

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav energetiky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modelová analýza kombinované technologie CCU a akumulace elektrické energie

Autor: Bc. Michal Musil

Vedoucí: prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.

Akademický rok: 2021/2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Musil** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **465511**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modelová analýza kombinované technologie CCU a akumulace elektrické energie

Název diplomové práce anglicky:

Model analysis of a combined CCU technology and electricity storage

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je analyzovat technologický řetězec CCU technologie a akumulace elektřiny, která bude mít na vstupu obnovitelné zdroje elektrické energie (solární, větrná), která bude využita v elektrolýze pro výrobu H₂ a O₂. Kyslík bude využit v systému oxyfuel spalování biomasy, které bude produkovat čistý CO₂. Ten bude následně s využitím vodíku konvertován na náhradní zemní plyn (SNG). Analýza bude provedena z hlediska látkové a energetické bilance, a budou analyzovány možné způsoby provozu této technologie s ohledem na preferenci zvolených vstupů a výstupů. Práce bude obsahovat tyto body:

- 1) Literární rešerše, zaměřená na získání informací týkajících se jednotlivých technologických prvků a procesů celého řetězce
- 2) Sestavení technologického schématu procesu, vytvoření dílčích modelů a následně modelu celého technologického řetězce v programu Aspen+
- 3) Využití modelu pro analýzu různých scénářů možného provozu technologie, sestavení látkových a energetických bilancí v jednotlivých scénářích
- 4) Diskuse výsledků u jednotlivých scénářů a jejich rozbor, provedení jednoduché citlivostní analýzy

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D. ústav energetiky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora: Bc. Michal Musil

Název práce: Modelová analýza kombinované technologie CCU a akumulace elektrické energie

Anglický název: Model analysis of a combined CCU technology and electricity storage

Akademický rok: 2021/2022

Studijní program: Energetika a procesní inženýrství

Obor studia: Energetika

Ústav: Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran: 69

počet obrázků: 45

počet tabulek: 13

počet rovnic: 25

Klíčová slova: fotovoltaika, větrná energie, elektrolýza, oxyfuel, biomasa, CCU, metanizace, SNG, Aspen Plus

Key words: photovoltaics, wind power, electrolysis, oxyfuel, biomass, CCU, methanation, SNG, Aspen Plus

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou akumulace elektrické energie produkované obnovitelnými zdroji do syntetického zemního plynu. Pomocí elektrolytického rozkladu vody a následné syntézy vodíku s oxidem uhličitým vzniká v Sabatierově reakci methan. Kyslík z elektrolyzy je využíván v oxyfuel fluidním kotli, kde spalováním dřevních pelet vznikají spaliny bohaté na oxid uhličitý, který je po vyčištění použit pro metanizaci. V teoretické části jsou popsány všechny použité technologie a v modelové části je sestaven model technologie v programu Aspen Plus a jsou provedeny simulace různých provozních scénářů provozu systému. Ze simulací byly získány měřené parametry z oblastí látkových a energetických bilancí a vodního hospodářství a na základě těchto výstupů byla provedena citlivostní analýza sledující reakce systému na změny vstupů. Součástí modelové části je také výpočet dimenzování napájecích obnovitelných zdrojů.

Abstract

This work deals with the issue of accumulation of electricity, produced by renewable sources, into synthetic natural gas. Through the electrolytic decomposition of water and the subsequent synthesis of hydrogen with carbon dioxide, methane is formed in the Sabatier reaction. Oxygen from electrolysis is used in an oxyfuel fluidized bed boiler, where the combustion of wood pellets creates a stream of carbon dioxide rich flue gas which is after relevant treatment used for methanation. The theoretical part describes all the technologies used and in the model part the technology is compiled in the Aspen Plus program and simulations of various operating scenarios of the system operations are performed. Measured parameters from the areas of material and energy balances and water management were obtained from the simulations, and on the basis of these outputs, a sensitivity analysis was performed to monitor the system's response to changes in inputs. Part of the model part is also the calculation of the sizing of renewable power supplies.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Modelová analýza kombinované technologie CCU a akumulace elektrické energie“ vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Ing. Jana Hrdličky, Ph.D., a použil jsem podklady uvedené v seznamu zdrojů a poznatky z konzultací s vedoucím práce.

V Praze dne 3. 6. 2022

.....

Bc. Michal Musil

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce, panu prof. Ing. Janu Hrdličkovi Ph.D., za jeho rady a připomínky při vypracovávání této práce a také za jeho trpělivost a pečlivost, se kterou vedl naše konzultace.

Nejvíce, bych chtěl poděkovat mé rodině a příbuzným za podporu během celého, mého studia.

Obsah:

Seznam použitých jednotek a veličin	1
Seznam zkratk a značek:.....	2
Seznam rovnic:	3
Seznam obrázků:	3
Seznam tabulek:	4
1 Úvod:.....	5
1.2 Definice problematiky a cíle diplomové práce.....	7
2 Obnovitelné zdroje energie.....	8
2.1 Definice OZE – obnovitelných zdrojů energie.....	8
2.2 Variabilita výroby OZE.....	9
2.3 Fotovoltaické technologie	12
2.3.1 Vlastnosti a dosahované parametry	12
2.3.2 Fyzikální princip funkce a integrace do elektrické sítě	14
2.4 Větrné systémy	17
2.4.1 Větrné technologie.....	17
2.4.2 Betzovo kritérium a dosahované parametry	18
2.5 Akumulace elektrické energie	21
2.6 Biomasa	23
2.6.1 Definice a dělení biomasy	23
2.6.2 Dřevní pelety – parametry	24
2.6.3 Spalování biomasy.....	24
3 Technologie výroby vodíku.....	25
3.1 Elektrolýza vody.....	25
3.1.1 Používané technologie a jejich parametry	25
3.1.2 Alkalická elektrolýza.....	26
3.1.3 PEM elektrolýza	27
3.1.4 SOC elektrolýza.....	27
4 Oxyfuel spalování a technologie zachytu CO ₂	28
4.1 Oxyfuel spalování.....	28
4.2 Zachycování a využití oxidu uhličitého (CCU) a čištění CO ₂	31
4.2.1 Zachycování CO ₂	31
4.2.2 Čištění spalin a CO ₂	32
5 Technologie P2G.....	33
5.1 Metanizace – Sabatierova reakce, výroba SNG	33
5.1.1 Katalyzátory	34
5.1.2 Faktory ovlivňující průběh metanizace [47].....	35

