nachádzajú buď na pevnine, alebo v blízkosti mora či sladkej vody. V posledných rokoch zažíva veterná energia rozmach. Do roku 2050 by mohla dodávať až 20 % svetovej energie pri dostatočnej snahe rozvoja a využitia. Dodatočné vyvíjanie technológie by malo znížiť jej náklady a pokryť výpadky spôsobené nepredvídateľnosťou vetra [26].

1.4.2 Jadrová energia

Pri štiepení atómov, presnejšie uránu, je uvoľnená obrovská energia, ktorú jadrové elektrárne využívajú na ohrev pary, ktorá poháňa turbíny na výrobu elektriny. Keďže nie sú využité fosilné palivá, zaradíme túto energiu do energetiky bez emisií. Vďaka nej ušetríme 1,2 – 2,4 Gt CO₂ (gigaton oxidu uhličitého) v porovnaní s rovnakým množstvom vyrobenej energie uhlím alebo zemným plynom [1].

Medzi výhody jadrovej energie patrí spomínaná výroba energie bez emisií, možnosť fungovať nepretržite a byť tak spoľahlivý zdroj alebo odľahlosť elektrárne od obývaných oblastí [27]. Aj napriek schopnosti zmierniť klimatickú zmenu prichádzajú s nukleárnou energetikou nezanedbateľné negatíva. Tie sú napríklad risk rádioaktívnej katastrofy pri zlyhaní ľudí alebo reaktoru, veľké prevádzkové a výskumné náklady alebo nebezpečný odpad a zbavovanie sa ho [1].

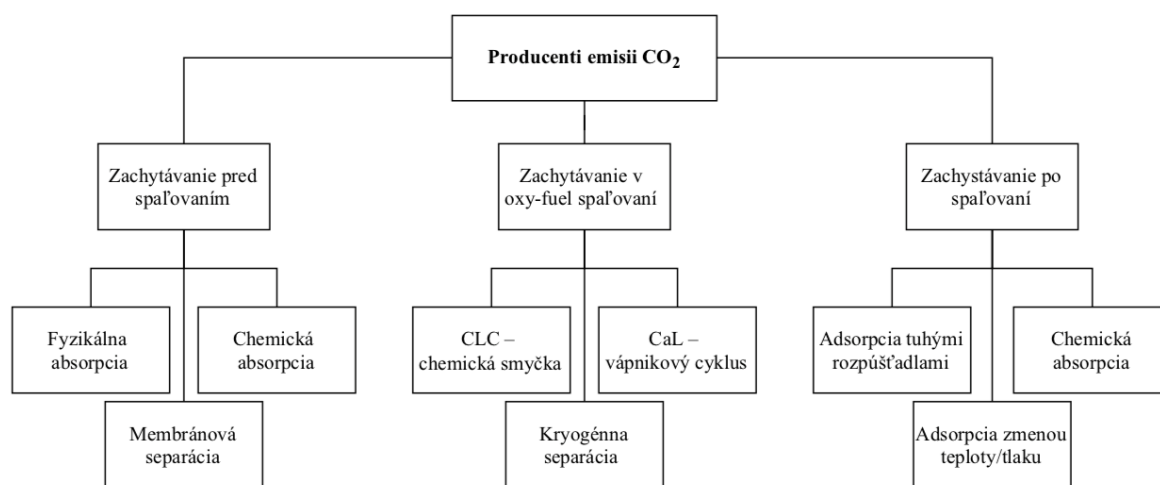
Mnoho jadrových elektrární po celom svete možno onedlho stratí licenciu kvôli zastaraným technológiám po 30 rokoch prevádzky. V krajinách ako Anglicko, USA alebo v Českej republike sa prichádza z mnohými projektami nových jadrových elektrární s najnovšími technológiami namiesto bývalých, starších verzii [27].

2 Technologické na zachytávání a separáciu CO₂ (CCS)

Technológie CCS boli navrhnuté a zostrojené s hlavným cieľom – eliminovať nadmerné vypúšťanie skleníkových plynov do ovzdušia z procesov, ktoré sa spoliehajú na fosílna palivá. Pre dosiahnutie dostatočne vysokej účinnosti sa technológie aplikujú najmä v mieste vzniku veľkého množstva skleníkových plynov, tam rôznymi spôsobmi zachytávajú emisie CO₂ hneď pri ich produkcii a následne ich sekvestrujú. Už niekoľko desiatok rokov sa technológie vyvíjajú a postupne využívajú v miestach najväčšieho vzniku emisií, a to ako v priemyselnom, tak aj energetickom sektore. CCS riešenia môžu byť sľubnou cestou k dosiahnutiu zmysluplného zníženia emisií CO₂ v blízkej budúcnosti [28].

2.1 Zachytávanie CO₂ zo spalín

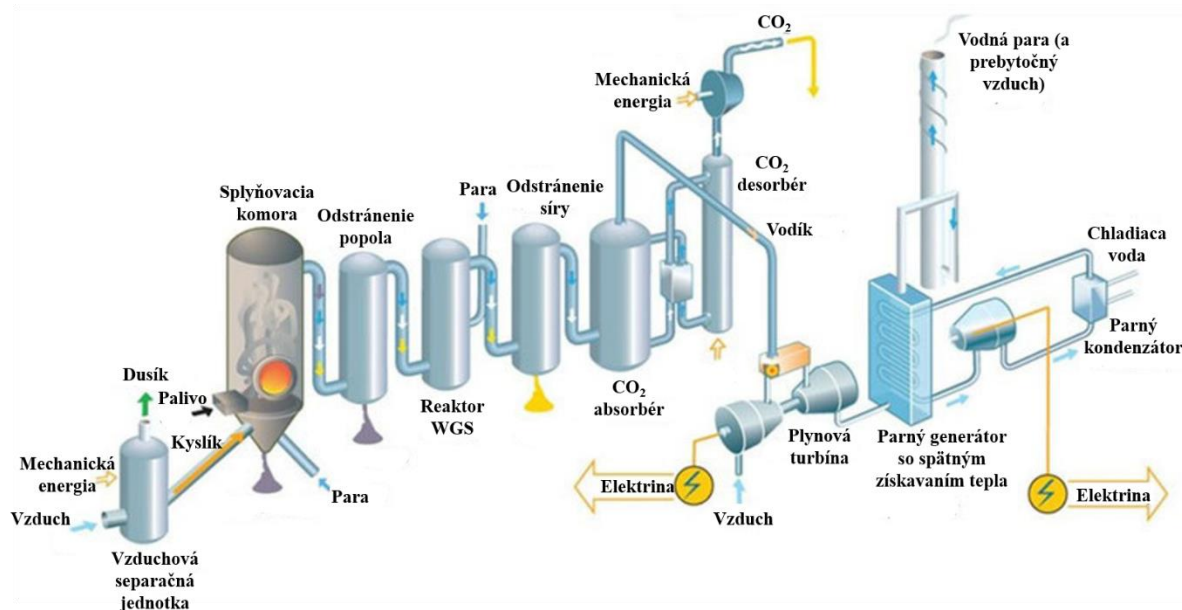
Proces zachytávania a separácie sa delí na tri hlavné spôsoby: zachytávanie CO₂ pred spaľovaním, oxy-fuel spaľovanie a zachytávanie CO₂ po spaľovaní. Technológie na separáciu dokážu zachytiť okolo 85 % až 95 % vyprodukovaného CO₂, čo vedie k poklesu vypusteného CO₂ o 80 – 90 % [29]. Dôvodom, že percento zachytených emisií sa nerovná percentu vypustených emisií je, že samotné technológie vyprodukujú pri ich výrobe, zavádzaní a nasledovnom využívaní nezanedbateľné množstvo CO₂ a iných skleníkových plynov [30]. Podrobnejšie rozdelenie technológií na zachytávanie emisií rozoberaných v tejto práci je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Rozdelenie technologických možností zachytávania emisií CO₂ rozobraných v tejto práci – prerobené podľa [30]

2.1.1 Zachytávanie CO₂ pred spaľovaním

Pri procese, ktorý sa tiež nazýva „pre-conversion capture“ alebo „pre-combustion capture“, vzniká oxid uhličitý ako nechcený vedľajší medziprodukt ešte pred spaľovaním. Oproti zachytávaniu po spaľovaní sa môže prevádzkovať za vysokých tlakov bez znečisťujúcich látok, vzniknutých pri spaľovaní, ako sú SO_x (oxidy síry) a NO_x (oxidy dusíka). Technológia je zároveň overená, napríklad v ropných rafinériách, a má veľkú šancu stať sa najviac efektívnou zo všetkých možností zachytávania. Ideálne využitie nachádza v IGCC (Integrated gasification combined cycle) elektrárnach [31].



Obr. 2.2: Schéma procesu zachytávania CO₂ pred spaľovaním – prerobené podľa [32]

Proces je zobrazený na obr. 2.2. Začína vo vzduchovej separačnej jednotke, ktorá vyseparuje dusík a kyslík. Uhl'ovodíkové palivo (najčastejšie metán alebo splyňované uhlie) sa najskôr premení na syntézny plyn. Pri splyňovaní sa využíva vzduch alebo kyslík (O₂). Proces parciálnej oxidácie, kde sa spracováva O₂, dodáva teplo potrebné na chemický rozklad paliva a výrobu syntézneho plynu, tzv. syngasu. Syngas tvorí z veľkej väčšiny vodík (H₂) a oxid uhoľnatý (CO), v malých množstvách v ňom nájdeme aj iné prímеси plynov. Syntézny plyn sa potom spracuje v reaktore WGS (water-gas shift) podľa reakcie 2.1. V ňom sa vstreknutím vodnej páry prevádza CO na CO₂ a zvyšujú sa molárne koncentrácie CO₂ a H₂ na 40 – 55 % [33].



Posledným krokom je oddelenie oxidu uhličitého od čistého vodíka, ktorý sa používa na výrobu elektriny. Generátor rekuperácie pary z plynovej turbíny využije odpadové teplo a na báze Rankinovho cyklu vyrobí dodatočnú elektrinu.

Medzi najznámejšie využitia patrí spomínaný IGCC, v slovenčine známy ako integrovaný paroplynový cyklus alebo elektrárň s integrovaným splyňovaním uhlia. IGCC sú elektrárne novej generácie, ktoré môžu zvýšiť výrobu energie o približne 15 % a zároveň znížiť CO₂ v porovnaní s konvenčnými tepelnými elektrárnami. Environmentálne zlepšenie dosiahneme vďaka kombinácii so splyňovaním uhlia a systémom kombinovaného cyklu GTCC (Gas Turbine Combined Cycle) s plynovou turbínou [34]. Škodlivé emisie SO_x a NO_x sa rovnako znížia. IGCC navyše spotrebúva menšie množstvo vody na úpravu spalín, pretože upravuje palivový plyn s vyšším tlakom a nižším objemom. Systémy delíme na „air-blown“ a na „oxygen-blown“ [34].

Air-blown IGCC využíva vzduch na splyňovanie uhlia. Najskôr je uhlie v splyňovači premenené na plyn, ktorý musí byť neskôr očistený od nechcených prvkov ako síra. Čistý plyn sa dodáva do GTCC cyklu, ktorý spaľuje vyčistený plyn ako palivo pre výrobu energie. Teplo zo spalín je znova použité v parnom generátore na zvýšenú účinnosť výroby energie [34].

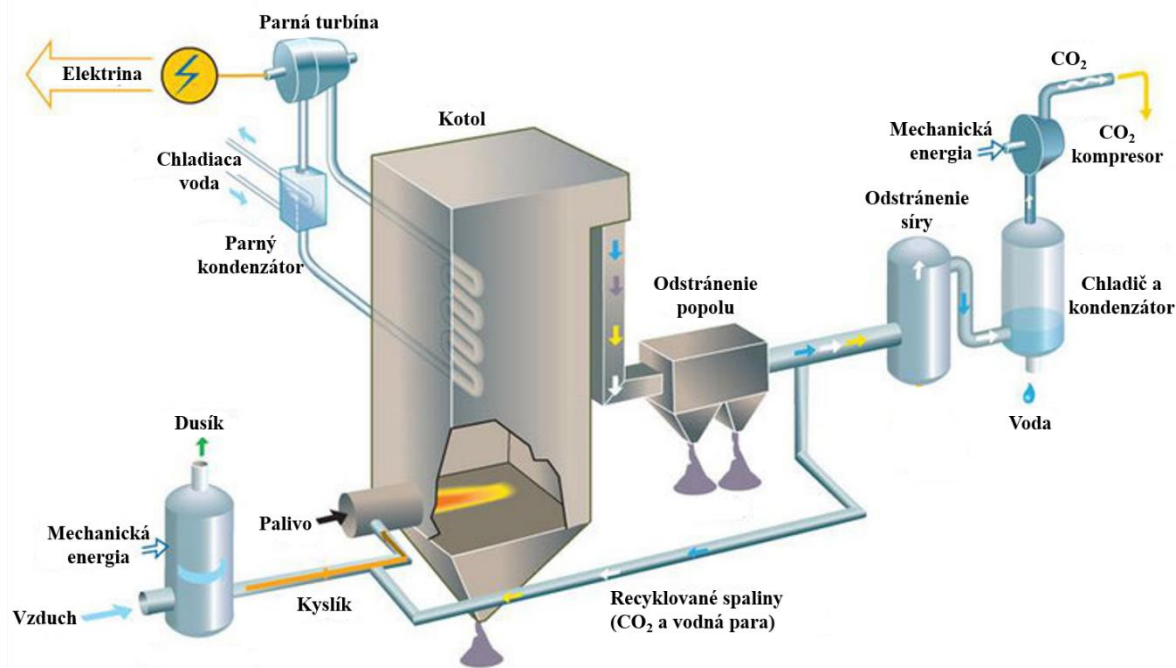
Oxygen-blown IGCC funguje na podobnom princípe, ako činidlo na splyňovanie je ale využitý kyslík.

Rovnako ako v zachytávaní po spaľovaní sa spotrebúva značná časť energie na regeneráciu chemických rozpúšťadiel. V pre-combustion procese sa viac oplatí využívať fyzikálne rozpúšťadlá, ako sú zmesi dimetyléterov alebo chemické rozpúšťadlá ako roztoky amínov. Ich vhodnosť závisí od tlaku syngasu. Medzi najpoužívanejšie fyzikálne rozpúšťadlá patria Selexol a Rectisol [30].

Environmentálnou výhodou je možnosť zachytiť viac ako 90 % CO₂. Nevýhodou sú drahé procesy splyňovania, „water-gas-shift“ a odstraňovania NO_x emisií [35]. Pri rovnakom množstve zachyteného CO₂ je však **potrebné spracovať omnoho menší objem plynu ako pri zachytávaní po spaľovaní**. Vďaka tomu je veľkosť zariadenia menšia, avšak komplexnejšia, čo sa odzrkadlí aj na vyšších kapitálových nákladoch.

2.1.2 Spaľovanie s čistým kyslíkom (Oxy-fuel combustion capture)

Oxy-fuel zachytávanie sa používa iba v procesoch so spaľovaním, čo je hlavne výroba energie v elektrárnach na fosílna palivá, produkcia cementu a v železiarňach či oceľiarňach. Cieľom je spaľovanie práškoveho uhlia v prostredí s vysokým obsahom kyslíka pomocou čistého kyslíka zriedeného recyklovaným oxidom uhličitým alebo vodou [30]. Za týchto podmienok je hlavným produktom spaľovania CO₂ a H₂O, čo umožňuje jednoduchšie zachytenie CO₂ kondenzáciou vody vo výfukovom prúde [33].



Obr. 2.3: Schéma procesu spaľovania s čistým kyslíkom – prerobené podľa [32]

Proces na obrázku 2.3 opäť začína vo vzduchovej separačnej jednotke, ktorá vyseparuje nechcený dusík a veľmi čistý kyslík, ktorý je vháňaný do recyklovaného plynu v kotli. Vodná para je využitá na výrobu energie v turbíne a spaliny s CO₂ sú zachytené, vyseparované,

a vypustené bez CO₂. Výhodou sú spaliny tvorené najmä vodou a CO₂. Oxid uhličitý je v kompresore stlačený a pripravený na uloženie.

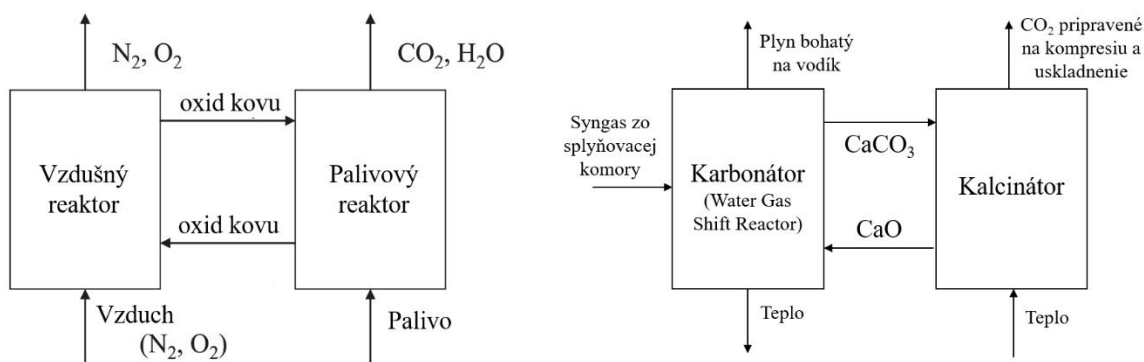
Medzi výhody metódy patria veľká redukcia NO_x emisií v porovnaní so spaľovaním vo vzduchu, najmä kvôli nižším hodnotám dusíku ako sú vo vzduchu, ale aj vďaka recyklácii spalín. Veľkou výhodou je tiež možnosť zavedenia ako do nových, tak do existujúcich elektrární. Princípy separácie vzduchu a recyklácie spalín sú už používané aj komerčne [33].

Ako v zachytávaní CO₂ pred spaľovaním, tak aj v spaľovaní v čistom kyslíku je potrebná separácia vzduchu vo vzduchovej separačnej jednotke. Ich množstvo je rozdielne, oxy-combustion vyžaduje oveľa viac čistého kyslíku, čo ekvivalentne zvyšuje náklady metódy. Okrem toho je potrebné využiť oveľa čistejší prúd kyslíku, ktorý je typicky vyrobený v nízkych teplotách pomocou kryogénnej separácie [33]. Samotná separácia je energeticky náročný proces, čo má za následok negatívny environmentálny dopad a vysoké náklady. Nové technológie ako spaľovanie v chemickej smyčke (CLC) alebo zachytávanie CO₂ vápnikovým cyklom (CaL) sa vyvíjajú na zefektívnenie záchytu oxidu uhličitého z plynných zmesí bez potreby separácie [33].

CO₂ zachytávanie na princípe chemickej smyčky je koncept cirkulácie tuhých látok medzi dvomi reaktormi. Metóda je veľa diskutovaná pre jej efektívnosť a relatívne nízku cenu v porovnaní s komerčnými technológiami záchytu [36].

CLC (Chemical looping combustion) je nepriamy spaľovací proces, v ktorom je palivo spálené bez priameho kontaktu so vzduchom v kyslíkovej atmosfére. Namiesto kyslíka **je ako činidlo použitý oxid kovu**. Ako palivá sa používajú najmä zemný plyn alebo syngas, čím inherentne zachytia CO₂ a nákladné rozpúšťadlo nie je potrebné [28] [36]. Zjednodušený proces je zobrazený na obr. 2.4 a).

CaL (Calcium looping cycle) je zachytávanie pevným rozpúšťadlom – **oxidom vápenatým** (CaO), ktorý je možné získať z prírodného vápenca. Cyklus funguje na princípe vratnej reakcie medzi CaO a CO₂, kde oxid uhličitý reaguje s CaO za vzniku CaCO₃ (uhličitan vápenatý), ktorý je neskôr rozložený na CaO a CO₂ v kalcinátore [36]. Teplo z exotermickej reakcie môže byť použité na výrobu páry na dodatočnú výrobu energie. Kalcinácia bežne získa teplo spaľovaním uhlia alebo zemného plynu v čistom kyslíku. Metóda je široko testovaná [28] [36]. Schéma procesu je na obr. 2.4 b).



(a). Chemical looping combustion (CLC)

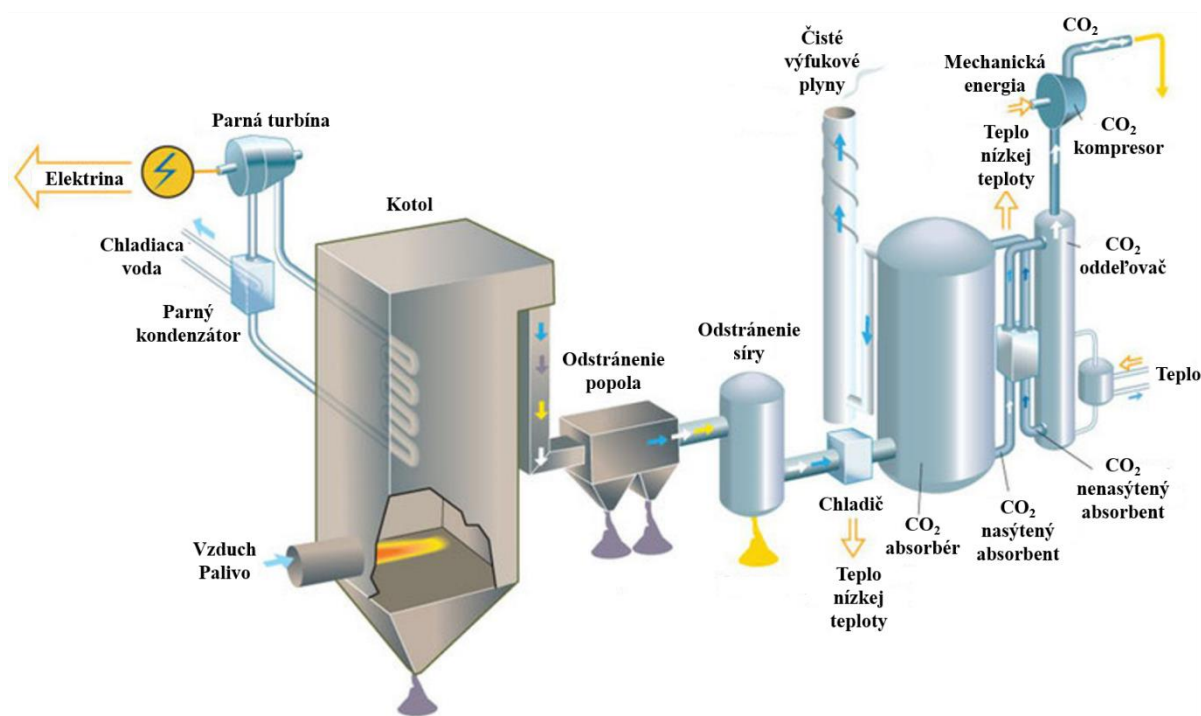
(b). Calcium looping cycle (CaL)

Obr. 2.4: Schémy chemickej smyčky CLC a vápnikového cyklu CaL – prerobené podľa [36]

2.1.3 Zachytávání CO₂ po spařování

Pri procese zachytávania po spařovaní sa CO₂ vyseparuje zo splodín horenia palív. Metódu je možné použiť v rôznych sektoroch ako sú elektrárne, produkcia cementu, palív, železa atď. Keď je využitá v elektrárnach, často je označená pojmom „**post-combustion capture**“ (PCC). Zaradená je do osvedčených technológií, pretože sa doteraz vykonalo už niekoľko úspešných výskumov na zachytávanie, napríklad s chemickou absorpciou [37].

Veľká výhoda je tzv. „retro-fitting“, čo znamená, že PCC môže byť pripojené do už existujúcich priemyselných závodov bez výrazných zásahov do samotného závodu/elektrárne [35]. Keď je zavedená do nových priemyslov, redukcie skleníkových plynov môžu výrazne klesať – takmer k nule. Potrebné teplo na separáciu CO₂ od rozpúšťadiel je možné získať z OZE ako solárne panely, čo napomôže znížiť celkovú bilanciu uhlíku.



Obr. 2.5: Schéma procesu zachytávania CO₂ po spařovaní – prerobené podľa [38]

Schéma procesu na obr. 2.5 znázorňuje proces so separačnými metódami, ktoré sa nachádzajú až po spařovaní. Do kotla vstupuje palivo a vzduch, v ktorom sa vyprodukuje para na výrobu elektriny v turbíne. Plyny CO₂ zo spalín sa vyseparujú rôznymi metódami ešte skôr, ako sú vypustené do atmosféry, a následne sa v kompresore stlačia. Oxid uhličitý je buď opätovne použitý, alebo dlhodobo uložený. Ak však má byť vhodne použitý, je potrebná vysoká kvalita bez prímiesí nežiadaných plynov.

Na zachytenie sa využíva široké spektrum metód ako napríklad chemická absorpcia, adsorpcia tuhými rozpúšťadlami a tlakovo-vákuová adsorpcia, kryogénna a membránová separácia, viac v kapitole 2.2. Separácia je náročný proces kvôli veľkému množstvu spalín, ale zároveň relatívne malému množstvu CO₂ v nich. Technológia je zvyčajne veľkých rozmerov, aby bolo možné vyseparovať veľké množstvo plynov. Tým pádom energetická a finančná náročnosť rastie a môže výrazne ovplyvniť efektivitu celej elektrárne. Na konci sa zároveň požaduje CO₂ vysokej čistoty, preto sa niekedy využívajú aj viaceré separačné metódy naraz.

Z uvedených je momentálne najviac využívaná absorpcia monoetanolamínom (MEA), ktorá však nie je veľmi ekonomicky výhodná [30]. Na regeneráciu rozpúšťadla je totiž potrebné dodať veľké množstvo tepla.

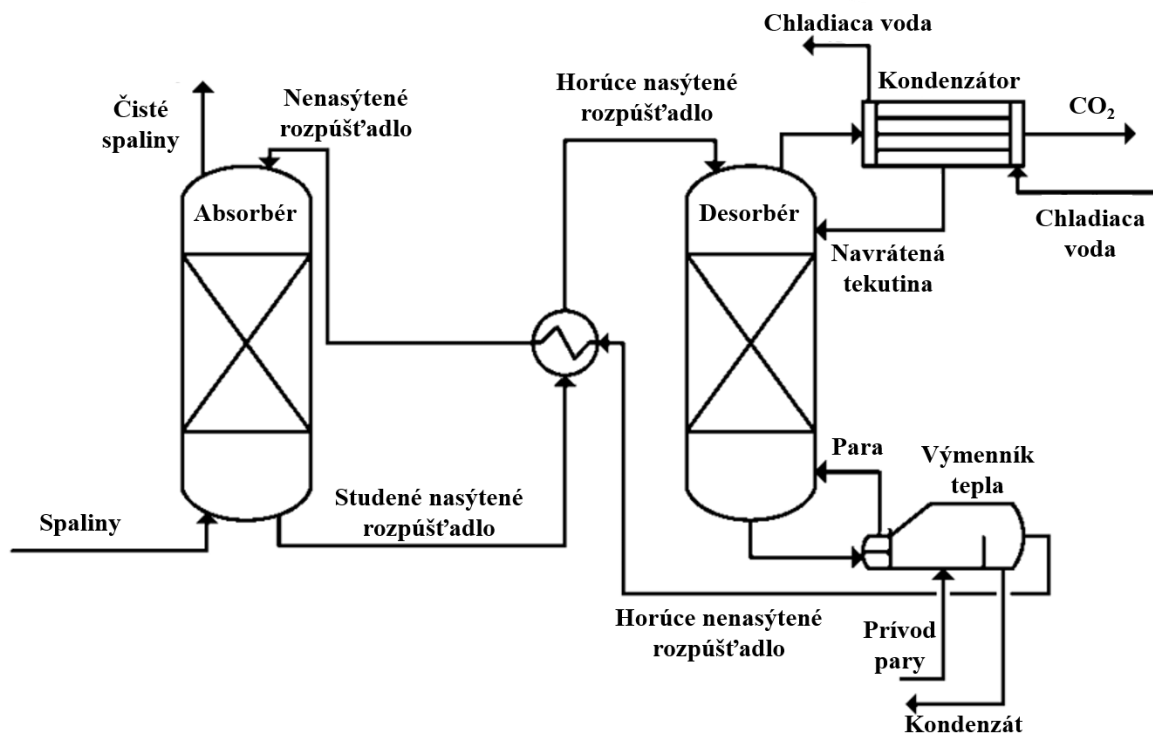
2.2 Separáčné metódy

Separácia je komplexný, finančne i energeticky náročný proces. V čase písania tejto práce je známych niekoľko možností, ako vyseparovať nechcené časti spalín, hovoriac najmä o CO₂. Niektoré varianty sú zatiaľ iba v testovacích fázach, iné nasadené už v pilotných malých či veľkých projektoch. Medzi najpoužívanejšie a najznámejšie separáčne metódy patria chemická a fyzikálna absorpcia, adsorpcia tuhými rozpúšťadlami, adsorpcia zmenou tlaku alebo teploty, kryogénna alebo membránová separácia. Takmer všetky z uvedených metód je možné použiť ako pred, tak aj po spaľovaní paliva. Využitie technológie závisí na koncentrácii CO₂ v plyne.

2.2.1 Chemická absorpcia

V spalínach z bežných kotlov na uhlie sa nachádza približne 12 – 14 % oxidu uhličitého [39]. Táto **koncentrácia je relatívne nízka** a preto je najefektívnejšie využiť chemickú väzbu. Chemické rozpúšťadlo odstráni veľkú časť nechcených prvkov, ale kvôli silnej väzbe je náročnejšie opätovné vypustenie plynu. Preferovanými rozpúšťadlami sú tie s vysokou absorpčnou kapacitou a nízkou energiou potrebnou na regeneráciu [39].

Proces chemickej absorpcie rozumieme ako dvojtápcovú oddeľovaciu prevádzku, kde sa mieša plyn s kvapalinou. Tieto procesy sú tvorené dvoma rôznymi jednotkovými operáciami, a to absorpciou a desorpciou, poprípade procesy na regeneráciu rozpúšťadla. Prúdy kvapaliny a plynu prúdia protismerne [28].



Obr. 2.6: Proces chemickej absorpcie – prerobené podľa [28]

Prvý stĺpec sa nazýva absorbér a používa sa na absorbovanie kyslého plynu do rozpúšťadla. Funguje za teplôt okolo 40 – 60 °C a tlaku 100 000 Pa [28]. Na vrch stĺpcu prúdi vertikálne dolu rozpúšťadlo a absorbuje preferované zložky z plynnej fázy, ktorá prúdi z dolnej časti. Keď prúd rozpúšťadla dosiahne spodnú časť absorbéru, je označený ako „nasýtený“ a presúva sa do ďalšej sekcie na regeneráciu rozpúšťadla. V kotli sa kvapalina ohreje na teplotu vhodnú na desorpciu a vytvorenie pary. Horný kondenzátor slúži na vháňanie kvapaliny naspäť do absorbéru. Regenerácia je najnákladnejšia časť celého procesu, obnáša totiž spotrebu veľkého množstva energie [40]. Znázornená schéma procesu je na obrázku 2.6.

Najlepšie rozpúšťadlá na zachytenie oxidu uhličitého chemicky sú nepochybne amíny, ktoré sa naň pevne naviažu. Amíny sa používajú od tridsiatych rokov minulého storočia aby vytvorili kvalitný CO₂ zo spalín s koncentráciou 3 – 25 % [39]. Najznámejším je nepochybne **monoetanolamín (MEA)**, ktorý je už overeným riešením. Je dlhodobo využívaný na čistenie kyslých plyných zmesí. Za roky sa stal skôr „stalicou“, ku ktorej sa efektívnosť ostatných rozpúšťadiel porovnáva. Skúšajú sa aj zmesi amínov, ktoré majú zlepšiť účinnosť a znížiť náklady na regeneráciu [37], viac v kapitole 4.1.3.

Aj keď je metóda najznámejšia, nezdá sa, že je to najlepšia stratégia, keď sa zohľadnia viaceré aspekty. Výroba MEA z amoniaku vyprodukuje nezanedbateľné emisie. Regenerácia je taktiež nepriamy zdroj CO₂, berúc do ohľadu spaľovanie paliva na dodanie energie. Faktom je, že MEA metóda je schopná zachytiť CO₂, zároveň sa však pri nej vyprodukujú iné, škodlivé a toxické emisie ako nitrozamíny a nitramíny, ktoré môžu napríklad spôsobiť kontamináciu pitnej vody [37]. V poslednom období sa začalo viac vyvíjať aj využitie kvapalného amoniaku ako rozpúšťadla. Energetická náročnosť rozpúšťadiel na báze NH₃ bola vypočítaná na iba 27 % v porovnaní s MEA procesom za použitia bežného, 30% roztoku. Problémy nemajú ani s koróziou vybavenia, pretože nevyužívajú vodu, a sú stabilné [37].

2.2.2 Fyzikálna absorpcia

V prípadoch, kedy je **koncentrácia CO₂ v plyne vyššia**, je vhodné využitie fyzikálneho rozpúšťadla [41]. Rozdiel oproti chemickej absorpcii je v reakcii rozpúšťadla so spalínami. Oxid uhličitý sa jednoducho vo fyzikálnom rozpúšťadle rozpustí. Fyzikálne väzby sú oveľa slabšie, čo pozitívne vplyva na opätovné uvoľnenie väzieb a oddelenie absorbentu, keďže táto metóda potrebuje oveľa menej dodanej energie. Technológia je široko využívaná v priemysloch so zemným plynom, pri produkcii syngasu či vodíka a iných s vysokým obsahom CO₂. Absorpcia funguje podľa Henryho zákona, kde rozpustnosť takmer lineárne rastie s parciálnym tlakom a zároveň nízkou teplotou [41].

Existuje množstvo komerčných procesov, ktoré sú bežne používané. Medzi najznámejšie patria Rectisol, Selexol a Purisol. Okrem týchto sa občas používa aj relatívne nový proces Morphosorb alebo Fluor [40].

Rectisol® je známy ako „studený metanol“, pretože absorpcia prebieha v teplotách približne –100 až –30 °C a tlaku okolo 5 MPa. Je preferovaný pri výrobe amoniaku, metanolu, alebo močoviny. Vďaka schopnosti vysokej selektivity pre CO₂ a H₂S (sírovodík) môže byť nakonfigurovaný tak, aby umožňoval separáciu syntézneho plynu na rôzne zložky [41].

Selexol® je od roku 1960 využívaný v rafinérskom priemysle, spracovaní syngasu a výrobe hnojív. Bežne funguje za teplôt od 0 – 5 °C a tlaku 3 MPa [41]. Proces môže byť využitý na odstránenie ako CO₂ tak aj H₂S a na regeneráciu je využitý klesajúci tlak. Výhodami procesu sú netepelná regenerácia rozpúšťadla a nižšia šanca korózie [41].

Purisol® rozpúšťa na báze N-metylpyrolidónu a funguje pri teplote okolia alebo pri chladení až na – 15 °C [41]. Taktiež sa používa na odstránenie oxidu uhličitého aj sírovodíka.

2.2.3 Adsorpcia zmenou tlaku a teploty

Medzi najznámejšie regeneračné procesy radíme adsorpciu pomocou zmeny tlaku alebo teploty [40]. Adsorpcia je proces, pri ktorom atómy, ióny alebo molekuly z látky priľnú na povrch adsorbentu, zatiaľ čo pri absorpcii sa tekutina rozpúšťa v absorbente a zahŕňa celý objem absorbujúcej látky.