6	Návrh modelové technologie.....	36
6.1	Program Aspen Plus V10	36
6.2	Technologické jednotky použité pro simulaci.....	37
6.3	Vstupní, okrajové a zvolené parametry a technologie.....	40
6.4	Technologické schéma procesu a celky vytvořené pro simulaci.....	41
6.4.1	Elektrolyzér	42
6.4.2	Dimenzování elektrolyzéro	43
6.4.3	Oxyfuel.....	44
6.4.4	Parní cyklus	46
6.4.5	FGR + SCR	47
6.4.6	Dochlazení spalin a separace vody.....	48
6.4.7	Kryogenní separace	49
6.4.8	Metanizace.....	51
7	Simulace modelových scénářů	52
7.1	Úvod k simulacím scénářů	52
7.2	Modelové scénáře	54
7.3	Diskuse a rozbor výsledků scénářů	55
7.3.1	Látkově - energetické bilance systému.....	55
7.3.2	Dimenzování napájecích obnovitelných zdrojů systému	59
7.4	Citlivostní analýzy.....	62
8	Závěr.....	66
9	Bibliografie.....	67

Seznam použitých jednotek a veličin

Veličina:	Značka:	Jednotka:
Roční výkonová kapacita fotovoltaiky	C_{FV_y}	MWh
Roční výkonová kapacita systému	C_{s_y}	MWh
Koef. využití fotovoltaické energie	k_{FV}	-
Reálná roční výkonová kapacita FV	C_{FV_real}	MWh
Reálný instalovaný výkon FV	P_{FV_real}	MWp
Roční výkonová kapacita VE	C_{VE_y}	MWh
Koef. využití větrné energie	k_{VE}	-
Rychlost větru pro reálný výkon VE	v_{1_real}	m/s
Rychlost větru pro nominální výkon VE	v_{1_nom}	m/s
Reálný maximální výkon větrné elektrárny	P_{VE_real}	MW
Korigovaný výkon větrné elektrárny	P_{VE_kor}	MW
Počet větrných turbín	N_{VE}	-
Nominální výkon 1 větrné turbíny	P_{1VE_nom}	MW
Plocha fotovoltaické elektrárny	S_{FVE}	m ²
Výkon 1 fotovoltaického panelu	P_{1FVP}	Wp
Plocha 1 fotovoltaického panelu	S_{1FVP}	m ²
Reálná teplota spalin	t_{spal}	°C
Adiabatická teplota plamene	T_{ad}	°C
Součinitel průběhu teplot v ohništi	M	-
Stupeň černosti ohniště	a_0	-
Boltzmanovo číslo	B_0	-
Akumulační příkon	P_{aku}	MW
Příkon elektrolyzéro	P_{PEM}	MW
Příkon kompresorů a čerpadel	P_{komp}	MW
Příkon ohřevu	$P_{ohřev}$	MW
Výkon parního cyklu	P_{PC}	MW
Vyroběný SNG na akumulovanou MWh	m_{SNG_aku}	kg _{SNG} /MWh _{aku}
Výroba SNG	Q_{SNG}	kg _{SNG} /h

Veličina:	Značka:	Jednotka:
Účinnost akumulace	η_{aku}	-
Výhřevnost SNG	Q_{i_SNG}	MJ/kg
Celkový příkon systému	P_{C_syst}	MW
Účinnost elektrolýzy	η_{ELY}	-
Získaná chemická energie	$E_{Z.chem}$	J
Dodaná elektrická energie	$E_{EL.dod}$	J
Přebytek spalovacího vzduchu	α	-
Reálný objemový tok kyslíku	$\dot{V}_{O_2,Real}$	m ³ /h
Obj. tok kyslíku v recirkulovaných spal.	$\dot{V}_{RS,O_2,Real}$	m ³ /h
Obj. tok kyslíku pro stechiom. Spalování	$\dot{V}_{O_2,Stech.}$	m ³ /h
Obj. tok recirkulovaných spalin	\dot{V}_{spal_FGR}	m ³ /h
Obj. tok výstupních spalin	$\dot{V}_{spal_výst}$	m ³ /h
Energie pro akumulaci 1kg SNG	E_{SNG_aku}	kWh
Energie uložena v 1kg SNG	E_{SNG}	kWh

Seznam zkratk a značek:

CCU – Carbon Capture and Utilization – Zachycení a využití oxidu uhličitého

CCS – Carbon Capture and Storage – Zachycení a uložení oxidu uhličitého

CCUS - Carbon Capture Utilization and Storage – Zachycení, využití a uložení oxidu uhličitého

OZE – Obnovitelné zdroje energie

SNG – Synthetic (Substitute) Natural Gas – Umělý (Náhradní) zemní plyn

TZL – Tuhé znečišťující látky

FV – Fotovoltaika

NCG – Nekondenzovatelné plyny

VE – Větrná elektrárna

OF – Oxyfuel

SCR – Selektivní katalytická redukce

PEM – Polymerní elektrolytická membrána

SOC – Solid Oxide Cell – Článek s elektrolytem z pevného oxidu

P2G – Power to gas – Konverze energie do plynného paliva

Seznam rovnic:

Rovnice 1 – Výpočet roční výkonové kapacity FV (1).....	16
Rovnice 2 – Kapacitní rezerva FV systému (2).....	16
Rovnice 3 – Výpočet výkonu FV systému (3).....	16
Rovnice 4 - Výpočet plochy FV panelů. (4).....	17
Rovnice 5 – Výpočet roční výkonové kapacity VE (5).....	21
Rovnice 6 – Výpočet výkonu VE systému (6).....	21
Rovnice 7 - Korekce výkonu při rozdílné rychlosti větru než pro nominální výkon. (7).....	21
Rovnice 8 - Zisk počtu větrných turbín dle požadovaného příkonu (8).....	21
Rovnice 9 - Chemické rovnice reakcí na elektrodách. (9).....	25
Rovnice 10 - Účinnost elektrolýzy. (10).....	26
Rovnice 11 - Výpočet přebytku spalovacího vzduchu. (11).....	30
Rovnice 12 - Výpočet minimálního množství spalovacího kyslíku. (12).....	30
Rovnice 13 - Výpočty reálného množství spalovacího kyslíku. (13).....	30
Rovnice 14 - Recirkulační poměr FGR. (14).....	31
Rovnice 15 - Chemické bilance SCR DeNO _x technologie. (15).....	32
Rovnice 16 - Metanizace z CO ₂ . (16).....	34
Rovnice 17 - Rovnice energetické bilance elektrolýzy vody. (18).....	43
Rovnice 18 - Reakce probíhající při spalování. [55] (18).....	45
Rovnice 19 - Výpočet reálné teploty spalin. (19).....	46
Rovnice 20 - Výpočet akumulčního příkonu. (20).....	53
Rovnice 21 - Výpočet množství vyrobeného paliva z MWh energie. (21).....	53
Rovnice 22 - Výpočet účinnosti systému (22).....	53
Rovnice 23 - Výpočet poměrného, výkonového zastoupení FV/VE. (23).....	60
Rovnice 24 - Výpočet energie pro zisk 1 kg SNG pro scénář 5. (24).....	63
Rovnice 25 – Teoreticky zpětně dosažitelná energie využitím 1 kg SNG. (25).....	63

Seznam obrázků:

Obr. 1 - Vývoj instalovaného výkonu FV [8].....	10
Obr. 2 - Výroba elektřiny z FV [8].....	10
Obr. 3 - Vývoj instalovaného výkonu VE [8].....	11
Obr. 4 - Výroba elektřiny z VE [8].....	11
Obr. 5 – Vizualizace řezu FV panelu a jeho základních vrstev. [13].....	14
Obr. 6 Vlevo – Mapa trvání slunečního svitu (h/rok). Vpravo – Roční úhrn slunečního záření kWh/m ² . [14].....	15
Obr. 7 - Průměrný měsíční osvit - lokalita Znojmo. [15].....	16
Obr. 8 – Znázornění proudění větru před a za rotorem větrné turbíny. [21].....	18
Obr. 9 Mapa průměrné rychlosti větru 100m nad zemí. [22].....	19
Obr. 10 - Roční chod průměrné rychlosti větru na stanici Moravské Budějovice v období 1961 – 2021. [24].....	20
Obr. 11 - Kapacita různých druhů akumulčních systémů. [26].....	22
Obr. 12 – Porovnání jednotlivých technologií elektrolýzy vody. [32].....	26
Obr. 13 – Zjednodušený popis spalovací větve modelové technologie s použitím oxyfuel spalování. [36].....	29
Obr. 14 – Znázornění metanizačního reaktoru. [49].....	34
Obr. 15- Průběh katalytické reakce. [50].....	35
Obr. 16 - Kompresor Obr. 17 - Ohříváč / Chladič Obr. 18- Rozdělovač.....	37
Obr. 19 – Směšovač Obr. 20 - Flash separátor Obr. 21 - Prvkový separátor.....	37
Obr. 22 - Výměník tepla.....	38

Obr. 23 - Stechiometrický reaktor.....	38
Obr. 24 - Vlevo: Nestechiometrický reaktor; Vpravo: Rigorózní reaktor.....	38
Obr. 25 - Čerpadlo Obr. 26 - Vlevo: Expandér / Turbína; Vpravo: Expandér / Expanzní ventil....	38
Obr. 27 - Přehledové schéma procesu.....	41
Obr. 28 - Simulační schéma PEM elektrolyzérovy vody.....	42
Obr. 29 - Simulační schéma zpracování a oxyfuel spalování biomasy.....	44
Obr. 30 - Simulační schéma parního okruhu pro využití tepla spalin.....	46
Obr. 31 - Simulační schéma FGR ventilu a vstupu do SCR technologie.....	47
Obr. 32 - Simulační schéma separace vody ze spalin.....	48
Obr. 33 - Simulační schéma Linde-Hampson metody zkapalňování plynů.....	49
Obr. 34 - Simulační schéma metanizace a separace produktů.....	51
Obr. 35 - Analýza scénářů z hlediska látkových bilancí.....	57
Obr. 36 - Analýza scénářů z hlediska energetických bilancí.....	57
Obr. 37 - Akumulační bilance s účinnostmi.....	58
Obr. 38 - Analýza scénářů z hlediska vodního hospodářství.....	58
Obr. 39 - Shrnutí dimenzování napájecího bloku.....	60
Obr. 40 - Celková roční výrobní bilance.....	61
Obr. 41 - Vliv výkonu elektrolyzérovy na palivové toky.....	62
Obr. 42 - Vliv výkonu elektrolyzérovy na příkon a výkon systému.....	63
Obr. 43 - Vliv výroby vodíku na produkci SNG a spotřebu systému.....	64
Obr. 44 - Vliv obsahu dusíku v palivu na emisích NO _x vztažených na suché spalin.....	64
Obr. 45 - Vliv recirkulačního poměru na spalovací podmínky.....	65

Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Obecné složení biomasy. [28].....	29
Tabulka 2 - Formát zadání složení biomasy v Aspen Plus včetně základních použitých hodnot. [28].	30
Tabulka 3 - Vlastnosti a funkce použitých jednotek simulace.....	39
Tabulka 4 - Vstupní, okrajové a zvolené parametry.....	40
Tabulka 5 - Základní parametry bloku elektrolyzérovy.....	42
Tabulka 6 - Základní parametry oxyfuel bloku.....	45
Tabulka 7 - Základní parametry parního RC cyklu, využití tepla spalin a chladícího okruhu.....	46
Tabulka 8 - Základní parametry bloku FGR + SCR.....	47
Tabulka 9 - Parametry bloku dochlazení spalin a separace vody.....	49
Tabulka 10 - Vybrané parametry kryogenní separace.....	50
Tabulka 11 - Parametry bloku metanizace.....	51
Tabulka 12 - Vstupní parametry pro modelové scénáře.....	54
Tabulka 13 - Výpis vybraných parametrů modelových scénářů.....	56

1 Úvod:

V současném energetickém mixu dominují technologie spalování fosilních paliv, které jsou dnes vnímány jako silně znečišťující z hlediska emisí CO₂, oxidů síry a dusíku spolu s velkou škálou dalších znečišťujících složek podle typu spalovaného paliva. Jako nejdůležitější složka emisí, které se věnuje velká pozornost, je momentálně CO₂, jež má potenciál ovlivňovat průměrnou teplotu planety a tím negativně ovlivňovat kvalitu životního prostředí (pozn. průměrná teplota Země je velmi obtížně měřitelná a zde je tím myšleno obecné, oblastní oteplení oproti referenční teplotě). Oxid uhličitý je totiž jedním z hlavních skleníkových plynů, který svojí zvyšující koncentrací v ovzduší přispívá k intenzifikaci změny klimatu na Zemi a ke zvyšování průměrné teploty. Celkový vliv CO₂ není tak dramatický jako se dnes běžně tvrdí, ale v současné době je to skleníkový plyn, jehož omezení či eliminace emisí do atmosféry nejsou na takové technologické úrovni jako například u zařízení pro snižování emisí NO_x a SO_x a z toho důvodu je nutné se mu věnovat. [1]

S příchodem evropské zelené dohody se objevilo několik trendů pro formování budoucí energetiky se silným zaměřením na čistotu energetických zdrojů z hlediska používaných paliv a vypouštěných emisí s celkovou změnou zastoupení jednotlivých druhů zdrojů v energetickém mixu. Těmi hlavními, které mají přímo změnit celkovou strukturu energetického mixu, jsou snižování čistých emisí skleníkových plynů do roku 2030 alespoň o 55 % oproti roku 1990, zvané jako dekarbonizace. Pojem dekarbonizace v sobě tedy zahrnuje obecné snižování emisí uhlíku do atmosféry, zejména tedy oxidu uhličitého, přechodem na obnovitelné zdroje, (konkrétně tedy na solární a větrnou energii), rušení stávajících uhelných zařízení a jejich přestavba na plynové zdroje, podpora plynu a jaderné energie jako částečně udržitelných zdrojů a postupná změna paliv, která se používají pro spalování ve fosilních zdrojích, a jejich spalování s ekologickými či nízkoemisními palivy jako je například vodík s vidinou jejich kompletního nahrazení. [2]