PSA (pressure swing adsorption) je technológia, ktorá využíva zmenu tlaku na odizolovanie jednej časti plynu (napríklad CO_2) od jeho zvyšku [42]. Pri nižšom tlaku dochádza k uvoľneniu naviazaného CO_2 od adsorbentu. Tento proces zvyčajne prebieha za atmosférického tlaku a nazýva sa desorpcia. Sú preferované adsorbenty, ktoré majú vysokú adsorpčnú kapacitu a selektivitu na oxid uhličitý. Hlavné aplikácie metódy PSA sú v produkcii kyslíka zo vzduchu, čistenia vodíku, ale aj odstránenie CO_2 zo spalín [40]. Spotreba energie a cena zachytenia CO_2 je výrazne ovplyvnená typom adsorbentu, procesom konfigurácie a záleží aj na prevádzkových parametroch.

TSA (temperature swing adsorption) sa realizuje za zmeny teplôt. Regenerácia je dosiahnutá horúcim vzduchom alebo parou. Pri výskume sa však ukázalo, že ohrievanie vodnou parou zaberie viac času a spotrebuje viac energie. Proces zvyčajne trvá dlhší čas ako technológia PSA. Pre zvýšenie efektivity je metóda kombinovateľná s vákuovou adsorpciou VSA (vacuum swing adsorption), kde je možné dosiahnuť až 99% čistotu CO_2 [40]. Regenerácia závisí na desorpčnej teplote a na prietoku čistenia, metóda je už využívaná.

Okrem PSA, TSA a VSA existujú aj technológie ESA (electric swing adsorption), spojenie zmeny tlaku a teploty, tzv. PTSA (pressure and temperature hybrid process) a niektoré ďalšie kombinácie [40]. Stále prebieha výskum na dodatočné zvýšenie efektivity.

2.2.4 Adsorpcia tuhými rozpúšťadlami

Proces na báze suchého sorbentu tuhého skupenstva je jednou z možností náhrady tekutých a menej efektívnych technológií ako je MEA. Pri tuhých rozpúšťadlách sa neodparuje veľké množstvo vody ako v kvapalných systémoch, a tak problémy ako korózia alebo prchavosť nehrajú dôležitú rolu. Zvyčajne sa tuhé rozpúšťadla delia na fyzikálne a chemické [43].

Fyzikálne rozpúšťadlá ako aktívne uhlie, zeolity alebo MOF (microporous metal-organic framework) majú nízku adsorpčnú kapacitu kvôli nízkemu parciálnemu tlaku CO_2 v spalínach [43].

Najznámejšie **chemické** rozpúšťadlá sú alkalické alebo amínové. **Alkalické** (najmä K_2CO_3 – uhličitan draselný alebo Na_2CO_3 – uhličitan sodný) sú dobrými kandidátmi na zachytenie CO_2 pre ich nízku teplotu, stabilný výkon a komerčnú dostupnosť. **Amínové** majú zas výhodu nižšej energetickej náročnosti, aj keď majú veľkú nevýhodu degradácie kyslíkom zo spalín a nežiadúci vedľajší produkt – močovinu [43].

Adsorbenty delíme na materiály na báze uhlíka, zeolitu, polyméru alebo MOF materiály a rôzne iné [44]. Materiály na báze uhlíka sú považované za jeden z najslubnejších adsorbentov na zachytávanie CO_2 vďaka nízkym nákladom, veľkému a funkčnému povrchu, relatívne ľahkej regenerácii a veľa možným modifikáciám. Sú to však fyzikálne, slabé a tepelne senzitívne materiály. Grafít a grafén sú tiež alotropy uhlíka, ale materiály na ich báze majú množstvo lepších vlastností a v poslednom období im je venovaný obrovský záujem [44]. Zeolity by mohli byť potenciálne použité v PSA adsorpcii, aj keď ich všeobecná schopnosť selektivity je stále relatívne nízka, navyše sa ich adsorpčná kapacita rapídne zníži pri zvýšení sa teploty nad $30\text{ }^\circ\text{C}$ [44].

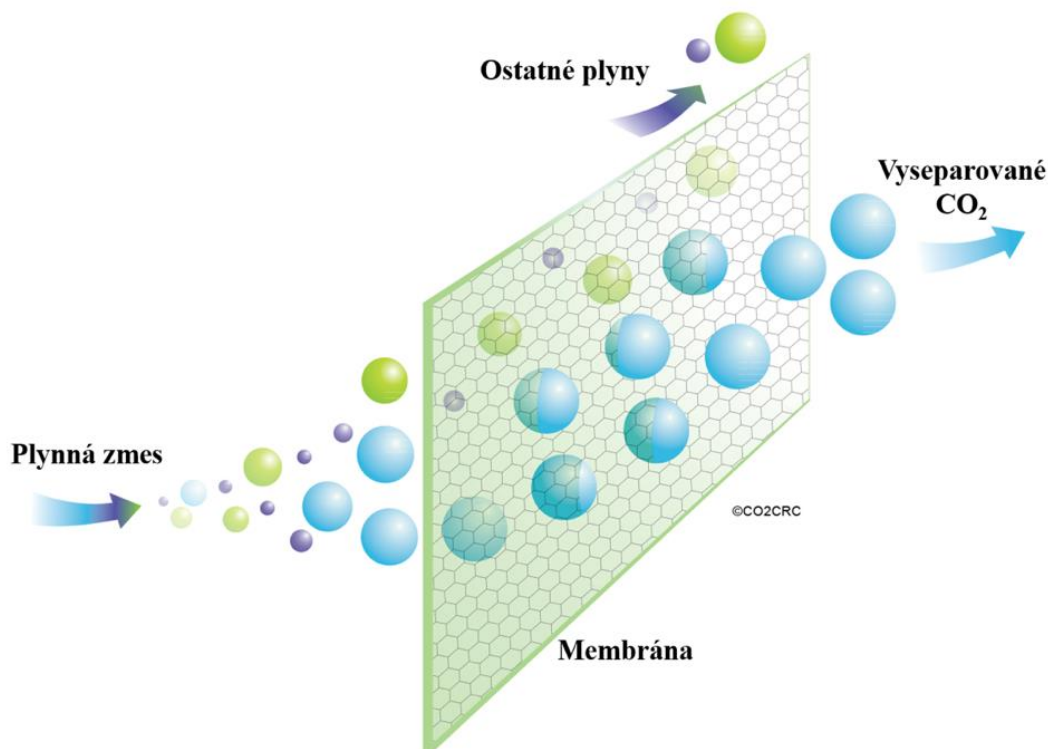
2.2.5 Kryogénna separácia

Kryogénna separácia je fyzikálny proces, v ktorom sa separuje CO_2 za extrémne nízkych teplôt. Je tým umožnená priama výroba tekutého oxidu uhličitého s nízkym tlakom, a CO_2 môže byť ihneď sekvestrované alebo uložené, čím sa ušetrí energia na kompresiu plynu. Cez proces kryogénnej separácie sa plynná zmes vyseparuje sériou kompresii, zmrazovaní a separácii [45]. Separácia nepotrebuje žiadne chemické aditíva, čím znižuje nadbytočný druhotný odpad. V chemickom priemysle sa metóda využíva už značnú dobu, a tak ju radíme do technicky vyspelých a odskúšaných technológií. Čistota CO_2 pri správnych podmienkach, ako sú vysoký tlak či destilácia v teplote okolia, môže dosiahnuť až 99,9 % [45].

Metóda je preferovaným využitím pri oxy-fuel procese vo veľkovýrobe vysoko čistého kyslíku a dusíku. Avšak je to komplexnejšie, drahšie a energeticky náročnejšie riešenie ako ich priama výroba [46]. Zlomovým bodom, ako tieto nevýhody vyvážiť, je zavedenie technológie s nižšími energetickými nárokmi. Energetická penalta sa napríklad dá znížiť spomínanými viacstupňovými kompresiami, zmrazovaniami a separáciami [45].

2.2.6 Membránová separácia

Separácia plynov membránou je jedno z energeticky efektívnych a nízkouhlíkových riešení na zachytávanie CO_2 [47]. Funguje na princípe rozdielu tlakov alebo koncentrácií. Čím väčší rozdiel, tým lepšia separácia. Keďže je koncentrácia CO_2 oveľa väčšia v pre-combustion procese, metóda je najefektívnejšia práve vtedy, aj keď je možné ju využiť aj v post-combustion a oxy-fuel procesoch. Ako veľké výhody tejto metódy sú vnímané relatívne nízke kapitálové a prevádzkové náklady, jednoduchosť a spoľahlivosť alebo škálovateľnosť. Membrána funguje ako filter, ktorý vyseparuje plynnú zmes na základe permeability. Kľúčovým parametrom je teda veľkosť pórov [47]. Schéma procesu je na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Schéma procesu membránovej separácie – prerobené podľa [47]

Aby mohli byť membrány využité na zachytenie CO₂ zo spalín, musia byť dodržané určité požiadavky ako napríklad vysoká permeabilita oxidu uhličitého, vysoká tepelná a chemická stabilita a prijateľné náklady. Podľa typu výrobného materiálu delíme membrány na tri hlavné druhy: anorganické (alebo keramické), organické (alebo polymérne) a hybridné [48].

Typické **anorganické membrány** sú tvorené zeolitmi, oxidmi, keramikou, uhlíkmi alebo MOF materiálmi. Dokážu pracovať vo vysokých teplotách, no sú limitované vysokými nákladmi na výrobu [47].

Polymérne membrány sú postupne dominantnými komerčnými membránami. Majú viaceré výhody oproti anorganickým, a to napríklad dobrú mechanickú stabilitu, nízke náklady na výrobu a výbornú separačnú schopnosť. Preto je v poslednom období veľa anorganických membrán nahradzovaných polymérnymi [47]. Separčná schopnosť môže byť ešte vylepšená pridaním organických alebo anorganických zlúčenín. Napriek výhodám je ich tepelná stabilita relatívne nízka, čo obmedzuje ich využívanie v post-combustion procese [47].

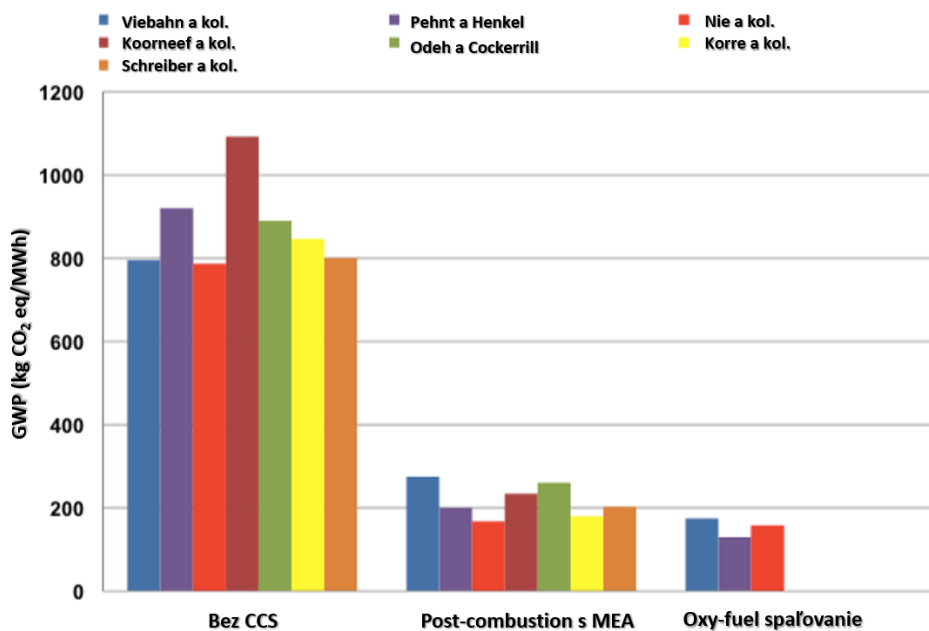
Vylepšené polymérne membrány s anorganickými zložkami, ako sú zeolity, kremičitany alebo MOF, ktoré sú zapracované do štruktúry, nazývame **hybridné membrány**. Tieto membrány majú výhody organických aj anorganických látok, ich spojenie zlepšuje tepelné a mechanické vlastnosti, a tým pádom vylepšuje stabilitu. Hybridné membrány sú v skorej fáze vývoja, a tak je metóda relatívne drahá a náročná na výrobu [47].

2.3 Environmentálna bilancia technológii CCS

Napriek výhodám, ktoré so sebou CCS prinášajú, je dôležité komplexné zváženie možných environmentálnych dopadov na prírodu a samotná spotreba energie pri ich zavádzaní a prevádzke. Názory odborníkov na tieto technológie sú rôznorodé – existujú výhody aj nevýhody [49]. Ako výhody sa spomínajú najmä **ľahší prechod na obnoviteľné zdroje** krajín silno závislých na uhlí, sekvestrácia CO₂ na desiatky až stovky tisícok rokov oproti napríklad krátkej dobe uchovania pri zalesňovaní, a samotné zníženie uhlíkovej stopy [49].

Na druhej strane sú názory, že **kvôli CCS ostávajú v prevádzke elektrárne spaľujúce fosílna palivá** [49], ich **vysoká energetická a vodná náročnosť** pri prevádzke [50] alebo možný neočakávaný **únik sekvestrovaného CO₂** [51]. Napríklad pri nasadení CCS so zachytávaním oxidu uhličitého po spaľovaní do elektrárne so spaľovaním uhlia sa zvýši spotreba vody o 55 % a pritom sa môže znížiť čistá účinnosť elektrárne až o 45 % [50]. Pri úniku CO₂ by sa okrem iného poškodilo aj ekologické prostredie v okolí miesta vstretku, a zasiahlo by to okrem iného najmä vegetáciu a rast rastlín [51].

Pri porovnávaní elektrární s technológiami CCS a bez nich sa väčšinou porovnáva metóda MEA v zachytávaní po spaľovaní. Jednak je to pre jej dlhodobé využívanie, a jednak pre jej vysokú spotrebu energie na regeneráciu [30]. Keďže zníži efektivitu elektrárne, dodatočné palivá musia byť spálené na dobehnutie strát. Porovnanie GWP (Global warning potential, potenciál globálneho otepľovania) elektrární so spaľovaním uhlia bez technológii CCS a so zavedenou absorpciou pomocou MEA z rôznych štúdií je zobrazené na grafe na obrázku 2.8. GWP je možné interpretovať ako teplo absorbované niektorým zo skleníkových plynov, presnejšie ako násobok tepla, ktoré by bolo absorbované v časovom horizonte rovnakou hmotnosťou CO₂ [33]. Predstavuje kombinovaný účinok rôznych časových období, počas ktorých tieto plyny zostávajú v atmosfére, a ich relatívnu účinnosť pri absorpcii odchádzajúceho infračerveného žiarenia. Z toho vyplýva, že GWP pre oxid uhličitý je 1.



Obr. 2.8: Graf porovnania GWP elektrární nevyužívajúcich CCS, využívajúcich MEA po spařování a spařovanie v čistom kyslíku – prerobené podľa [30]

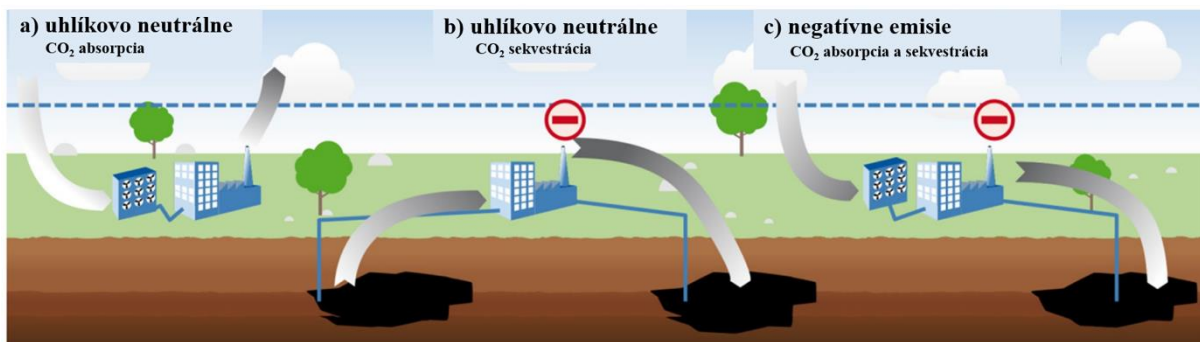
Z grafu je jasne vidieť posun elektrární so spařovaním uhlia k nižším emisiám, no riešenie vykazuje za svoj životný cyklus značné hodnoty GWP, ktoré nemôžu byť prehliadnuté. Taktiež je potrebné brať v úvahu pokračujúcu ťažbu fosílnych palív. Na porovnanie sa v grafe nachádzajú aj údaje o emisiách pri spařovaní oxy-fuel z niektorých štúdií, ktoré síce dosahuje o niečo nižšie čísla, no stále sú tieto hodnoty ďaleko od zanedbateľných.

3 Zachytávání CO₂ a jeho využití (CCU)

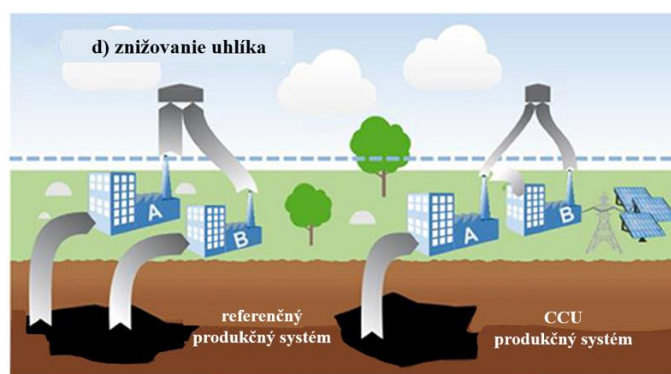
Technologie CCU (**Carbon Capture and Utilization**) pracují na principu zachycení oxidu uhličitého z místa vzniku alebo z okolitého vzduchu, a následnej premeny na hodnotné produkty. Takýto postup prináša ako ekonomické, tak aj environmentálne benefity. Je však nutné brať v úvahu, že technológia sa stáva environmentálne veľmi výhodná jedine ak je jej životný cyklus uhlíkovo neutrálny, alebo vykazuje negatívne emisie [52]. K roku 2018 boli implementované len dve riešenia CCU, ostatné boli v štádiu vývoja [1].