Intenzifikace výstavby a využívání obnovitelných zdrojů energie a postupný nástup zeleného vodíku jako nejprve minoritní a později majoritní složku průmyslově využívaných plyných paliv je nutná pro získání uhlíkově neutrálního paliva. Tento trend má tedy potenciál dále podpořit intenzifikaci výstavby OZE a podpořit výzkum a vývoj. [2]

Je spíše nepravděpodobné, že budoucí požadavky světa po energii povedou cestou snížení spotřeby, jelikož obnova energetiky podle Green Dealu bude finančně a energeticky velmi náročná, a postupným navyšováním příkonu zejména solárních a větrných zdrojů do sítě bude nutné jejich nepravidelné výkonové charakteristiky vykrývat. Pokud bychom ovšem všechny tyto technologie velmi rychle implementovali, což je nespornou výhodou například obnovitelných zdrojů, bylo by nutné stejně rychle řešit i jejich nevýhody. Hlavní všeobecně známou nevýhodou obnovitelných zdrojů je jejich výkonová nestabilita a omezená možnost regulace. [2]

Řešení nestabilního výstupu z obnovitelných zdrojů jsou zpravidla dvě. První je zálohování obnovitelných zdrojů stejnou kapacitou stabilních, fosilních zdrojů, což je v současné době velmi negativně vnímáno a je to jeden z hlavních argumentů proti instalaci velkých obnovitelných farem, protože se na jejich výkon není možné vždy spolehnout. Druhý pohled na věc je místo použití konvenčních akumulčních technologií, tedy akumulátorů, ukládat elektrickou energii do formy paliv, tzv. Power-To-Gas (P2G) tedy ukládání elektrické energie do plyných paliv a Power-To-Liquid (P2L) do kapalných paliv. Tímto je myšleno, že v případě nadbytečného výkonu stacionárních zdrojů je elektrická energie vložena do syntézních procesů za účelem výroby syntetických plyných nebo kapalných paliv, která mohou být konvenčně uložena a následně použita podle potřeby. V případě potřeby elektrické energie je palivo spáleno v plynové turbíně nebo v kogenerační jednotce. Stejným způsobem může být palivo použito ke krytí potřeb tepla nebo transportováno pozemní dopravou či stávajícími rozvodnými soustavami a využito na jiném místě, než bylo vyrobeno. [3]

Diplomová práce se proto zabývá technologickým řetězcem, který se v jeho konfiguraci v průmyslu nevyskytuje, a kombinuje několik z výše zmíněných trendů. Reálná řešení tohoto systému jsou prozatím v různých fázích prototypů a testovacích zařízení, která nejsou na průmyslové úrovni využitelná. Koncept práce modelové kombinované CCU technologie s akumulací elektrické energie tedy pracuje s těmito prvky:

- Využití pouze obnovitelných zdrojů jako jediných napájecích / zdrojových technologií.
- Výroba zeleného vodíku elektrolýzou napájenou obnovitelnými zdroji a jeho využití.
- Nízkoemisní oxyfuel spalování uhlíkově neutrálního paliva (biomasy), které ke spalovacímu procesu využívá kyslík jako vedlejší produkt výroby vodíku.

- Zachytávání, čištění a separace oxidu uhličitého ze spalin.
- Využití zachyceného CO₂ s vyrobeným vodíkem pro syntézu umělého uhlíkově neutrálního, zemního plynu (SNG).
- Akumulace elektrické energie do plyného paliva (Power To Gas – P2G).

Je nutné zmínit, že tato technologie se nezabývá problematikou snižování emisí CO₂, neboť v ideálním případě by při úplném využití CO₂ z oxyfuel spalování nemělo docházet k žádným emisím CO₂ do ovzduší. Zařízení ovšem bude pracovat v provozních režimech, které neumožní 100% využití zachyceného CO₂, což se projeví na vzniku emisí CO₂. Důvodem je nepoměrná produkce vodíku z elektrolýzy a emisí CO₂ z oxyfuel spalování. Jako sekundární způsob nakládání s emisemi CO₂ by mohla být navazující technologie, kde se nevyužitý oxid uhličitý z CCU uloží do dlouhodobých úložišť, a jednalo by se tak o kombinovanou CCUS technologii. Celkový princip této technologie je akumulace energie získané z obnovitelných zdrojů (bez nutnosti vykrytí jejich kapacity fosilními zdroji) do umělého, uhlíkově neutrálního, zemního plynu.

1.2 Definice problematiky a cíle diplomové práce

Pro tuto práci bylo zadáno několik vstupních parametrů, které konkretizují použití vstupních zařízení sloužících jako zdroj energie z obnovitelných zdrojů pro systém. Těmito systémy jsou fotovoltaika a větrné systémy a pro jejich použití k výrobě elektrické energie byla stanovena vedoucím práce jako oblast instalace Česká republika. Volba vhodné oblasti instalace zjednodušenou metodou bude také součástí následující rešerše. Pro oxyfuel spalovací systém byla zvolena biomasa jako uhlíkově neutrální palivo.

Tento systém, jak již bylo zmíněno, není v praxi aplikovaný, proto je charakter této práce spíše teoretický a není možné se odkázat na existující zařízení tohoto typu v průmyslu a dostupnost reálných provozních parametrů z existujících zařízení je velmi omezená. Existují podobná experimentální zařízení obdobného typu, které ale převážně pracují s jiným typem syntézy SNG nikoliv za použití CO₂, ale CO. [4]

Cílem této první části diplomové práce je vytvoření přehledu typů technologií použitých v technologickém řetězci formou literární rešerše. Popsání jejich principu funkce, vlastností, existujících variant a dosahovaných provozních parametrů.

V druhé části bude proveden rozbor zvolených technologií pro modelový systém, sestaveno přehledové technologické schéma systému a následně vytvoření dílčích modelů a celého modelu technologického řetězce v programu Aspen Plus. Vytvořený model bude použit pro simulaci několika scénářů možného provozu technologie a sestavení látkových a energetických bilancí v jednotlivých scénářích.

V poslední části jsou diskutovány výsledky scénářů a je proveden jejich rozbor a výběr nejvhodnější varianty. Na zvolené variantě bude následně formou jednoduché citlivostní analýzy prezentováno chování systému v závislosti na proměnných podmínkách provozu.