Proces je radený ako uhlíkovo neutrálny, ak je množstvo zachyteného a fixovaného CO₂ rovnaké ako ostatné fosilne emisie vyprodukované počas životného cyklu [52]. V praxi to znamená, že ak je CO₂ napríklad zachytené zo vzduchu, využité, a na konci životného cyklu sa dostane nejakým spôsobom naspäť do atmosféry, jeho celková uhlíková bilancia je neutrálna, vid' obr. 3.1 [52].

Technológia s negatívnymi emisiami je taká, ktorá za svoj životný cyklus zachytí a využije viac CO₂, ako vyprodukuje [52]. Vo väčšine prípadov však CCU nie je technológia s negatívnymi emisiami. V porovnaní so status quo je to ale výhodnejšie riešenie, a preto metódu radíme do technológií, ktoré znižujú množstvo CO₂ v atmosfére a prispievajú k mitigácii klimatickej zmeny (obr. 3.2) [52].



Obr. 3.1: Uhlíkovo neutrálny proces a proces s negatívnymi emisiami – prerobené podľa [52]



Obr. 3.2: Proces znižujúci obsah CO₂ v atmosfére – prerobené podľa [52]

Na problematiku je nutné prihliadať ako na celok, a tak je životný cyklus vnímaný aj s energiou potrebnou na celú realizáciu CCU. Výroba reaktantov (H₂, epoxid) potrebných na aktiváciu chemicky inertného CO₂ je často vysoko energeticky náročná [52]. CCU má šancu výrazne znížiť emisie skleníkových plynov, ale iba ak je využitá nízkouhlíková elektrina. Dopady na životné prostredie je tým pádom možné vyvodit' iba z podrobného environmentálneho hodnotenia [53].

3.1 Mineralizácia

Sýtenie minerálov oxidom uhličitým je proces chemickej reakcie CO₂ s kremičitanovými minerálmi ako vápnik (Ca), magnézium (Mg) a železo (Fe). Reakcia je termodynamicky priaznivá a veľmi pripomína prirodzené zvetrávanie kremičitých hornín pri vzniku uhličitanov, no značne zrýchleným spôsobom [1]. Najefektívnejšie je samozrejme zachytenie CO₂ zo vzduchu alebo bioenergetické zachytenie. Toto zachytenie môže viesť k negatívnym emisiám, no keď je metóda využitá pri CCS s fosílnymi palivami, nie je naďalej pokladaná ako technológia s negatívnymi emisiami [1].

V poslednej dobe zaujala aj **mineralizácia s využitím alkalických zvyškov** ako železné a oceľové trosky, zvyšky fosílnych palív, odpad z cementárni a betonárni, alebo zvyšky z papierni [54]. Využíva sa hlavne v priemysle a elektrárnach, kde je priamo či nepriamo znížené množstvo CO₂ hneď v mieste vzniku, a to s nízkymi nákladmi na suroviny. V porovnaní s prírodnými minerálmi sú tie z priemyselnej výroby reaktívnejšie, čiže znižujú alebo úplne eliminujú potrebu predúpravy, a zároveň môžu znížiť znečistenie vzduchu ako v priemysle, tak v elektrárnach na uhlie. Je potrebný značný technologický pokrok pred cenovo výhodným využitím.

3.2 Výroba nápojov a potravín

V priemysle s nápojmi a potravinami je možné využiť CO₂ ako okysľujúce činidlo. Kvôli využitiu v odvetví, ktoré je priamo konzumované, je čistota kľúčovým faktorom. Musí byť eliminovaná možnosť kontaminácie výsledných produktov látkami ako benzén či oxidy dusíka zo spaľovania [54].

Momentálne sa oxid uhličitý používa na výrobu sýtených nápojov, odkysličenej vody, mliečnych výrobkov a na konzerváciu potravín. Alkoholické nápoje ako pivo či šumivé víno na produkciu potrebujú značné množstvo tekutého CO₂, a preto je podstatné, aby pri tom využívali oxid uhličitý buď recyklovaný alebo pochádzajúci z obnoviteľných zdrojov [54].

3.3 Biologické využitie

Ďalším prístupom je využitie biologických materiálov v stavebnom priemysle. Okrem environmentálneho benefitu táto metóda taktiež zvyšuje rozmanitosť dostupných materiálov na trhu [30]. Proces funguje na princípe zachytenia uhlíku fotosyntézou, kde vznikne biomasa. Tá sa môže využiť v konštrukčných riešeniach nových stavieb a zaručuje uloženie uhlíka na niekoľko desaťročí. Okrem stavebných konštrukcii nachádza možné využitie aj v izolačných materiáloch alebo nábytku. Potenciálne odstránenie CO₂ sa odhaduje na približne 0,5 – 1 Gt CO₂ za rok náhradou za konvenčné stavebné materiály [30]. Bežne využívané materiály sú cement alebo oceľ, a tie sú známe vysokými emisiami pri ich výrobe. Týmto prístupom je odhadom možné dosiahnutie zníženia emisií o 14 – 31 %, no na také zníženie by boli potrebné významné zalesňovania [30].

CO₂ môže byť využité aj na výrobu bio palív pomocou kultivácie mikrorias. Predtým, ako môžeme mikroriasy premeniť na palivo, je potrebné biomasu zozbierať a zosušiť. Premena funguje napríklad pomocou tepla z mikrorias na syntézny plyn a neskôr palivo, teplo a elektrinu. Na rozdiel od bežných plodín ako kukurica či repka olejná, riasy neohrozujú potravinový trh, ak neberieme v úvahu rozlohu, ktorá je potrebná pre vznik mikrorias, no inak by mohla byť použitá na rast plodín [30].

3.4 Terciárna ťažba ropy (EOR) a metóda ECBM

Enhanced oil recovery (EOR) a coal-bed methane recovery (ECBM) sú metódy priameho využitia CO₂ na ťažbu ropy z ropného poľa a ťažbu metánu z uhoľných slojov. Okrem toho môže byť aj vstreknutý do podzemných, geologicky vhodných miest, a byť uskladnený na viac ako 10 000 rokov [54]. EOR sa využíva už vyše 40 rokov v krajinách ako Nórsko alebo USA, ECBM je nová technológia [30].

Metóda EOR (taktiež známa ako terciárna ťažba) slúži na získanie ropy, ktorú nebolo možné vyťažiť primárnym a sekundárnym ťažením [54]. Hlavné techniky sú chemické vstrekovanie, tepelné vstrekovanie a vstrekovanie plynov ako CO₂, zemný plyn, dusík a surfaktanty. Keď sa vstrekne jedna zo spomínaných látok za špeciálnych podmienok, výborne sa zmieša s ropou, zníži jej viskozitu, tým pádom dokáže zefektívniť ťažbu až o 30 – 60 % [30]. Na zlepšenie ekologického dopadu je vhodné využitie špeciálnych podmienok na zamedzenie vypustenia využitého CO₂ spolu s vytiahnutím ropy [30] [54].

Vstrekovanie CO₂ do uhoľných slojov – ECBM je varianta, ktorá nielen zlepšuje získavanie metánu, ale taktiež ukladá uhlík do pôdy [54]. Metóda je skúšaná na niekoľkých modeloch na úrovni výskumu. Tie skúmajú proces a celkovú efektivitu na možné komerčné nasadenie technológie [54].

3.5 Palivá a chemikálie

CO₂ môže taktiež byť spracované a premenené na chemikálie a palivá. Bežné sú močovina, cyklické uhličitany, metanol, kyselina mravčia a kyselina salicylová. Práve kyselina mravčia ma najväčší potenciál zníženia emisií CO₂ [54]. Oxid uhličitý sa tiež môže použiť ako surovina na výrobu palív pri Fischer-Tropschovom procese [30]. Ich doba uskladnenia je z dôvodu krátkej životnosti obmedzená, a preto by sa malo výskumné úsilie zamerať na materiály s potenciálne dlhšou životnosťou. Výroba chemikálií a polymérov spotrebováva veľké množstvo energie, a tak by sa mali využívať najmä a primárne obnoviteľné zdroje [30].

Polyméry na báze CO₂ používané na výrobu plastov sú potenciálne ekologickejšie, a preto priťahujú pozornosť priemyselného sektora. Nie je však jasné ako sa s týmito polymermi vysporiada o niekoľko desaťročí pri ich rozklade. S najväčšou pravdepodobnosťou by sa vrátil uhlík naspäť do atmosféry [54].

Močovina je ďalším možným spôsobom využitia prebytočného CO₂. Podľa IPCC v rokoch 2007 – 2016 bolo poľnohospodárstvo zodpovedné za približne 23 % všetkých antropogénnych emisií [54]. Tie pochádzajú najmä z využitia neekologických dusíkatých hnojív. Močovina je neutrálne hnojivo s obsahom dusíka najviac 46 %, je ľahko a bezpečne skladovateľné. Bežne sa vyrába parnou reformáciou zemného plynu, pri ktorom sa vytvára CO₂ a amoniak [54]. Keďže je močovina zvyčajne vyrábaná z fosílnych palív, pre zníženie emisií skleníkových plynov o 65 % je napríklad možné využiť syngas zo splyňovania biomasy namiesto zemného plynu [54].

4 Budúcnosť technológií na znižovanie vypúšťania CO₂

4.1 CCS a CCU v budúcnosti

Technológie CCS a CCU vznikli s cieľom mitigácie klimatickej zmeny, no častokrát sú považované iba za dočasné riešenie, najmä tie z nich, ktoré len oddiaľujú vypustenie emisií do atmosféry namiesto ich eliminácie [30]. V rozhodovaní medzi týmito dvoma skupinami technológií sa môže CCU javiť ako lepšia voľba, keďže produkuje využiteľné produkty. Je však potrebné komplexné vyhodnotenie nákladov a environmentálnych vplyvov. Aktuálne výskumy naznačujú, že je potrebný značný pokrok v efektívite a energetickej náročnosti [30]. Na splnenie Parížskej dohody, je podľa modelov, ich využitie v najbližších desaťročiach viac ako pravdepodobné, a mohlo by byť do roku 2050 až v 25 % elektrárnach vyrábajúcich energiu spolu s nízkouhlíkovými alternatívami ako jadrová energia a OZE [55].

4.1.1 BECCS (Bioenergia so zachytávaním a ukladaním uhlíka)

Spojenie technológií CCS s fosílnymi palivami vyvoláva otázky ako v inžinieroch a vedcoch, tak v spoločnosti [49]. BECCS (Biomass energy with carbon capture and storage) je riešenie, ktoré nevyužíva fosílna palivá a zároveň využíva uloženie CO₂. Funguje na princípe integrácie bioenergie a CCS. Biomasa prirodzene zachytáva CO₂ z atmosféry pri fotosyntéze, neskôr je využitá ako palivo pri výrobe energie a CO₂ vytvorené pri spaľovaní je zachytené a uložené vo vhodnom podzemnom úložisku [1]. Týmto spôsobom je možné BECCS zaradiť do technológií s negatívnymi emisiami, čo vzbudilo veľký záujem mnohých štúdií, spolieha sa na ňu aj IPCC [56]. Keď sa má technológia zhodnotiť objektívne, je potrebné dodať aj jej nevýhody, a to sú napríklad dostupnosť biomasy, konflikty v otázke biodiverzity a využitia pôdy na pestovanie plodín na konzumáciu [49]. Ďalšie informácie a pohľady na technológiu je možné nájsť v akademickej práci zameranej na zachytávanie oxidu uhličitého z atmosféry [57].

4.1.2 Vylepšenie absorbentov

Ďalším spôsobom, ako zlepšiť CCS, je vylepšenie absorbentov, najmä monoetanolamínu, ktorý je najvyspelejší, no zároveň má energeticky náročnú regeneráciu a vo veľkých množstvách je silno korozívny. Preto sa výskumy [47] zaoberajú vývojom nových CO₂ absorbentov. Na chemickú absorpciu sa využíva najmä absorpcia a regenerácia na báze zmeny teplôt (thermal swing absorption-regeneration), a tak je rozhodujúci výber absorpčného prostriedku s optimalizovanými tepelnými a fyzikálnymi vlastnosťami. Väčšina výskumu je zameraná na amínové solventy, ako napríklad amínové zmesi, aminokyseliny alebo amínové rozpúšťadlá s fázovou zmenou [47].

Okrem amínov sú svojimi vlastnosťami zaujímavé aj **iónové kvapaliny** (ionic liquids), ktoré pozostávajú z iónov a pôsobia pri izbovej teplote ako kvapalina. Ich jedinečnosť tkvie v nízkej prchavosti, dobrej tepelnej stabilite a relatívne nízkej energetickej spotrebe pri regenerácii [47]. Sú tak alternatívou tradičných fyzikálnych absorbentov [37].

4.1.3 Porovnanie rozpúšťadiel na báze MEA/voda s rozpúšťadlami bez vody

Ako bolo spomenuté v kapitolách vyššie, najpoužívanejší absorbent na amínové vypieranie je monoetanolamín pre svoju vysokú CO₂ absorpciu pri nízkych prevádzkových tlakoch. Pri desorpcii bohužiaľ spotrebuje priveľké množstvo energie a zároveň voda využívaná pri procese napomáha rýchlejšej korózii zariadenia. Tieto nevýhody viedli ku vzniku štúdií [58], ktoré

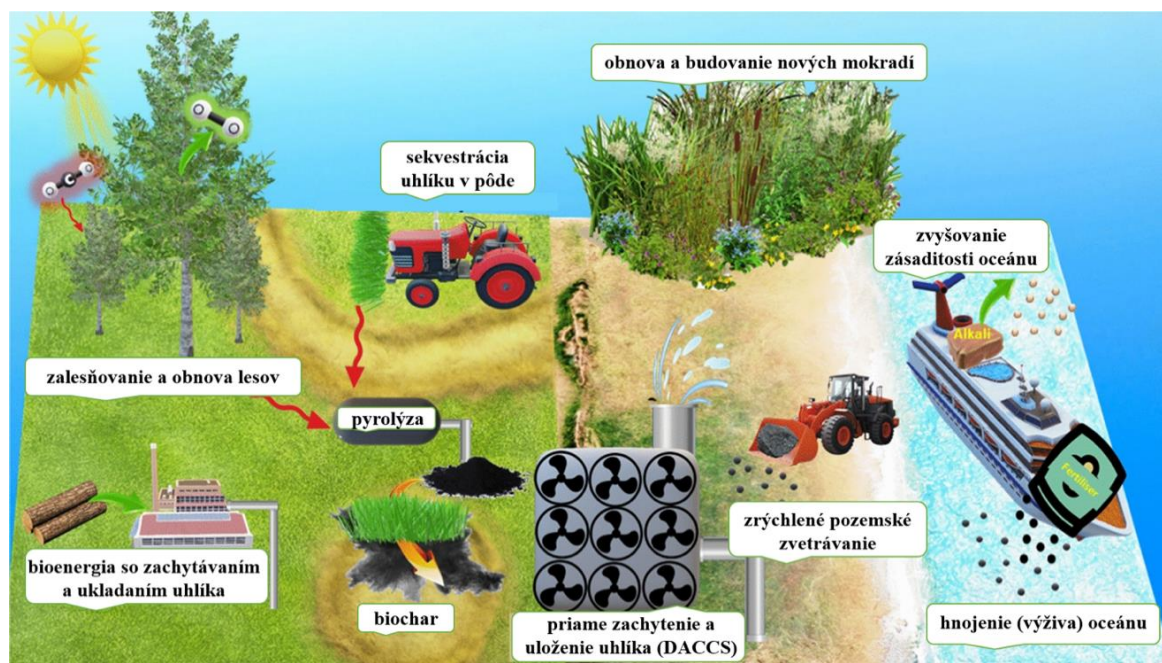
skúmali vlastnosti viacerých variant alkanolamínov ako dietanolamín (DEA), metyldietanolamín (MDEA) a spojenie MEA a etanolu (C_2H_5OH) v rôznych pomeroch vody a rozpúšťadla.

Riešenia bez využitia vody sú napríklad mnohé druhy alkoholov, organické kvapaliny viažuce CO_2 alebo rôzne druhy iónových kvapalín [59], prípadne amoniak [37]. Oproti výhodám ako vysoký bod varu a tepelná stabilita stoja nevýhody nelineárneho zvýšenia viskozity po absorpcii CO_2 , ktoré môže spôsobiť zmenu fáze rozpúšťadla na gél až voskovitú pevnú látku a tvorba zrazenín [59].

Podľa výsledkov štúdie University of Chemical Technology v Pekingu [58] dosahovalo **spojenie MEA a etanolu bez využitia vody** lepšiu regeneráciu a nižšiu desorpčnú teplotu pre desorpciu CO_2 . Presnejšie, MEA/etanol mal v porovnaní s MEA/voda o $20\text{ }^\circ C$ nižšiu desorpčnú teplotu, o 41,72 % vyššiu priemernú rýchlosť desorpcie v prvých 20 minútach, a o 5,52 percentuálneho bodu vyššiu regeneračnú frakciu. Potreba desorpčnej energie v prípade MEA/etanol je výrazne nižšia ako pri MEA/voda. Pri obsahu 0,07 mol CO_2 /mol MEA bolo potrebné o 80 % menej desorpčnej energie ako pri MEA/voda. Rýchlosť desorpcie bola rýchlejšia, čo by viedlo k zníženiu spotreby energie a zmenšeniu veľkosti vybavenia [58].

4.2 Technológie s negatívnymi emisiami

IPCC v roku 2018 skúmalo rôzne varianty a predikcie klimatickej zmeny, a zároveň vypočítavalo akými modelmi by sme sa mali riadiť, aby sme dodržali zvýšenie teploty o najviac $2\text{ }^\circ C$, preferovane $1,5\text{ }^\circ C$ [56]. Vo svojich výpočtoch počítali len s dvoma technológiami s negatívnymi emisiami – BECCS a zalesňovanie, ktoré boli už v tejto práci popísané. S ďalšími výskumami sa prišlo na zistenie, že využitie negatívnych emisií je nevyhnutné, aj keď sú technológie v počiatočnom štádiu vývoja [1]. V oblasti klímy by sme sa naďalej mali zameriavať na konvenčné technológie mitigácie, a zároveň mobilizovať finančné zdroje pre vývoj technológií s negatívnymi emisiami. Až po maximalizovaní bežných dekarbonizačných technológií by sa mali využiť tieto technológie na využitie zvyškov emisií, ktoré je ťažké eliminovať konvenčnými technológiami. Preto je dôležité zaradiť tieto technológie ako doplnkové, a nie ako náhradu konvenčných [1].