2 Obnovitelné zdroje energie

2.1 Definice OZE – obnovitelných zdrojů energie

Obnovitelný zdroj energie je označení některých vybraných na Zemi přístupných forem energie získané především z jaderných přeměn ve Slunci. Dalšími zdroji jsou teplo zemského nitra a setrvačnost soustavy Země – Měsíc. Tyto zdroje jsou čerpány ve formách např.: slunečního záření, větrné energie, vodní energie, přílivové energie, geotermální energie, biomasy a dalších méně významných zdrojů. Obnovitelné zdroje energie pro energetické využití jsou:

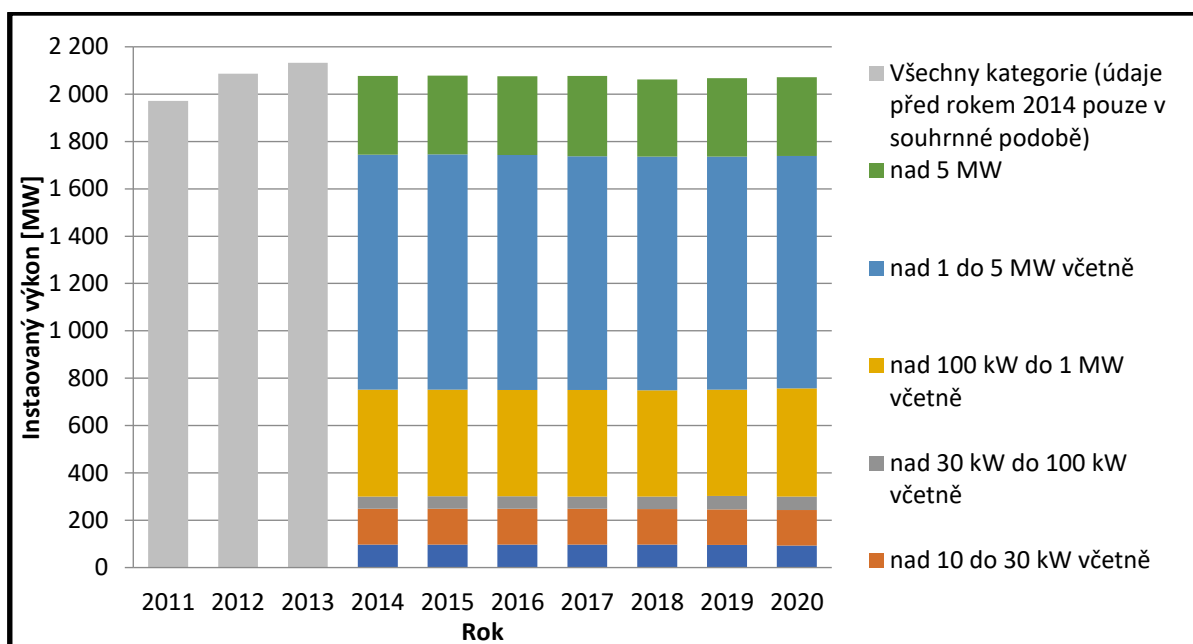
- Solární energie – využitelná ve výrobě elektrické energie fotovoltaickými panely, dále k ohřevu ve fototermických panelech či koncentračních solárních věžích.
- Větrná energie – využitelná větrnými turbínami k výrobě pouze elektrické energie s možností on-shore i off-shore instalací.
- Vodní energie – využívána pro výrobu elektrické energie na přehradách nebo přečerpávacích elektrárnách, které slouží zároveň k balancování výkonu.
- Biomasa – využitelná jako palivo pro krytí tepelných potřeb spalováním a jako palivo pro kotle či kogenerační jednotky pro současnou výrobu elektřiny a tepla.
- Bioplyn – využitelná jako palivo pro plynové motory a turbíny pro výrobu elektřiny a tepla.
- Geotermální energie – získávaná primárně kvůli nízkopotenciálovému teplu, ale při použití vhodné technologie a vzhledem k nízkým teplotám a vysokým vlhkostem, je teoreticky možné instalovat na geotermální zdroj malý zdroj pro výrobu elektrické

energie. V ojedinělých případech je možný i přímý zisk téměř syté až přehřáté páry přímo z podzemního zdroje. Limitující je ovšem geologické složení podloží a geografické umístění na Zemi. [5]

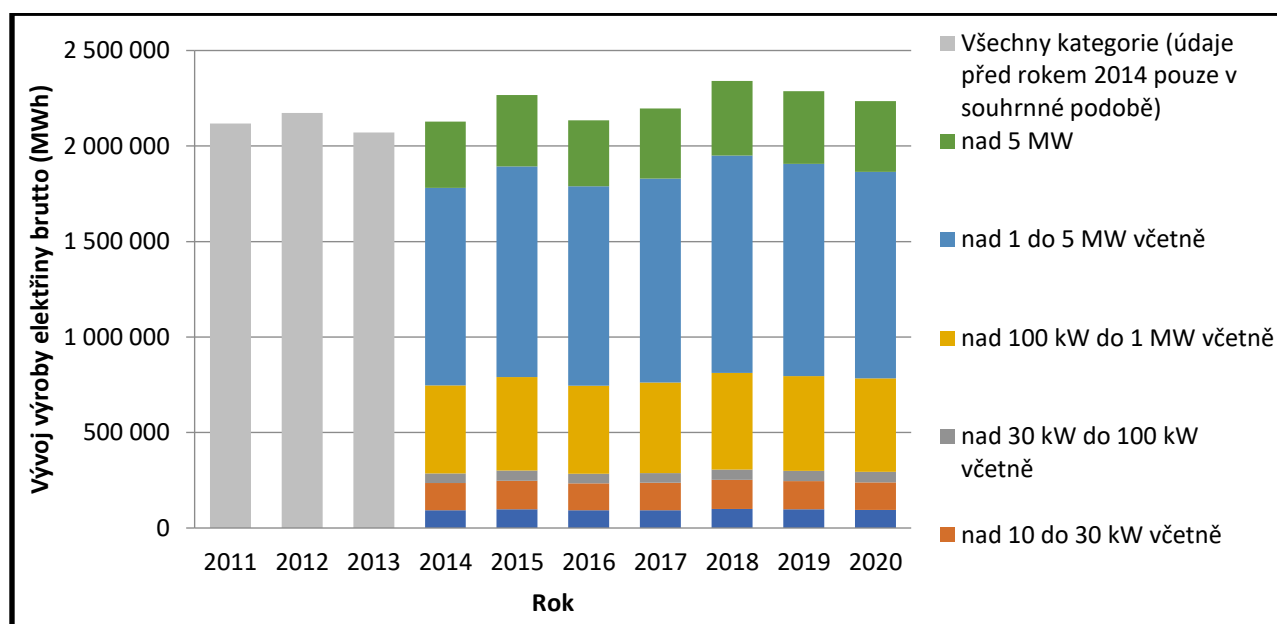
V ČR se definují OZE podle zákona o životním prostředí č.17/1992 Sb.: „Jako obnovitelné přírodní zdroje, které mají schopnost se při postupném spotřebovávání částečně nebo úplně obnovovat, a to samy nebo za přispění člověka.“ [6]

2.2 Variabilita výroby OZE

Obnovitelné zdroje zadané pro tuto práci jsou specifické svou variabilitou výroby v rámci denního cyklu, neboť se řídí atmosférickými vlivy, které se během dne průběžně mění. Jednou z variant stabilních OZE je ovšem vodní energetika, která není uvedena ve výčtu technologií pro použití v této práci. Důvod neuvažování jejího zapojení do zásobování technologie je, že pro potřebný příkon tohoto systému by bylo za potřebí použití vodního zdroje střední velikosti, tedy do 100 MW nebo více menších zdrojů s výkonem do 10MW. Výstavba zdrojů je v ČR, konkrétně ve zvolené lokalitě, již vyčerpána a přečerpávací zdroje se k tomuto způsobu napájení nehodí, protože je jejich charakteristika výkonu pulzního charakteru, který poskytuje výkon maximálně v řádu hodin. Níže na obrázku 1 je uvedeno porovnání instalovaného výkonu fotovoltaických zdrojů podle jednotlivých výkonových skupin a na obrázku 2 celková vyrobená elektrická energie z těchto zdrojů. Z dat o instalovaném výkonu FV zdrojů je patrné, že výstavba velkých zdrojů stagnuje a hlavní výstavba se soustřeďuje do mikrozdrojů do 10 kWp, jejichž příspěvek do celkového instalovaného výkonu není téměř znatelný. S tím souvisí i neměnný poměrný roční výkon, který je v tomto případě závislý pouze na ročním osvitu, což je patrné na obrázku 2. [7]

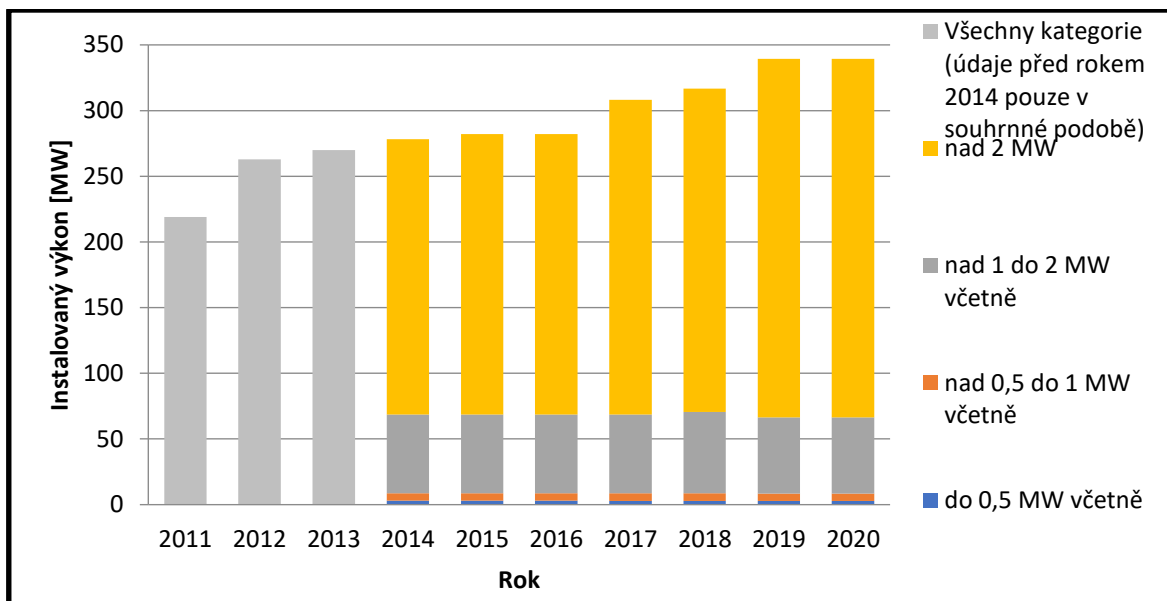


Obr. 1 - Vývoj instalovaného výkonu FV [8]

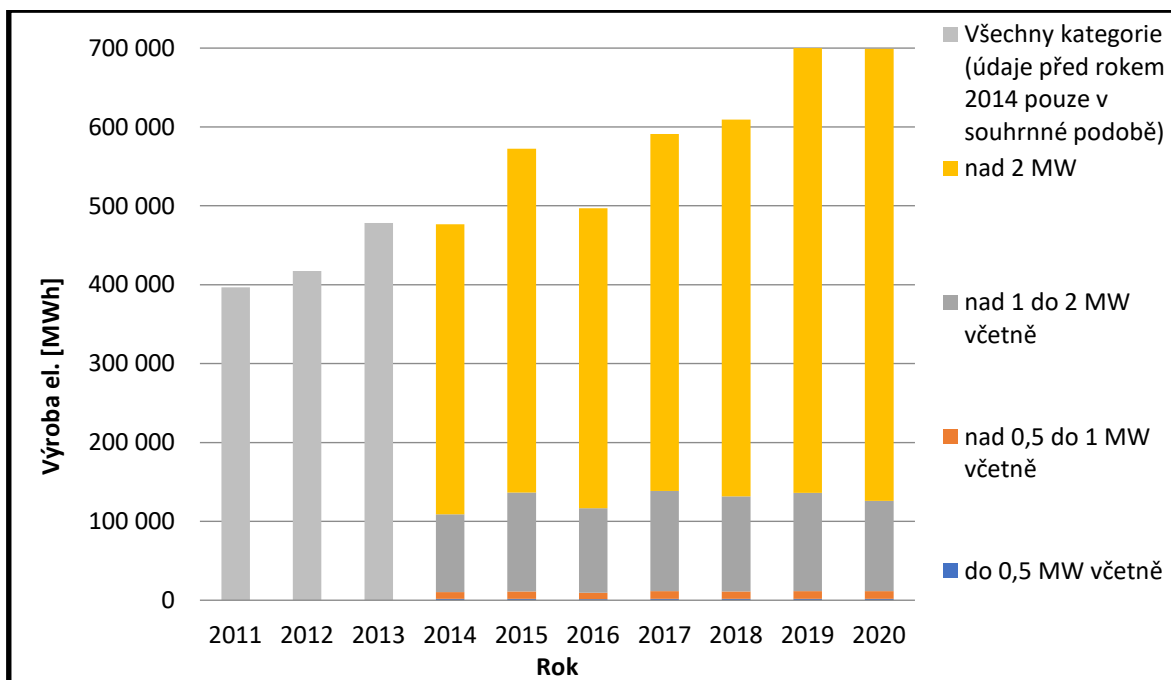


Obr. 2 - Výroba elektřiny z FV [8]

Pro větrné zdroje je na obrázku 3 patrný trend výstavby ve dvouletých intervalech a vzhledem k pořizovacím nákladům a komplikovanější výstavbě je přírůstek instalovaného výkonu mnohem menší než u FV zdrojů. Zároveň je na obrázku 4 vidět, že nejvýkonnější jednotky o výkonu 2 MW (a vyšší) zastupují největší část celého výkonového spektra. Tyto vysokovýkonné jednotky jsou ty, které jsou předmětem nových výstaveb větrných zdrojů. Z trendu výkonu je patrné, že sleduje množství vystavených nejvýkonnějších zdrojů a že instalovaný výkon na technologickou jednotku je pro větrné zdroje výrazně větší než u FV. [7]



Obr. 3 - Vývoj instalovaného výkonu VE [8]



Obr. 4 - Výroba elektřiny z VE [8]