Obr. 4.1: Prehľad technológií s negatívnymi emisiami – prerobené podľa [1]

Na obr. 4.1 sú zobrazené technológie s negatívnymi emisiami, do ktorých radíme okrem BECCS a zalesňovania aj výrobu biocharu, sekvestráciu uhlíka v pôde, priame zachytenie a uloženie uhlíka (DACCS), dodávanie živín na hladinu oceánu na posilnenie absorpcie CO₂ biologickou aktivitou, zrýchlené pozemské zvetrávanie, zvýšenie zásaditosti oceánu, obnova mokradí a iné, alternatívne technológie [1] [57].

4.3 Elektrifikácia

V posledných rokoch sa záujem o elektrickú energiu markantne zvýšil a najbližšie obdobie bude iba rásť. Od roku 1990 sa dopyt viac ako zdvojnásobil a každoročne rastie priemerne o 3 % [60]. Elektrifikácia je považovaná za atraktívne riešenie závislosti na fosílnych palivách [61]. Dodávanie elektriny vyrobenej bez spotreby fosílnych palív je dôležitým krokom k zníženiu emisií v sektoroch vyrábajúcich najviac emisií, ako sú priemysel, vykurovanie budov a transport [60]. Na elektrifikáciu sú potrebné kvalitné energetické siete.

Priemysel spotrebováva najviac energie, z toho až tri štvrtiny industriálnych emisií pochádza z cementární, výroby chemikálii, oceliarní a železiarní [60]. Chemikálie ako amoniak, metanol alebo vodík sú momentálne silno závislé na fosílnych palivách, vodík až na 95 %. Ich výroba je možná aj cez elektrolýzu vody (vodík), alebo s dodaním dusíka zo vzduchu pre výrobu amoniaku. Energia by pritom pochádzala z obnoviteľnej elektriny, akú dodáva napríklad veterná alebo solárna energetika. Úplná premena fosílnych palív na obnoviteľné zdroje je previazaná s vysokými cenami uhlíku, a to stavia ekologickjšie varianty výroby do nevýhody [60].

Výroba ocele predstavuje 4 % celkových emisií CO₂ v Európe. Pochádzajú z využívania energie a redukcie železných rúd [60]. Jednou z možností dekarbonizácie výroby železa a ocele je využitie obnoviteľných zdrojov priamo cez elektrolýzu železnej rudy. Ďalšou možnosťou zámény fosílnych palív je využitie vodíka vyrobeného zelenou elektrinou na tavenie pri vysokých teplotách priamej redukcie železnej rudy [60].

Cementárne v prvom kroku výroby cementu kalcinujú uhličitan vápenatý na oxid vápenatý a tento proces je založený na spaľovaní fosílnych palív alebo biomasy. Kalcinácia je energeticky náročná, a preto by mohla nová technológia MAT (Microwave-assist technology), založená na polovičnej elektrifikácii, urýchliť proces a znížiť emisie. Okrem toho je tiež možné CO₂, zachytené pri výrobe cementu, recyklovať na chemikálie a palivá s vodíkom na báze obnoviteľných zdrojov [60].

Vykurovanie a výroba tepla je často prezentovaná ako súčasť „sektorového prepojenia“ a uľahčenie integrácie veľkého podielu technológií variabilnej obnoviteľnej energetiky, ako sú solárne fotovoltaiky a veterná energia, do energetických sietí [60]. Tepelné čerpadlá sú pravdepodobne najlepšou technológiou náhrady fosílnych palív v budovách pretože čerpaním z vody, vzduchu alebo zeme zavádzajú do budov viac tepla ako spotrebúvajú elektriny [60].

Transport je zodpovedný za zhruba štvrtinu emisií skleníkových plynov a je to jeden z hlavných sektorov, v ktorom emisie stále rastú [61]. Z toho najviac emisií pochádza z cestnej prepravy. Vo svete sa už naplno rozbehla výroba a podpora predaja elektrických áut, ktoré sú zaujímavým riešením na zníženie využívania palív. Niektoré štáty do roku 2050 plánujú úplné odstavenie dieselových a benzínových motorov [61]. Veľmi dôležité je vyrábať elektrinu nízkouhlíkovými alebo obnoviteľnými zdrojmi, pretože podľa výsledkov štúdií by prechod na elektrické autá poháňané elektrinou z fosílnych palív vyprodukoval ešte viac emisií ako pred zmenou auta na elektrické [61].

4.4 Další technologie s cílem snižování CO₂

Za poslední období je mnoho projektů zaměřených na zelené technologie, které buď využívají CO₂, snižují energetickou náročnost užívaných technologií nebo hledají nové možnosti jako vyrábět dostatek energie jednoduchou, lacnou a ekologickou cestou. Existuje mnoho různorodých nápadů, které se neustále objevují, so snahou najít optimální řešení lacnej a zelenej energie bez emisii. Niektoré zo zaujímavých projektov sú využívanie ekologicky vyrobeného vodíka [62], vývoj fúzných reaktorov [63] alebo nápad využitia CO₂ ako geotermálnej pracovnej tekutiny [64]. Medzi menej populárne patria geoinžinierske zmeny radiačnej energie Zeme na stabilizovanie alebo zníženie globálnej teploty [1], či dokonca využitie umelej inteligencie na riešenie udržateľnosti [65].

Vodík je možné vyrobiť z obnoviteľných aj neobnoviteľných surovín, rôznymi technologickými postupmi, a každá z variant produkuje rozdielne množstvo skleníkových plynov. Vo veľa krajinách je považovaný spolu s elektrifikáciou za jedinú alternatívu s nulovými emisiami [62]. Využiť by sa dal v častiach energetického systému, kde je elektrifikácia náročná alebo nerealizovateľná, napríklad pri dekarbonizácii priemyslu, v preprave ako palivo alebo na dodávanie tepla. Aby mohol vodík hrať v budúcnosti úlohu ako nízkouhlíková varianta, je potrebná hĺbková analýza nákladov a dosiahnutie nízkych či nulových emisií skleníkových plynov [62].

Termonukleárna fúzia je považovaná za bezpečného a dostupného kandidáta na zdroj energie s nulovými emisiami CO₂ [63]. Funguje na princípe zohriatia fúzneho paliva, zvyčajne izotopov vodíka, na teplotu až 100 miliónov °C, aby palivo prekonalo Coulombové odpudivé sily. Na tejto úrovni energie sa hmota dostáva do stavu plazmy [63]. Perspektívny reaktor ITER Tokamak je zariadenie, ktoré magneticky obmedzuje plazmu na výrobu energie z fúzných reakcií. Na nasadenie technológie bude potrebných ešte niekoľko rokov, momentálne nie je možné plazmu udržať dostatočne dlho, cieľ na tento rok je 5 sekúnd [66].

Využitie CO₂ ako geotermálnej pracovnej tekutiny je nová technológia, ktorá by mohla nahradiť systémy na báze vody [64]. Na presun tepla z hĺbín Zeme sa využíva studená voda, do ktorej sa vo vrte absorbuje teplo a hore sa následne premení na elektrickú energiu využitím turbín a generátorov. Geotermálne systémy fungujú cez opakovanú cirkuláciu tepla a tekutiny. Vylepšené geotermálne systémy (EGS, Enhanced geothermal systems) sú technológie efektívnejšie na výrobu elektriny, pretože ide o vysokoteplotný systém. Sú zamerané na extrakciu energie z miest s nízkou prirodzenou priepustnosťou alebo využívajúce teplo suchých hornín (Hot Dry Rock). Na zvýšenie priepustnosti sa využíva hydraulické štiepenie, ktoré vytvorí alebo otvorí existujúce malé trhliny, a do nich je vstreknutá tekutina s vysokým tlakom. Táto tekutina je zvyčajne voda, no za využitia oxidu uhličitého by sa pri procese dosiahla väčšia stlačiteľnosť a rozťažnosť, ktorá môže generovať vztlakové sily, a to vedie k nižšej čerpacej spotrebe na udržanie kvapaliny v obehu. Okrem toho má CO₂ nižšiu viskozitu, a tak umožňuje vyššiu rýchlosť extrakcie tepla, zároveň môže oxid uhličitý ostať sekvestrovaný v geologických zásobníkoch. Medzi nevýhody patrí ohrozenie kvality vody a vzduchu, možná zvýšená seizmická činnosť a iné technologické a finančné aspekty [64].

Z pohľadu stability prenosovej siete OZE patrí geotermálna energia medzi tie najstabilnejšie. Využitie antropogénneho oxidu uhličitého ako pracovnej tekutiny by za správnych podmienok mohlo pomôcť riešiť tri z najväčších výziev, ktorým ľudstvo čelí: globálna zmena klímy, dostupnosť energie a šetrenie vodných zdrojov. Na jej využívanie je potrebný značný vývoj a úplné pochopenie technológie [64].

5 Ekonomické aspekty mitigácie klimatickej zmeny

Odhady emisií skleníkových plynov v budúcnosti silno závisia od vývoja veľa premenných ako hospodársky rast, rast populácie a s ním rast dopytu po energiách, energetických zdrojov a ich budúcich nákladov a výkonnosti [26]. Budúce politické štruktúry taktiež ovplyvnia zavádzanie zmiernujúcich technológií, a teda schopnosť plniť klimatické ciele. Nasadenie a plné **využívanie mitigačných technológií je teda priamo závislé na financiách**, ktoré je nutné investovať pred a počas ich využívania [26]. Je potrebné pochopiť dlhodobé výhody investície do čistej energetiky. Okrem zníženia skleníkových plynov totiž prinášajú ďalšie, komplexnejšie benefity, najmä ekonomické, environmentálne, technologické a ďalšie, bližšie rozobraté v kapitole 5.4.

Začiatkom roku 2020 sa pandémia COVID-19 vyvinula v globálny stav ohrozenia verejného zdravia. To viedlo k vážnej hospodárskej kríze, ktorá nútila vlády po celom svete, okrem ľudských životov, zachrániť aj svetovú ekonomiku a zabrániť hospodárskemu kolapsu. Kríza COVID-19 sa bohužiaľ objavila v čase, keď politika v oblasti klímy a energetiky zaznamenávala zvýšený záujem o komplexné nové politické rámce zamerané na uhlíkovú neutralitu [67]. Makroekonomické a politické okolnosti, za ktorých boli tieto rámce koncipované, sa drasticky s pandemiou zmenili. Spochybňujú sa aj priemysly s dobre zavedenými energetickými politikami, pretože množstvo z nich bolo vážne zasiahnutých. Ak by kroky neboli dobre premyslené, mohli by mať neželané dôsledky pre prechod na nízkouhlíkovú energiu. Pre zachovanie správneho smeru je kľúčové zabezpečenie nových rámcov s cieľom posunutia energetického prechodu na vyššiu úroveň a zároveň **stabilný postoj proti potlačeniu regulačných štruktúr na úkor urýchleného návratu na cestu neustáleho ekonomického rastu** [67].

Na predikciu budúceho využívania mitigačných technológií, najmä obnoviteľných zdrojov a nákladov s nimi spojených, vznikli stovky článkov a štúdií, a IPCC [26] sa venoval vo svojej práci 164 z nich. Tieto štúdie dokazujú, že náklady na mitigáciu klimatickej zmeny sú oveľa vyššie, ak by sa nevyužívali obnoviteľné zdroje energie. Pri ambiciózných plánoch sú klimatické ciele bez OZE nenaplniteľné. Aj keď v literatúre existuje zhoda, že náklady na zmiernenie sa zvýšia ak bude nasadenie technológií OZE obmedzené, o presnej miere zvýšenia nákladov neexistuje dohoda [26].

5.1 Ekonomická situácia v Českej republike a na Slovensku

Kroky smerujúce k nízkouhlíkovej energetike v Českej republike sú takmer úplne závislé na legislatíve Európskej únie. Podľa Vnútroštátneho plánu ČR [25] sú uplatňované mnohé opatrenia, ktorých cieľom je znižovanie emisií, zvyšovanie podielu obnoviteľných zdrojov energie a zvyšovanie energetickej účinnosti. Podporuje sa výroba elektriny z obnoviteľných zdrojov tzv. zeleným bonusom, podpora bioenergetiky formou vyrovnania rozdielov medzi cenou biomasy a cenou tuhých fosílnych palív, podpora modernizácie výroby elektriny, podpora „pokročilého“ biometánu a iné. Takéto podpory platia len na obmedzený časový horizont, a preto sa ČR bude musieť vyrovnáť s eventúalnym poklesom energie z OZE približne po roku 2028 u producentov energie, ktorí si dnes nárokovujú a čerpajú prevádzkové podpory [25]. Podiel energie z OZE podľa Vnútroštátneho plánu ČR je v čase písania tejto práce 14,89 %, energetické zdroje sú vyrovnané a tvoria tzv. energetický mix.

Celkové investície spojené s naplnením plánu v oblasti energetiky a klímy [25] sa odhadujú na úrovni nižších jednotiek miliárd korún. Celkové náklady spojené s rozvojom OZE sú takmer 900 mld. Kč, kde sa jedná o náklady na úrovni verejnej podpory, celkové investície budú vyššie. Rámcový cieľ prepojitelnosti prenosovej sústavy na aspoň 30 % v importe a 35 %

v exporte, ČR s relativně významnou rezervou spĺňa, dôležité sú ale investície do elektrizačnej sústavy. Významná časť výrobných zdrojov a elektroenergetickej sústavy je 35 a viac rokov stará a vyžaduje investície do údržby, obnovy a modernizácie [25]. Elektrizované siete by mali byť priebežne modernizované s cieľom umožniť ďalší rozvoj výrobných zdrojov elektriny (zvýšenie voľnej pripojovacej kapacity). Tieto finančné prostriedky by sa naďalej čerpali z fondov EU a programu CEF – Connecting Europe Facility, ktorý by mal mať v rokoch 2021 – 2027 plánovaný rozpočet 8,65 miliárd eur a slúžiť na financovanie ochrany klímy a zlepšovania infraštruktúry v oblasti elektroenergetiky a plynárenstva. V prospech modernizovania a zvyšovania kapacity prenosovej sústavy bolo schválených osem projektov v celkovej hodnote 1 609 mil. Kč, z toho príspevok EU je 643 mil. Kč. V administrácii modernizovania distribučných sústav sa momentálne nachádza 7 projektov s výdajmi 289 mil. Kč, príspevok EU tvorí 116 mil. Kč [25].

Podľa Správy o stave životného prostredia Slovenskej republiky [68] je z hľadiska prírodných podmienok **Slovenská republika** chudobná na primárne palivovo-energetické zdroje a tak skoro 90 % z nich dováža z teritórií mimo vnútorného trhu EU. Viac ako polovica vyrobenej energie pochádza z jadrových elektrární, a tak je podiel bezuhlíkovej výroby elektriny na úrovni 80 %, v roku 2017 bol podiel OZE 11,5 %. Slovensko taktiež nasledovalo globálny trend nárastu výroby elektriny. Podiel OZE v rokoch 2005 – 2017 rástol, s dominantnými vodnými elektrárnami a biomasou, a vytvárali podobne ako ČR energetický mix [68]. Na podporu projektov zameraných na dosiahnutie cieľov štátnej environmentálnej politiky vznikli viaceré fondy. Environmentálny fond poskytuje finančné dotácie alebo úvery takýmto projektom. Ďalšími podobnými fondami sú napríklad Zelený vzdelávací fond, Operačný program Kvalita životného prostredia, Operačný program Integrovaná infraštruktúra a iné [68]. **Veľké dotácie na OZE spôsobili nízke trhové ceny**, ktoré v poslednom období začínajú rásť, a tak energetický systém EU trpí odstavovaním konvenčných a flexibilných kapacít zdrojov s nedostatočnými investíciami do nových kapacít. S riešením by mala podľa Európskej komisie prísť Reforma trhu s elektrinou EU v rámci balíčka „Čistá energia pre všetkých Európanov“ [69]. Výsledkom by mala byť pripravenosť trhu s elektrinou na energetickú transformáciu. Z pohľadu SR je obzvlášť dôležité aby budúci model EU neohrozil stabilitu dodávok elektriny alebo jej koncové ceny.

K hlavným vnútroštátnym investičným zámerom prevádzkovateľa prenosovej sústavy patrí prestavba na diaľkovo riadenú prevádzku s dostatočne dlhou bezporuchovosťou zariadení a minimálnymi nárokmi na revízie a údržbu. Do roku 2029 sa predpokladá doplnenie, resp. výmena starých transformátorov. Celkové investičné náklady na prenosové sústavy sa od roku 2020 – 2029 predpokladajú na 541 mil. eur [69]. Na porovnanie sa v roku 2017 a 2016 investovalo do obnovy a skvalitňovania sústavy 44,1 mil. eur, resp. 43,7 mil. eur.

Zlepšenie energetickej efektívnosti a rozvoj OZE bude viesť k investičným výdavkom spojeným s kúpou nových, efektívnejších produktov. Podľa prehľadu investičných potrieb [69] je po roku 2030 viditeľné rapídne zvýšenie investícií do týchto technológií zo strany domácností a podnikov. Analýzou bol zistený pozitívny vplyv na hrubý domáci produkt (HDP), najmä v dlhodobom pohľade. Vzorec HDP kopíruje veľkosť investície do energetickej efektívnosti. Predpokladané absolútne ročné náklady na zvyšovanie energetickej efektívnosti sú 2,247 mil. eur [69].