2.3 Fotovoltaické technologie

Vývoj fotovoltaiky je natolik rozvinutý, že popsat všechny současné trendy v této oblasti je velmi obtížné a není to hlavní součástí této práce. Obsahem bude pouze zjednodušený popis problematiky fotovoltaických zdrojů a uvedení základních porovnání hlavních typů mezi sebou. Pro porovnání jednotlivých fotovoltaických technologií je nutné stanovit kritéria srovnávání, těmi jsou: použité materiály pro FV buňky, účinnost panelů, výkonová degradace závislá na čase provozu, rozměry, mechanické vlastnosti a cena. Pro budoucí implementaci FV do modelové části práce budou důležité hlavně výkonové parametry. Pro obecný přehled se fotovoltaické panely dělí podle těchto níže uvedených parametrů:

- Materiálová struktura – monokrystalické, polykrystalické, amorfní, nekřemíkové polymerní, MIS (Metal – insulator – semiconductor), články z PN sloučenin, organické.
- Počet vrstev – jednovrstevné, tenkovrstvé, vícevrstvé, oboustranné, atp.
- Podle fyzických vlastností – pevné panely, flexibilní, natáčivé, atp. [9]

2.3.1 Vlastnosti a dosahované parametry

Fotovoltaické panely se skládají z jednotlivých malých panelů neboli buněk, které se odlišují různými přístupy při jejich výrobě. Tyto buňky jsou mezi sebou vzájemně propojeny a toto propojení formuje fotovoltaický panel. Každá jednotlivá buňka má standardní napětí 0,5 V a spolu s jejím vnitřním odporem je definován procházející proud podle Ohmova zákona. Výsledné parametry panelu tedy určuje propojení jednotlivých buněk v individuálních konfiguracích sériově - paralelního zapojení. Při zapojení do série se zvyšuje napětí při zachování stejného procházejícího proudu a při zapojení paralelním se zvyšuje průchozí proud za stejného napětí. Podle ceny a oblasti využití se odlišuje i propojení jednotlivých buněk mezi sebou. Čistě sériové zapojení není smysluplné, neboť by při potenciálním poškození první buňky v sérii došlo k přerušení celého obvodu. Z toho důvodu je nutné kombinovat sériové a paralelní zapojení k získání požadovaného napětí a proudu. Jako další metoda je použití speciálních diod, které umožňují bypass nefunkční buňky se zachováním minimálních výkonových ztrát. Tato elektrotechnická řešení vnášejí mírné ztráty do systému, ale poskytují větší spolehlivost. Celková nižší účinnost fotovoltaiky je ale způsobena kombinací vícero vlivů, nejen materiálových. [10]

Hlavní limity fotovoltaických systémů jsou:

- Neschopnost využití celého spektra dopadajícího záření.
- Neustále se pohybující zdroj světla mimo ideální úhel dopadu.
- Rozdílný úhel osvětlení v rámci roku.
- Rozdílná intenzita světla podle lokality.
- Citlivost na teplotu FV panelu.
- Citlivost na teplotu a rychlost proudění okolního vzduchu.
- Průchod světla, který se může týkat velmi tenkých panelů pro speciální instalace.
- Odraz světla od panelu nebo okolí. To může být částečně řešeno oboustrannými panely, které mají fotoelektricky aktivní obě plochy a umožňují využívání disperzního a odraženého světla z okolí.
- Vliv materiálových vad na celkovou účinnost systému. [11]

Obecně hlavními činiteli ztrát jsou odraz světla od vrchní vrstvy panelu a zahřívání panelu dopadajícím zářením. Každý typ panelu má optimální teplotní rozsah fungování závislý na okolní teplotě a teplotě samotného panelu. Další z faktorů jako například nedokonalý dopad slunečního záření může být řešen pomocí trasujících panelů nebo možnosti aktivně měnit instalační úhel panelů na střeše. Tato technická řešení však vnášejí do celého systému faktor poruchovosti. To degraduje hlavní výhodu fotovoltaiky, kterou je prakticky bezúdržbový provoz s minimem pohyblivých částí, jež vyžadují údržbu.

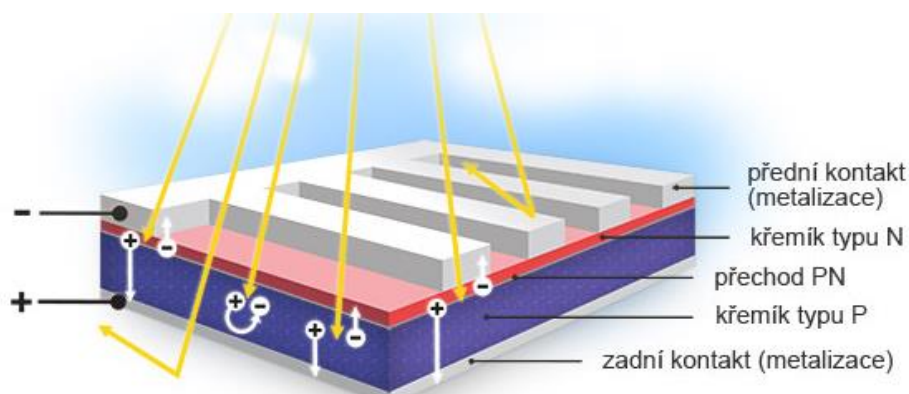
Nezávisle na použitých technologiích se dnes u běžně používaných panelů pohybuje účinnost mezi 15 – 22 %. V laboratorních podmínkách a u technologií pro speciální účely se můžeme setkat s účinnostmi až kolem 40 – 42 %. Ty jsou ale při běžném použití například na střeších nedosažitelné a jsou uplatněny převážně v experimentálních zařízeních a ve vesmírných technologiích. [10]

Ztráty určující celkovou účinnost fotovoltaického panelu se dají řadit do těchto kategorií: [12]

- Tepelné ztráty – ohřev panelu a sálání tepla z povrchu panelu
- Optické ztráty – odraz od povrchu; nečistoty nebo cizí předměty
- Elektrické ztráty – ztráty propojením článků; ohmické ztráty; ztráty na diodách, rekombinace na PN přechodech; excitační ztráty
- Enviromentální – počasí, roční období, teplota a proudění větru
- Externí – ztráty na střídači a transformátoru