5.1.1 Energetická transformácia v Českej republike

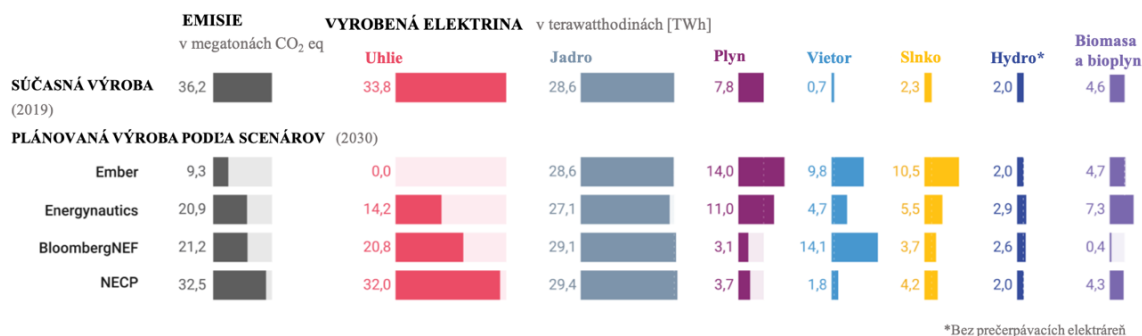
Z českého sociodemografického výskumu [70] publikovaného v roku 2021 vyplýva, že každý rok pribúda viac a viac občanov (71 % pre rok 2019), ktorí považujú klimatickú zmenu za veľmi závažný problém súčasnosti a 43 % ľudí preferuje, aby ČR do budúcnosti získavala energiu

primárne z OZE. Toto číslo by bolo vyššie, keby sa na obnoviteľné zdroje nepozeralo ako na možnosť zneužívania a tunelovania financií, ako sa to stalo v minulosti [70]. Riešením prinavrátania dôvery jednému z dôležitých riešení klimatickej zmeny je dobrá komunikácia, edukácia a opatrenia proti tunelovaniu peňazí. Celková podpora OZE, investičná aj prevádzková, do roku 2059 bude 898,5 mld. Kč [25]. Zdroje financií pochádzajú najmä z EU, štátneho rozpočtu, výnosov z predaja emisných povoleniek a projektu CEF. Okrem financií na OZE vznikol program RESTART na podporu spravodlivej transformácii uhoľných regiónov. Podpora kombinuje opatrenia z pilierov podnikanie a inovácie, priame investície, výskum a vývoj, ľudské zdroje a ostatné. Na transformáciu uhoľných regiónov vznikla platforma založená európskou komisiou. Z celkovo 41 regiónov sú tri z ČR [25].

Štyri **nedávne scenáre** transformácie elektroenergetiky Ember, Energynautics, BloombergNEF a NECP [71] predikujú varianty energetického mixu v najbližších rokoch. Ember je najambicióznejší a predpokladá nulové využívanie uhlia do roku 2030. Naopak NECP energetický mix praveľmi nezmenil a počíta s približne rovnakými emisiami ako v roku 2019. Scenáre sa ohromne líšia v množstve vypustených skleníkových plynov z čistej výroby elektriny, ktorý nepočíta so spotrebou elektrárne. Keďže existuje viacero neznámych, model najviac zodpovedajúci realite je ťažké vybrať. Scenáre sa zhodujú, že výrazný odklon od uhlia je uskutočniteľný a prekážky na úrovni bezpečnosti dodávok alebo stability prenosovej sústavy nie sú [71]. Naopak podľa výsledkov, zistených vo Vnútroštatnom pláne ČR v oblasti energetiky a klímy [25], sú potrebné investície na skvalitnenie prenosovej siete, aby bola pripravená na významnejšiu elektrifikáciu. Bližší rozpis jednotlivých energetických mixov podľa modelov sa nachádza na obr. 5.1.

POROVNANIE SCENÁROV TRANSFORMÁCIE ELEKTROENERGETIKY ČR

Výroba elektriny v roku 2030 a vybrané aspekty scenárov

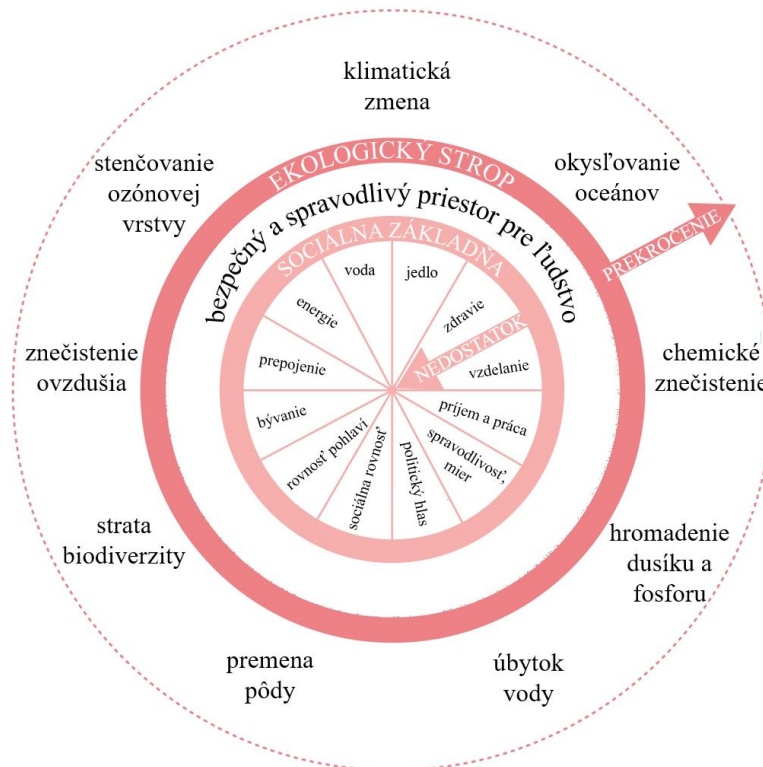


Obr. 5.1: Porovnanie scenárov transformácie elektroenergetiky Českej republiky – prerobené podľa [71]

5.2 Udržateľné modely ekonomiky

Vo svete panuje všeobecná zhoda, že súčasná spotreba a výroba produktov má nepriaznivý vplyv na kvalitu životného prostredia, sociálnu spravodlivosť a dlhodobú ekonomickú stabilitu [72]. Preto s plánom spomalenia „lineárne“ rastúcej ekonomiky vznikli viaceré modely, ktoré berú do úvahy okrem hrubého domáceho produktu aj environmentálne a sociálne aspekty. Azda najznámejším je **model cirkulárnej ekonomiky**, nazývanej aj obehové hospodárstvo. Jej cieľom je využívanie zdrojov ekonomicky a ekologicky udržateľným spôsobom, znižovanie závislosti od prírodných zdrojov, minimalizácia odpadu, predĺženie životnosti produktov a optimalizácia využívania zdrojov energie. Koncept bol najviac propagovaný Európskou

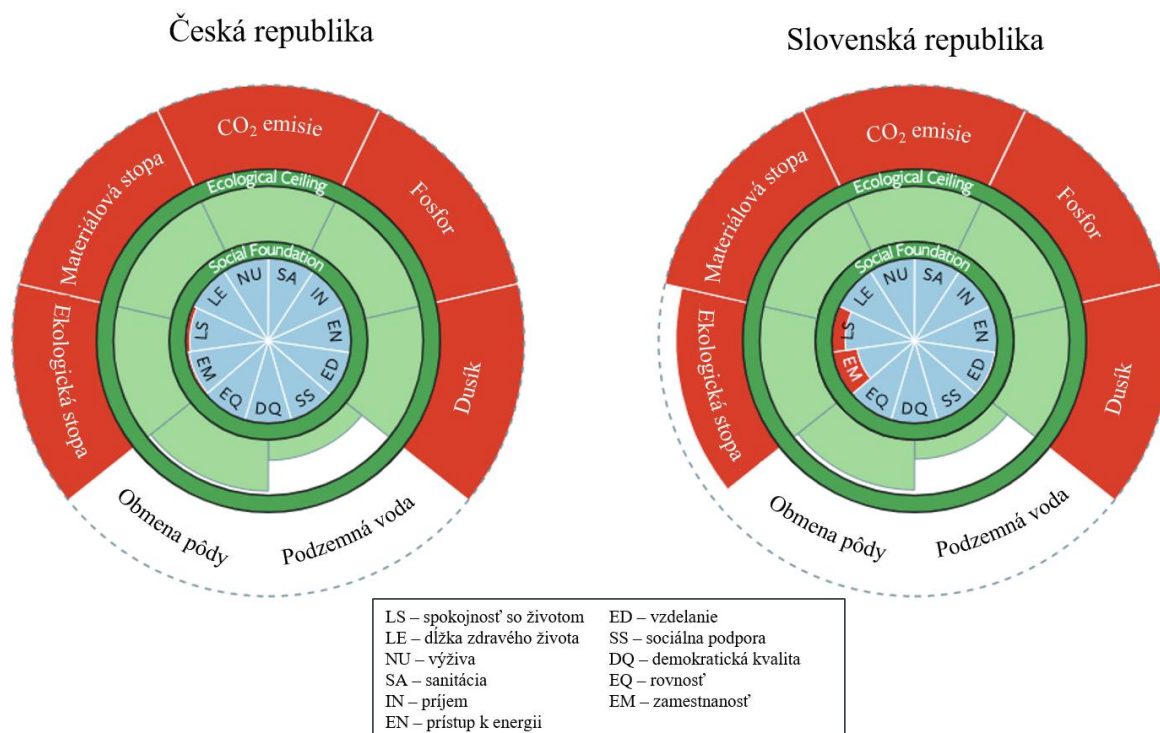
úniou, ktorá investovala 650 mil. eur na prechod na cirkulárnu ekonomiku. Okrem nej sa modelu chytila aj Čína, ktorá zas bola prvou krajinou, ktorá prijala zákon o obehovom hospodárstve [72].



Obr. 5.2: Model ekonomie kobilhy podľa Kate Raworth – prerobené podľa [73]

Koncept „**ekonomia kobilhy**“ (z anglického doughnut economics) je ďalší zaujímavý model sociálne aj ekonomicky udržateľného hospodárskeho rozvoja. Navrhla ho britská ekonómka Kate Raworth a funguje na základe udržania sa v strede „kobilhy“, medzi schopnosťou plniť sociálne a materiálne potreby ľudstva a zároveň neprekračovať možnosti planéty [74]. Podľa obr. 5.2 by sa krajiny s udržateľnou ekonomikou mali nachádzať medzi ekologickým stropom a sociálnou základňou, kde sa nachádza bezpečný a spravodlivý priestor pre ľudstvo. Hodnotiť krajiny iba na základe rastu HDP podľa tohto modelu neodráža komplexné potreby ľudstva a planéty. Z hľadiska tohto modelu sa žiadna krajina nenachádza v strede „kobilhy“ ako udržateľná, pretože všetky sa radia do rozvojových a nie rozvinutých. Niektoré mestá, ako Amsterdam, sa však snažia do stredu dostať a fungovať s naplnením všetkých potrieb obyvateľov, no v rámci materiálnych možností Zeme [74]. Podobné názory udržateľného rozvoja boli taktiež rozobraté v IPCC správe [26].

Na obr. 5.3 je porovnanie Českej republiky a Slovenska v modeli ekonomie kobilhy. Je zrejmé, že ekologické hranice oba štáty neprekračujú iba v dvoch sektoroch: nevyužívajú príliš pitnej vody a nepremieňajú nadbytok pôdy na ekonomické aktivity.



Obr. 5.3: Porovnanie ČR a SR podľa modelu ekonomie koblihy – prerobené podľa [75]

5.3 Finančná bilancia CCS a CCU

Odhad celkových nákladov na technológie spracovávajúce uhlík je komplexný a takmer nedosiahnuteľný cieľ. CCS a CCU sa považujú za **drahé a náročné na energiu**, a to je hlavnou zábranou väčšieho pokroku v týchto technológiách. Je nutné brať do úvahy náklady na vývoj technológie, jej výstavbu, prevádzku, životnosť a následnú efektívnosť, ktorá priamo súvisí s finálnou cenou energie dodávanej spotrebiteľom [26] [76]. Výsledná cena technológie sa tiež skladá z nákladov na komponenty, na transport/využitie CO₂ a na jeho uskladnenie.

Ak je cena kvót na uhlík na trhu nižšia ako odhadované náklady na CCS a CCU, komercializácia technológií je problém. Preto by sa vláda mala zaoberať správnym nastavením a formulovaním politík, a tým dlhodobo stimulovať ich nasadenie [76]. Aj keď sa v poslednom období sústreďujú na tieto technológie vyšší záujem verejnosti aj zúčastnených strán, je potrebný ešte dlhší výskum, vyššia efektívnosť, nižšie ekologické dopady spojené s prevádzkou, a vyskúšanie plánovaných projektov na pilotných nasadeniach [76].

Integrácia technológie CCS pravdepodobne zvýši cenu elektrickej energie o 0,01 – 0,05 €/kWh pri cene elektriny 0,03 – 0,05 €/kWh [76]. Výška zmeny závisí od paliva, špecifických vlastností technológie, jej polohy a vnútroštátnych faktoroch. Pre príklad je možné uviesť náklady na absorpciu najznámejšou MEA technológiou v uholnej/plynovej továrni, kde sa cena pohybuje na 13 – 65 €/tCO₂ (cena tony ušetreného CO₂) [77]. Cena transportu a uskladnenia tvoria menšie časti finálnych nákladov, presnejšie medzi 10 – 25 €/tCO₂ pre transport a 0,5 – 7 €/tCO₂ pre geologické uskladnenie, resp. 5 – 25 €/tCO₂ pre oceánske [77]. Potenciál zachyteného oxidu uhličitého sa odhaduje na 165 GtCO₂ v rokoch 2020 – 2070 [49].

CCU má rovnakú časť odchytenia/separácie aj transportu ako CCS, a tak sa ceny týchto krokov môžu pokladať za rovnaké. Premena a využitie CO₂ je stále v procese výskumu, čo spôsobilo, že **ceny za využitie CO₂ sa pohybujú enormne vysoko** [77]. Napríklad cena

premeny CO₂ na metanol sa zvýšila skoro dvojnásobne v porovnaní s konvenčnou výrobou, alebo cena tony CO₂ sa dostala až na sumu 215 €/tCO₂. To je **ekonomicky nevýhodné**, najmä kvôli nízkej efektívnosti separácie a vysokej spotrebe energie [77]. Cieľ množstva zníženia emisií CO₂ pomocou technológie CCU je 8 GtCO₂ do roku 2050 [54].

V oboch prípadoch sa nesmie zabúdať ani na cenu separácie nečistôt pred procesom separácie oxidu uhličitého. Nečistoty majú dopad aj na kompresiu, uskladnenie aj transport [77]. V porovnaní CCS a CCU sa už dlhodobo berie CCS ako hlavný a viac rozvinutý spôsob zachytávania a v najbližších rokoch to tak pravdepodobne ostane. CCU má naopak výhodu recyklovateľnosti, väčšej flexibility výrobného rozsahu a CCU tiež za niektorých podmienok uvedených v kapitole 3 dokáže vyrábať udržateľnú energiu [77]. CCS aj CCU majú svoje výhody aj nevýhody, v budúcnosti môžu emisie klesnúť aj s kombináciou zavedenia týchto technológií, najmä v prípade rozvoja a zlepšenia momentálnych nedostatkov.

5.4 Náklady na ďalšie riešenia klimatickej zmeny

Na presné vyčíslenie rôznych modelov prechodu na nízkouhlíkovú energetiku neexistuje jednoduchý vzorec. Väčšina z technológií CCS a CCU sú v štádiách pilotných projektov alebo výskumu a dáta o presných cenách chýbajú, ako bolo spomenuté v kapitole 5.2. Odhad nákladov na odstránenie CO₂ s pomocou BECCS, bioenergetickým zachytávaním a uskladňovaním s potenciálom zachytiť 0,5 – 5 Gt CO₂ ročne, je 85 – 170 €/tCO₂ [1]. Zachytávanie CO₂ zo vzduchu okolo nás spôsobom DACCS je momentálne relatívne drahé. Ceny sa pohybujú od 500 – 850 €/tCO₂. Cena by mala časom s vývojom technológie klesať až na pätinu aktuálnej ceny. Odhad potenciálu je medzi 0,5 – 5 Gt CO₂ ročne [1].

Ďalšou spomenutou technológiou bolo vysádzanie lesov a ochrana tých existujúcich. Náklady na odstránenie sú relatívne nízke: 4 – 45 €/tCO₂, potenciál zachytenia sa uvádza na 0,5 – 3,6 Gt CO₂ ročne [1]. Obnoviteľné zdroje energie sa odhadujú veľmi náročne a potenciál sa v IPCC [26] uvádza na 220 – 560 GtCO₂ do roku 2050 s približnou sumou 100 €/tCO₂. Ako posledná rozoberaná možnosť je elektrifikácia, prechod z fosílnych palív na elektrickú energiu z obnoviteľných zdrojov. Jej cena sa odhaduje na 120 – 150 €/tCO₂ [60] a potenciál na 7,22 GtCO₂/rok [78]. Potenciály zachyteného množstva boli vypočítané do roku 2050, do konca storočia by sa niektoré mohli markantne rozvinúť a odstraňovať viac.

Obnoviteľné zdroje energie sú ďalšou veľmi dôležitou možnosťou riešenia klimatickej krízy. Ich využívanie je široko používané a vyrobená energia je zelená. Podľa IPCC [26] zhrnutia modelov je široké využívanie OZE jedinou možnosťou ako dosiahnuť ambiciózne plány uhlíkovej neutrality. Niektoré technológie OZE sú konkurencieschopné so súčasnými cenami energie, najmä ak sú aplikované v regiónoch s priaznivými podmienkami pre zdroje alebo na miestach s chýbajúcou infraštruktúrou pre lacné dodávky energie [26]. Vo väčšine regiónov sveta sú však stále potrebné politické opatrenia na zabezpečenie rýchleho nasadenia OZE. Práve vďaka zvýšeným podporám videl sektor obnoviteľných zdrojov signifikantný rast od roku 2005, do dnešného dňa väčšina financií a záujmu dostáva elektrine pred využívaním zelenej energie na kúrenie, chladenie a transport. Podľa modelov z projektu ADAM bližšie rozobratého v IPCC reporte [26] by finančne najnáročnejšia bola mitigácia klimatickej zmeny bez využitia obnoviteľných zdrojov energie.

5.5 Ďalšie benefity prechodu na nízkouhlíkové zdroje

Klimatická kríza sa netýka len neviditeľného skleníkového plynu CO₂, dotýka sa každodenného života celej populácie ako bolo spomenuté v kapitolách vyššie. Pri prechode na nízkouhlíkovú energetiku okrem primárnych benefitov existujú aj vedľajšie výhody. Podľa pilotnej štúdie [79]

vykonanej vo Francúzsku, Nemecku, Nórsku a Veľkej Británii existuje dokopy 128 predpokladaných vedľajších benefitov pri prechode týchto štyroch štátov na nízkouhlíkové zdroje. Mnohé z nich boli práve ekonomické (37), ako zníženie spotreby pohonných hmôt, nové pracovné pozície, exporty a profity. Ostatné boli environmentálne (14) ako zlepšenie znečisteného ovzdušia, mitigácia klimatickej zmeny alebo znížené dopady na pôdu. Ostatných 77 nespadálo do kategórie „výdavky“ či „uhlík“. Nachádza sa tam 30 rôznych sociálnych výhod ako napríklad pozitívne pocity prestíže a povedomia o životnom prostredí používaním elektrických áut v Nórsku. 31 z výhod bolo zaznamenaných ako technických, napríklad stimulácia inovácií fotovoltiky v Nemecku. Ako posledné prináša zmena aj politické benefity a zlepšenie energetickej bezpečnosti [79].

Prechod na nízkouhlíkové zdroje bude v budúcnosti vyžadovať dodatočné inovácie v mnohých odvetviach technológií ako skladovanie energie, inteligentné siete (zvýšenie flexibility a riadenia sietí), ich rozšírenie, obchodovanie a nové obchodné modely a trhové usporiadanie, napríklad kapacitné trhy na zabezpečenie záložnej výroby. Analytici a politici by sa na nízkouhlíkový prechod mali pozerat' ako na komplexný celok ovplyvňujúci široké spektrum, nie iba skúmať jeho ceny [79].

6 Zhodnotenie momentálnej situácie

Riešením problému klimatickej zmeny, jej dopadmi na civilizáciu, prírodu či ekonomiku sa zaoberá nespočetne veľa výskumov a prác. Pre komplexnosť problematiky a jej prepojenie s niekoľkými sektormi naraz sa čísla, názory, a možné riešenia častokrát rozchádzajú. Vo výpočtoch totiž existuje priveľa neznámych, častokrát sa výskumy opierajú o viaceré modely, z ktorých každý počíta s inými predikčnými hodnotami. **Budúcnosť skleníkových plynov silno závisí na politikách, obmedzeniach, podporách a technologickom pokroku smerujúcom k zvyšovaniu efektivity a následnému zníženiu spotreby energie.** Do výpočtov, ktoré vznikali pár rokov dozadu, neboli zahrnuté neočakávané udalosti ako je COVID-19. Príchodom pandémie sa naplánované rozhodnutia o obmedzeniach emisií, vyradeniach uhľových priemyslov a elektrární alebo plánované dotácie do nových technológií pozastavili. Z tejto situácie je možné naučiť sa a zobrať si aj pozitíva – rýchlosť, akou dokáže civilizácia reagovať na krízu, a schopnosť dočasne obmedziť niektoré činnosti na úkor záchrany ohrozených aspektov. Ďalej už je len potrebné využívať nadobudnuté vedomosti rovnako v každej kríze, vrátane tej klimatickej.

Nie je jasné aké ekonomické dopady s utíchajúcou pandemiou prídu. Pre postupné znižovanie CO₂ z ovzdušia je kľúčové obmedzenie dotácií do opätovného naštartovania ekonomiky, ktorá vytvára nadmerné emisie skleníkových plynov, priamo či nepriamo. Navyše, **je nevyhnutné trvať na plánoch prechodu na zelenú energetiku**, v lepšom prípade sa usilovať proces urýchliť v zmysle minimalizácie ekonomického a environmentálneho dopadu neskôr. Podľa štúdií a predikčných plánov existuje prepojenie medzi rýchlosťou obmedzenia vypúšťania emisií, a medzi nákladmi na zmiernenie dopadov klimatickej zmeny.

Technologický progres hrá rovnako kľúčovú rolu v mitigácii klimatickej zmeny ako financie. Podľa zistení v tejto práci sú jednotlivé riešenia na sebe závislé. Dostupné informácie hovoria, že neexistuje jednotná odpoveď ako vyriešiť klimatickú zmenu, s najväčšou pravdepodobnosťou budú musieť byť využité viaceré, možno aj všetky dostupné riešenia naraz.

Takmer všetkým rozoberaným technológiám **chýbajú bud' potrebné výskumy na komercializáciu alebo zlepšenie efektivity** výroby a prevádzky na zníženie finančných a energetických penúlt. Tento problém nemajú azda len jadrové elektrárne pre ich dlhodobé využívanie. Aj tak sa však pracuje na bezpečnejších a ekologickejších možnostiach získavania energie zo štiepných reakcií. Obnoviteľným zdrojom energie sa napomáha podporami z fondov a tak sa v posledných rokoch objavilo obrovské množstvo týchto technológií po celom svete. Miesto na zlepšenie v tomto prípade je vyriešenie výpadkov energie pri nevhodnom počasí a väčšia komercializácia. O možnej elektrifikácii zo zelenej elektriny neexistuje dostatok výskumu a článkov, aj keď je táto možnosť vskutku zaujímavá. Na širšie využívanie elektrickej energie vo viacerých sektoroch by bolo nutné zvýšenie energetickej efektivity zariadení, predĺženie ich životnosti a vylepšená elektrická sieť. Výhody a nevýhody CCS boli spomenuté niekoľkokrát. Je potrebné nájsť správne absorbenty na zníženie energetickej náročnosti pri regenerácii a posunúť niektoré zaujímavé plány do pilotných projektov na vyskúšanie ich efektivity v reálnom prostredí. Napríklad by bolo vhodné vylepšovať a viac využívať technológiu BECCS, ktorá dokáže vytvoriť negatívne emisie CO₂. CCU je vnímaná ako dobrá príležitosť vytvoriť uzavretý uhlíkový cyklus, kde nebudú potrebné novo vyrobené materiály. Keďže je technológia v rannom štádiu vývoja, momentálne náklady sú vysoké a opäť je potrebný dlhší výskum ak sa majú technológie využívať komerčne. Okrem týchto, relatívne známych, možností by sa nemalo zabúdať na nové nápady a riešenia klimatickej zmeny, ktoré sa objavujú priam denno-denne. Zhrnutie hlavných poznatkov sa nachádza v tabuľke 1.

Metóda	Cena tony ušetreného CO ₂	Mitigačný potenciál	Výhody riešenia	Nevýhody riešenia	Riziká/Neistoty
Zachytávanie a sekvestrácia CO ₂ (CCS)	13 – 65 €/tCO ₂ (+ cena za transport a uskladnenie)	165 GtCO ₂ v rokoch 2020 – 2070	<ul style="list-style-type: none"> rýchle nasadenie overená technológia „retro-fitting“ 	<ul style="list-style-type: none"> dôčasné riešenie tážba fosílnych palív znižovaná efektívnosť elektrárne 	<ul style="list-style-type: none"> únik CO₂ z úložiska vylepšenie absorbentov
Zachytávanie a využitie CO ₂ (CCU)	215 €/tCO ₂ (odhadovaná cena)	8 GtCO ₂ cieľ do roku 2050	<ul style="list-style-type: none"> výroba produktov uzavretý cyklus CO₂ znižovanie uhlíka 	<ul style="list-style-type: none"> nová technológia (vysoké ceny, potrebný výskum) tážba fosílnych palív 	<ul style="list-style-type: none"> neistá finálna cena otázny životný cyklus
BECCS	85 – 170 €/tCO ₂	0,5 – 5 GtCO ₂ ročne	<ul style="list-style-type: none"> negatívne emisie bez fosílnych palív 	<ul style="list-style-type: none"> využitie pôdy na biomasu ohrozenie biodiverzity 	<ul style="list-style-type: none"> dostupnosť biomasy
DACCS	500 – 850 €/tCO ₂	0,5 – 5 GtCO ₂ ročne	<ul style="list-style-type: none"> negatívne emisie nasadenie kdekoľvek 	<ul style="list-style-type: none"> malé množstvo CO₂ vo vzduchu – vysoká cena 	<ul style="list-style-type: none"> cena ušetreného CO₂ po komercializácii
Zalesňovanie	4 – 45 €/tCO ₂	0,5 – 3,6 GtCO ₂ ročne	<ul style="list-style-type: none"> prírodné, lacné, pomáha životnému prostrediu 	<ul style="list-style-type: none"> krátky životný cyklus zabera využitelnú pôdu 	<ul style="list-style-type: none"> pri požiaroch sa vypustí veľké množstvo uloženého uhlíka
Elektrifikácia zelenou energiou	120 – 150 €/tCO ₂	7,22 GtCO ₂ eq. ročne	<ul style="list-style-type: none"> bez fosílnych palív transport bez znečistenia 	<ul style="list-style-type: none"> počítačový kapitál nutná rekonštrukcia energetickej siete 	<ul style="list-style-type: none"> variabilita zdroja energie bezpečnosť dodávok stabilita prenosovej siete
Obnoviteľné zdroje energie	100 €/tCO ₂ (odhadovaná cena v roku 2010 IPCC)	220 – 560 GtCO ₂ do roku 2050	<ul style="list-style-type: none"> zelená a overená energetika takmer bez emisií a fosílnych palív 	<ul style="list-style-type: none"> nestabilita zdroja počítačový kapitál 	<ul style="list-style-type: none"> ohrozenie prenosovej siete bezpečnosť dodávok

Tab. 1: Zhrnutie metód znižovania oxidu uhličitého z ovzdušia, ich ceny, mitigačného potenciálu, výhod, nevýhod a rizík/neistôt

7 Závěr

Okamžitý rozvoj mitigačních technologií je na základě současného stavu klímy mimoriadne důležitý. Táto práca sa zaoberala rozsiahlym prehľadom stratégií boja proti zmene klímy, zhrnula všetky potrebné informácie na porozumenie problematiky z environmentálneho, technologického a ekonomického pohľadu. Z hľadiska efektivity a ceny je aplikácia technológií na zachytenie emisií CO₂ priamo v mieste vzniku vhodným riešením, najmä kvôli omnoho väčšej koncentrácii oxidu uhličitého v spalinách ako vo vzduchu.

V práci boli konkrétne rozobraté technológie CCS na zachytenie a sekvenciu CO₂, rôzne varianty zachytenia ako chemická a fyzikálna absorpcia, adsorpcia tuhými rozpúšťadlami a zmenou teploty či tlaku, kryogénna a membránová separácia. Možnosti využitia spomínaných variant je zväčša možné využiť pred spaľovaním ale aj po spaľovaní, až na kryogénnu separáciu, ktorá funguje najlepšie v oxy-fuel spaľovaní. Využitie konkrétnej separačnej metódy je závislé na výstupných fyzikálnych a chemických vlastnostiach, pri ktorých je najvyššia efektivita záchytu oxidu uhličitého. Následne boli rozobraté technológie CCU, ktoré sú obdobou CCS v procese záchytu, avšak vyseparovaný CO₂ je využitý ako hodnotný produkt. Ďalej sa práca okrajovo venovala obnoviteľným zdrojom energie, technológiám s negatívnymi emisiami a inými možnými projektami zaoberajúcimi sa znižovaním oxidu uhličitého z atmosféry. Dospela tiež k záveru, že obnoviteľné zdroje energie sú veľmi dôležitou časťou plánu na naplnenie Parížskej dohody a pri dostatočných politických a ekonomických stimuloch budú v najbližších rokoch vyrábať stále viac a viac zelenej energie. Na CCS a CCU sa často prihliada ako na dočasné a nie úplne ekologické riešenie z hľadiska neukončenej ťažby fosílnych palív. Zároveň je to ale možnosť, ktorú je možné využiť zatiaľ čo sa priemysly a elektrárne spaľujúce takéto palivá pripravujú na úplné odstavenie. Technológie s negatívnymi emisiami by mali byť využité najmä na zníženie emisií, ktoré nebolo možné zachytiť konvenčnými dekarbonizačnými variantami. Vo všetkých riešeniach znižovania CO₂ treba dbať na celkovú bilanciu uhlíka a energetickej náročnosti v procese, a to konkrétne pri výrobe technológie, počas jej zavádzania a pri plnom nasadení, resp. pri výmene alebo odstavení.

Dôležitým ostáva ozrejniť fakt, že jednoduché a konečné riešenie problému zmeny klímy neexistuje. Krízu na globálnej úrovni je možné vyriešiť iba sofistikovaným prístupom, najlepšie zahrňujúcim aspekty zo všetkých odvetví kam problém siaha. Ako bolo spomenuté, klimatická zmena si vyžaduje pozornosť v technologickom pokroku zefektívnenia dostupných technológií a modernizácie prenosových sietí, v ekonomických politikách a financovaní perspektívnych riešení, a v neposlednom rade v dopadoch zmeny atmosféry a podnebia na život na Zemi.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮV

- [1] FAWZY, Samer, Ahmed OSMAN, John DORAN a David ROONEY. Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters* [online]. 2020, 18(6), 2069-2094 [cit. 2021-04-16]. ISSN 1610-3653. Dostupné z: doi:10.1007/s10311-020-01059-w
- [2] RITCHIE, Hannah. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?. *Our World in Data* [online]. Oxford: University of Oxford, 2020 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [3] ŠTEINER, A. a L. HEGYI. Adaptácia na zmenu klímy - naliehavá úloha miest [online]. Košice: Karpatský rozvojový inštitút, 2014 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: http://www.kri.sk/web_object/803.pdf
- [4] NASA. The Carbon Cycle. *Earth observatory* [online]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2011 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>
- [5] NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. *Climate Change: Evidence and Causes: Update 2020*. Washington, DC: The National Academies Press, 2020. ISBN 978-0-309-67502-4. Dostupné z: doi:10.17226/25733.
- [6] THOMPSON, Lonnie G. Climate change: The evidence and our options. *The Behavior Analyst* [online]. 2010, 33(2), 153-170 [cit. 2021-04-23]. ISSN 0738-6729. Dostupné z: doi:10.1007/BF03392211
- [7] UNFCCC. What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? [online]. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>
- [8] The Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change [online]. Bonn: UNFCCC [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [9] UNFCCC. What is the Kyoto Protocol? [online]. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: https://unfccc.int/kyoto_protocol
- [10] The Basics of Climate Change. *The Royal Society* [online]. London: The Royal Society [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/climate-change-evidence-causes/basics-of-climate-change/>
- [11] Vliv CO₂ na změnu klimatu. Informační portál pro technologie zachytávání a ukládání CO₂ [online]. Brno: Česká geologická služba, 2016 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/ccs/technologie-ccs/zmena-klimatu>
- [12] NASA. The Causes of Climate Change. *Global Climate Change: Vital Signs of the Planet* [online]. Washington, DC: California Institute of Technology [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://climate.nasa.gov/causes/>
- [13] BRUHWILER, Lori, Frans-Jan PARMENTIER, Patrick CRILL, Mark LEONARD a Paul PALMER. The Arctic Carbon Cycle and Its Response to Changing Climate. *Current Climate Change Reports* [online]. 2021, 7(1), 14-34 [cit. 2021-04-23]. ISSN 2198-6061. Dostupné z: doi:10.1007/s40641-020-00169-5

- [14] VARGAS ZEPPELLO, Lucas, Luke PARSONS, June SPECTOR, Rosamond NAYLOR, David BATTISTI, Yuta MASUDA a Nicholas WOLFF. Large scale tropical deforestation drives extreme warming. *Environmental Research Letters* [online]. 2020, 15(8) [cit. 2021-04-23]. ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/ab96d2
- [15] UNING, Royston, Mohd LATIF, Murnira OTHMAN et al. A Review of Southeast Asian Oil Palm and Its CO₂ Fluxes. *Sustainability* [online]. 2020, 12(12) [cit. 2021-04-23]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12125077
- [16] KHATUN, Rahima, Mohammad REZA, M. MONIRUZZAMAN a Zahira YAAKOB. Sustainable oil palm industry: The possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 76, 608-619 [cit. 2021-04-23]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.03.077
- [17] Vývoj koncentracie CO₂ v atmosfére. Fakta o klimatu [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2021 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://faktyoklime.sk/infografiky/koncentracia-co2>
- [18] HAUSFATHER, ZEKE. Analysis: Global fossil-fuel emissions up 0.6% in 2019 due to China. *CarbonBrief* [online]. London: Carbon Brief Ltd, 2019 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.carbonbrief.org/analysis-global-fossil-fuel-emissions-up-zero-point-six-per-cent-in-2019-due-to-china>
- [19] Annual CO₂ emissions. *Our World in Data* [online]. Oxford: University of Oxford [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?tab=chart>
- [20] Emise skleníkových plynů v ČR podle sektorů detailně. Fakta o klimatu [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2020 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-cr-detail>
- [21] Emise skleníkových plynů Slovenska podle sektorů. Fakta o klimatu [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2020 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-sr>
- [22] Coal phase out in the European Union [online]. *Climate Analytics*, 2017 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://climateanalytics.org/briefings/eu-coal-phase-out/>
- [23] Overview: National coal phase-out announcements in Europe [online]. *Europe Beyond Coal*, 2020 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.klimareporter.de/images/dokumente/2020/07/Overview-of-national-coal-phase-out-announcements-Europe-Beyond-Coal-14-July-2020.pdf>
- [24] UPDATE 1-Czech government parties fail to agree on 2038 coal phase-out target. *Reuters* [online]. London, 2021 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/czech-coal-idUSL1N2K71GG>
- [25] Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu. In: . Česká republika: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2020. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/vnitrostatni-plan-ceske-republiky-v-oblasti-energetiky-a-klimatu--252016/>
- [26] *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012. ISBN 978-1-107-60710-1.
- [27] WANG, Yu, Jibao GU a Jianlin WU. Explaining local residents' acceptance of rebuilding nuclear power plants: The roles of perceived general benefit and perceived local benefit.

- Energy Policy [online]. 2020, 140 [cit. 2021-04-23]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2020.111410
- [28] MACDOWELL, Niall, Nick FLORIN, Antoine BUCHARD et al. An overview of CO₂ capture technologies. *Energy & Environmental Science* [online]. 2010, 3(11) [cit. 2021-04-23]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/c004106h
- [29] MIKHELKIS, Lena a Venkatesh GOVINDARAJAN. Techno-Economic and Partial Environmental Analysis of Carbon Capture and Storage (CCS) and Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCU/S): Case Study from Proposed Waste-Fed District-Heating Incinerator in Sweden. *Sustainability* [online]. 2020, 12(15) [cit. 2021-04-23]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12155922
- [30] CUÉLLAR-FRANCA, Rosa a Adisa AZAPAGIC. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ Utilization* [online]. 2015, 9, 82-102 [cit. 2021-04-23]. ISSN 22129820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcou.2014.12.001
- [31] CARPENTER, Steven a Henry LONG. Integration of carbon capture in IGCC systems. *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies* [online]. Elsevier, 2017, s. 445-463 [cit. 2021-04-23]. ISBN 9780081001677. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100167-7.00036-6
- [32] What is CCS?. *Zero CO₂* [online]. Oslo: Zero Emission Resource Organisation [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <http://www.zeroco2.no/introduction/what-is-ccs>
- [33] CARBON DIOXIDE CAPTURE APPROACHES. National Energy Technology Laboratory [online]. Washington, D.C. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/capture-approaches>
- [34] MITSUBISHI POWER, LTD. Integrated Coal Gasification Combined Cycle (IGCC) Power Plants. Mitsubishi Power [online]. Yokohama [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://power.mhi.com/products/igcc>
- [35] BASILE, A., A. GUGLIUZZA, A. IULIANELLI a P. MORRONE. Membrane technology for carbon dioxide (CO₂) capture in power plants. *Advanced Membrane Science and Technology for Sustainable Energy and Environmental Applications* [online]. Elsevier, 2011, s. 113-159 [cit. 2021-04-23]. ISBN 9781845699697. Dostupné z: doi:10.1533/9780857093790.2.113
- [36] MANTRIPRAGADA, Hari a Edward RUBIN. Chemical Looping for Pre-combustion CO₂ Capture — Performance and Cost Analysis. *Energy Procedia* [online]. 2013, 37, 618-625 [cit. 2021-04-23]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2013.05.149
- [37] LUIS, Patricia. Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination* [online]. 2016, 380, 93-99 [cit. 2021-04-23]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2015.08.004
- [38] KORRE, Anna, Zhenggang NIE a Sevket DURUCAN. Life cycle modelling of fossil fuel power generation with post-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2010, 4(2), 289-300 [cit. 2021-04-23]. ISSN 17505836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2009.08.005
- [39] BREEZE, Paul. Carbon Capture and Storage. *Coal-Fired Generation* [online]. Elsevier, 2015, s. 73-86 [cit. 2021-04-23]. ISBN 9780128040065. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-804006-5.00013-7

- [40] YU, Cheng-Hsiu, Chih-Hung HUANG a Chung-Sung TAN. A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. *Aerosol and Air Quality Research* [online]. 2012, 12(5), 745-769 [cit. 2021-04-23]. ISSN 16808584. Dostupné z: doi:10.4209/aaqr.2012.05.0132
- [41] VEGA, Fernando, Mercedes CANO, Sara CAMINO, Luz FERNÁNDEZ, Esmeralda PORTILLO a Benito NAVARRETE. Solvents for Carbon Dioxide Capture. KARAMÉ, Iyad, Janah SHAYA a Hassan SROUR, ed., Iyad KARAMÉ, Janah SHAYA, Hassan SROUR. *Carbon Dioxide Chemistry, Capture and Oil Recovery* [online]. InTech, 2018 [cit. 2021-04-23]. ISBN 978-1-78923-574-6. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.71443
- [42] SUZUKI, Motoyuki. *Adsorption Engineering*. Tokyo: Kodansha, 1990. ISBN 9780444988027.
- [43] WU, Ying, Xiaoping CHEN, Jiliang MA, Ye WU, Daoyin LIU, Jianguo MI a Weiyi XIE. System integration for coal-fired power plant with post combustion CO₂ capture: Comparative study for different solid dry sorbents. *Fuel* [online]. 2020, 280 [cit. 2021-04-23]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.118561
- [44] WANG, Junya, Liang HUANG, Ruoyan YANG et al. Recent advances in solid sorbents for CO₂ capture and new development trends. *Energy Environ. Sci* [online]. 2014, 7(11), 3478-3518 [cit. 2021-04-23]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/C4EE01647E
- [45] XU, Gang, Feifei LIANG, Yongping YANG, Yue HU, Kai ZHANG a Wenyi LIU. An Improved CO₂ Separation and Purification System Based on Cryogenic Separation and Distillation Theory. *Energies* [online]. 2014, 7(5), 3484-3502 [cit. 2021-04-23]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en7053484
- [46] WU, Yiqian, Yanlei XIANG, Lei CAI, Haitian LIU a Ying LIANG. Optimization of a novel cryogenic air separation process based on cold energy recovery of LNG with exergoeconomic analysis. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, 275 [cit. 2021-04-23]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.123027
- [47] JI, Guozhao a Ming ZHAO. Membrane Separation Technology in Carbon Capture. YUN, Yongseung, ed., Yongseung YUN. *Recent Advances in Carbon Capture and Storage* [online]. InTech, 2017 [cit. 2021-04-23]. ISBN 978-953-51-3005-5. Dostupné z: doi:10.5772/65723
- [48] WANG, Xiaoxing a Chunshan SONG. Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective. *Frontiers in Energy Research* [online]. 2020, 8 [cit. 2021-04-23]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2020.560849
- [49] ROMANAK, Katherine, Mathias FRIDAHL a Tim DIXON. Attitudes on Carbon Capture and Storage (CCS) as a Mitigation Technology within the UNFCCC. *Energies* [online]. 2021, 14(3) [cit. 2021-04-24]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14030629
- [50] ROSA, Lorenzo, Daniel SANCHEZ, Giulia REALMONTE, Dennis BALDOCCHI a Paolo D'ODORICO. Corrigendum to “The water footprint of carbon capture and storage technologies” [Renew Sustain Energy Rev (2021) 110511]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, 140 [cit. 2021-04-24]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2021.110773
- [51] ZHANG, Tian, Wanchang ZHANG, Ruizhao YANG, Yimo LIU a Masoud JAFARI. CO₂ capture and storage monitoring based on remote sensing techniques: A review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, 281 [cit. 2021-04-24]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.124409
- [52] MÜLLER, Leonard, Arne KÄTELHÖN, Marvin BACHMANN, Arno ZIMMERMANN, André STERNBERG a André BARDOW. A Guideline for Life Cycle Assessment of

- Carbon Capture and Utilization. *Frontiers in Energy Research* [online]. 2020, 8 [cit. 2021-04-24]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2020.00015
- [53] KÄTELHÖN, Arne, Raoul MEYS, Sarah DEUTZ, Sangwon SUH a André BARDOW. Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2019, 116(23), 11187-11194 [cit. 2021-04-23]. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1821029116
- [54] ZHANG, Zhien, Shu-Yuan PAN, Hao LI, Jianchao CAI, Abdul OLABI, Edward ANTHONY a Vasilije MANOVIC. Recent advances in carbon dioxide utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, 125 [cit. 2021-04-23]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2020.109799
- [55] DALLA LONGA, Francesco, Remko DETZ a Bob VAN DER ZWAAN. Integrated assessment projections for the impact of innovation on CCS deployment in Europe. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2020, 103 [cit. 2021-04-24]. ISSN 17505836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2020.103133
- [56] MASSON-DELMOTTE, P. ZHAI, H.-O. PÖRTNER et al. IPCC. Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [online]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018 [cit. 2021-04-24]. ISBN 978-92-9169-151-7. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf
- [57] LNĚNÍČKOVÁ, Veronika. Inženýrská řešení pro zmírnění klimatické změny - metody pro eliminaci skleníkových plynů z atmosféry [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132488>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Lízal.
- [58] YIN, Longtian, Xiujin LI, Liang ZHANG a Jianwei LI. Characteristics of carbon dioxide desorption from MEA-based organic solvent absorbents. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2021, 104 [cit. 2021-04-24]. ISSN 17505836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2020.103224
- [59] CHOWDHURY, Firoz, Kazuya GOTO, Hidetaka YAMADA a Yoichi MATSUZAKI. A screening study of alcohol solvents for alkanolamine-based CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2020, 99 [cit. 2021-04-23]. ISSN 17505836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2020.103081
- [60] PHILIBERT, Cédric. Direct and indirect electrification of industry and beyond. *Oxford Review of Economic Policy* [online]. 2019, 35(2), 197-217 [cit. 2021-04-24]. ISSN 0266-903X. Dostupné z: doi:10.1093/oxrep/grz006
- [61] ZHANG, Runsen a Shinichiro FUJIMORI. The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios. *Environmental Research Letters* [online]. 2020, 15(3) [cit. 2021-04-24]. ISSN 1748-9326. Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/ab6658
- [62] VELAZQUEZ ABAD, Anthony a Paul DODDS. Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy* [online]. 2020, 138 [cit. 2021-04-24]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2020.111300

- [63] MOTEVALLI, S., N. DASHTBAN a M. MALEKI. Determination of optimum conditions in ITER tokamak by using zero-dimensional model. *Indian Journal of Physics* [online]. [cit. 2021-04-24]. ISSN 0973-1458. Dostupné z: doi:10.1007/s12648-020-01857-6
- [64] ESTEVES, Ana, Francisca SANTOS a José MAGALHÃES PIRES. Carbon dioxide as geothermal working fluid: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, 114 [cit. 2021-04-24]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109331
- [65] LAHSEN, Myanna. Should AI be Designed to Save Us From Ourselves?: Artificial Intelligence for Sustainability. *IEEE Technology and Society Magazine* [online]. 2020, 39(2), 60-67 [cit. 2021-04-24]. ISSN 0278-0097. Dostupné z: doi:10.1109/MTS.2020.2991502
- [66] GIBNEY, Elizabeth. Fuel for world's largest fusion reactor ITER is set for test run. *Nature* [online]. 2021, 591(7848), 15-16 [cit. 2021-04-23]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/d41586-021-00408-1
- [67] STEFFEN, Bjarne, Florian EGLI, Michael PAHLE a Tobias SCHMIDT. Navigating the Clean Energy Transition in the COVID-19 Crisis. *Joule* [online]. 2020, 4(6), 1137-1141 [cit. 2021-04-24]. ISSN 25424351. Dostupné z: doi:10.1016/j.joule.2020.04.011
- [68] LIESKOVSKÁ, Zuzana a Pavla LÉNYIOVÁ, ed. *Správa o stave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2018: rozšírené hodnotenie kvality a starostlivosti*. 1. vyd. Banská Bystrica: Slovenská agentúra životného prostredia, 2019. ISBN 978-80-8213-007-5.
- [69] Integrovaný národný energetický a klimatický plán na roky 2021 - 2030. In: . Slovenská republika: Ministerstvo hospodárstva SR, 2019, 2018/1999. Dostupné také z: <https://www.economy.gov.sk/energetika/navrh-integrovaného-narodného-energetickeho-a-klimatickeho-planu>
- [70] Souhrnná zpráva ze sociodemografického výzkumu. Dílčí část hlavního výstupu TK02010048-V1. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2021. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/resene-dokoncene-projekty-a-jejich-vystupy/2021/2/Souhrnna-zprava-ze-sociodemografickeho-vyzkumu.pdf>
- [71] Srovnání scénářů transformace elektroenergetiky ČR. Fakta o klimatu [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2020 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/srovnani-energetickych-scenaru-cr>
- [72] MILLAR, Neal, Eoin MCLAUGHLIN a Tobias BÖRGER. The Circular Economy: Swings and Roundabouts?. *Ecological Economics* [online]. 2019, 158, 11-19 [cit. 2021-04-23]. ISSN 09218009. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolecon.2018.12.012
- [73] Re-Defining Sustainability [online]. *CritDay*, 2019 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://critday.com/2019/04/15/focus-2019-sustainability-re-defining-sustainability/>
- [74] NUGENT, Ciara. Amsterdam Is Embracing a Radical New Economic Theory to Help Save the Environment. Could It Also Replace Capitalism?. *TIME* [online]. 2021 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://time.com/5930093/amsterdam-doughnut-economics/>
- [75] Country Comparisons. A Good Life For All Within Planetary Boundaries [online]. Leeds: University of Leeds, 2021 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://goodlife.leeds.ac.uk/countries/#CzechRepublic>

- [76] WILBERFORCE, Tabbi, A.G. OLABI, Enas SAYED, Khaled ELSAID a Mohammad ABDELKAREEM. Progress in carbon capture technologies. *Science of The Total Environment* [online]. 2021, 761 [cit. 2021-04-24]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143203
- [77] WANG, Honglin, Yanrong LIU, Aatto LAAKSONEN, Anna KROOK-RIEKKOLA, Zhuhong YANG, Xiaohua LU a Xiaoyan JI. Carbon recycling – An immense resource and key to a smart climate engineering: A survey of technologies, cost and impurity impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, 131 [cit. 2021-04-24]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2020.110010
- [78] IPCC. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2007. ISBN 978-0-521-88011-4. Dostupné také z: www.cambridge.org/9780521880091
- [79] SOVACOOOL, Benjamin, Mari MARTISKAINEN, Andrew HOOK a Lucy BAKER. Beyond cost and carbon: The multidimensional co-benefits of low carbon transitions in Europe. *Ecological Economics* [online]. 2020, 169 [cit. 2021-04-24]. ISSN 09218009. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolecon.2019.106529

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

Skratka	Význam
BECCS	Bioenergia so zachytávaním a ukladaním CO ₂
CaL	Vápnikový cyklus
CCS	Zachytávanie a sekvestrácia CO ₂
CCU	Zachytávanie a využitie CO ₂
CEF	Nástroj na prepájanie Európy (Connecting Europe Facility)
CLC	Spaľovanie v chemickej smyčke
CO ₂ eq	Ekvivalent CO ₂
CSP	Koncentrovaná slnečná energia
DACCS	Zachytávanie a uloženie CO ₂ zo vzduchu
DEA	Dietanolamín
ECBM	Vstrekovanie CO ₂ do uhoľných slojov
EGS	Vylepšené geotermálne systémy (Enhanced geothermal systems)
EOR	Terciárna ťažba ropy
ESA	Adsorpcia pomocou prechodu elektriny
Gt CO ₂	Gigatona CO ₂
GTCC	Kombinovaný cyklus s plynovou turbínou
GWP	Potenciál globálneho otepľovania
HDP	Hrubý domáci produkt
IGCC	Integrovaný paroplynový cyklus
IPCC	Medzivládny panel o zmene klímy
ITER	Medzinárodný tokamak experiment
kWh	Kilowatthodina
MAT	Mikrovlnná podporná technológia (Microwave-assist technology)
MDEA	Metyldietanolamín
MEA	Monoetanolamín
MOF	Kovovo-organický rámec (Metal-organic framework)
OSN	Organizácia Spojených národov
OTEC	Premena termálnej energie oceánov
OZE	Obnoviteľné zdroje energie
PCC	Zachytávanie CO ₂ po spaľovaní
PPCA	Powering Past Coal Alliance
ppm	Milióntina (parts per million)
PSA	Tlaková cyklická adsorpcia (Pressure swing adsorption)
PTSA	Adsorpcia zmenou tlaku a teploty
TSA	Adsorpcia zmenou teploty
VSA	Vákuová adsorpcia

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1: Schéma skleníkového efektu – prerobené podľa [11].....	15
Obr. 1.2: Vývoj emisií CO ₂ od 800 000 pr. n. l. do roku 2020 – prerobené podľa [17]	17
Obr. 1.3: Globálne emisie skleníkových plynov podľa sektorov (2016) – prerobené podľa [2]	18
Obr. 1.4: Vývoj emisií krajín s najväčšou produkciou v miliardách ton CO ₂ – prerobené podľa [19]	19
Obr. 1.5: Emisie CO ₂ eq Českej republiky rozdelené podľa zdroja v roku 2018 – prerobené podľa [20]	20
Obr. 2.1: Rozdelenie technologických možností zachytávania emisií CO ₂ rozobraných v tejto práci – prerobené podľa [30]	23
Obr. 2.2: Schéma procesu zachytávania CO ₂ pred spaľovaním – prerobené podľa [32].....	24
Obr. 2.3: Schéma procesu spaľovania s čistým kyslíkom – prerobené podľa [32].....	25
Obr. 2.4: Schémy chemickej smyčky CLC a vápnikového cyklu CaL – prerobené podľa [36]	26
Obr. 2.5: Schéma procesu zachytávania CO ₂ po spaľovaní – prerobené podľa [38]	27
Obr. 2.6: Proces chemickej absorpcie – prerobené podľa [28]	28
Obr. 2.7: Schéma procesu membránovej separácie – prerobené podľa [47].....	31
Obr. 2.8: Graf porovnania GWP elektrárni nevyužívajúcich CCS, využívajúcich MEA po spaľovaní a spaľovanie v čistom kyslíku – prerobené podľa [30]	33
Obr. 3.1: Uhlíkovo neutrálny proces a proces s negatívnymi emisiami – prerobené podľa [52]	34
Obr. 3.2: Proces znižujúci obsah CO ₂ v atmosfére – prerobené podľa [52]	34
Obr. 4.1: Prehľad technológií s negatívnymi emisiami – prerobené podľa [1].....	38
Obr. 5.1: Porovnanie scenárov transformácie elektroenergetiky Českej republiky – prerobené podľa [71]	43
Obr. 5.2: Model ekonomie koblíhy podľa Kate Raworth – prerobené podľa [73].....	44
Obr. 5.3: Porovnanie ČR a SR podľa modelu ekonomie koblíhy – prerobené podľa [75]	45