2.3.2 Fyzikální princip funkce a integrace do elektrické sítě

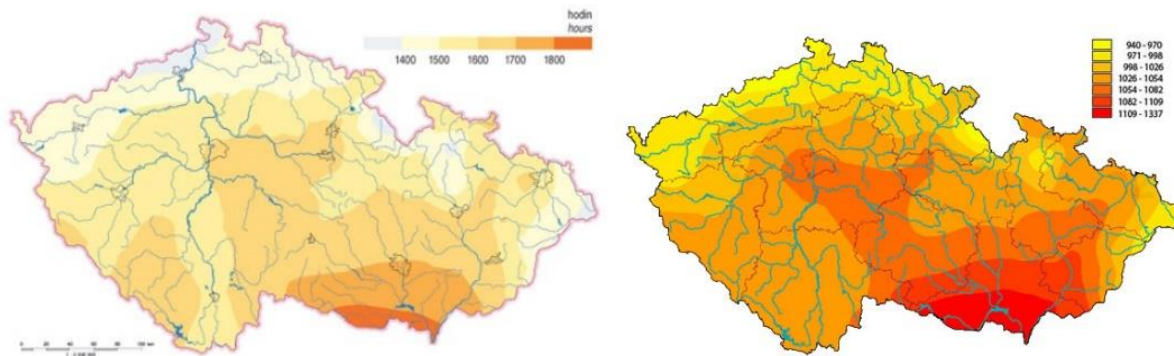
Fyzikálním principem funkce fotovoltaických panelů je fotoelektrický efekt PN polovodiče. Pro přeměnu slunečního záření na elektrickou energii je nutné vytvořit přechod PN mezi vrchní a spodní stranou panelu. Horní strana, kam dopadá záření na panel, je obvykle tenčí a silně dopovaná materiálem, který má jeden přebytečný volný elektron, tvořící N-stranu. Spodní strana je silnější a dopovaná polovodičem typu P, který má v každém atomu jeden chybějící elektron než matrice. Jejich spojením je tvořen PN přechod, kde všechny volné elektrony z N-části vyplní mezery v P-části. V PN přechodu je bráněno volným elektronům z N-části přecházet přímo do P-části a elektrony jsou nuceny proudit externím obvodem. Externí obvod je tvořen kovovými sběrnicemi kde vrchní N-sběrnice, představuje charakteristickou mřížku na buňkách panelu a dolní P-sběrnice je tvořená kovovým plechem pod P-částí. Vše výše popsané je jednoduše znázorněno na obrázku 5 níže. [10]



Obr. 5 – Vizualizace řezu FV panelu a jeho základních vrstev. [13]

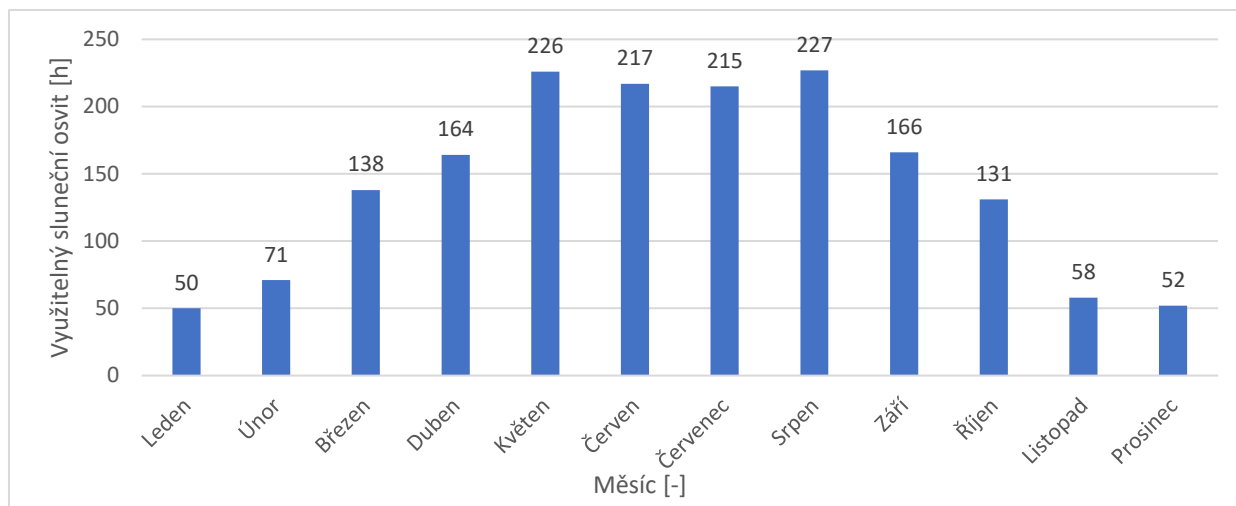
U dimenzování fotovoltaiky pro systém (ze zadání práce) je nutné počítat s denním osvětlením v průběhu roku, velikostí a výkonem větrné složky OZE zásobující systém vztažený na spotřebu elektrické energie celého systému. Hlavní příkonovou složkou bude elektrolyzátor, zbývající částí bude pro zjednodušení příkon k vykonávání kompresní práce v systému kryogenního čištění spalin a dodatečných ohřevů pro probíhající procesy například SCR technologie.

V úvodu práce bylo zmíněno zadání lokality zařízení. Pro dimenzování jak fotovoltaických tak větrných systémů je geografická poloha velmi důležitá, a proto je jí věnován závěr obou částí OZE. Pro určení možné lokality na území ČR je tedy vhodné použít mapu osvětlení, kterou reprezentují mapy na obrázku 6 níže, ze kterých lze přibližně určit, které oblasti jsou z hlediska využití fotovoltaiky ty nejvýhodnější.



Obr. 6 Vlevo – Mapa trvání slunečního svitu (h/rok). Vpravo – Roční úhrn slunečního záření kWh/m². [14]

Z obrázků výše lze usoudit, že nejvhodnější oblastí pro instalaci fotovoltaiky je Jihomoravský kraj, případně kraj Vysočina. Důležité je mít na paměti, že zásobování z OZE má i větrnou složku a bude nutno dojít k určitým kompromisům z hlediska úpravy teoretického místa instalace. Pro konkrétnější znázornění, viz. obrázek 7 níže, slouží znázornění osvětlení v lokalitě nejbližší hranici obou krajů. Nejbližší dostupné údaje osvětlení k hranici těchto dvou krajů byla lokalita Znojmo. Pro tuto lokalitu můžeme pozorovat celkem stabilní hodinový osvětlení v letních měsících s dramatickým poklesem až na čtvrtinu hodinového osvětlení v zimních měsících. Tento fakt je hlavní nevýhodou fotovoltaických systémů v porovnání s následujícími větrnými systémy, jelikož ty mají vyšší výkonové využití během roku. [7]



Obr. 7 - Průměrný měsíční osvit - lokalita Znojmo. [15]

Výpočet množství fotovoltaických panelů a jejich instalované kapacity pro technologii popsanou v modelové části práce je možný provést následujícími kroky při znalosti celkového příkonu systému akumulace. K tomu je vhodné použít statistik ERÚ [16] na obrázcích 1 a 2, ze kterých lze zjistit celkovou roční výrobu FV systémů a jejich instalovaný výkon. Z těchto dvou parametrů je možné získat koeficient ročního využití výkonu pro FV v ČR $k_{FV} = 0,114$. V tomto parametru jsou již zahrnuty všechny provozní účinnosti a není nutné je dále zjišťovat. Požadovanou roční, instalovanou kapacitu FV tedy získáme dle rovnice 1 níže. [16]

$$C_{FV,y} = \frac{C_{s,y}}{k_{FV}} [MWh]$$

Rovnice 1 – Výpočet roční výkonové kapacity FV (1)

Kapacita instalace FV musí být dimenzována s mírnou výkonovou rezervou a musí platit vztah dle rovnice 2.

$$C_{FV,real} > C_{FV,y} [MWh]$$

Rovnice 2 – Kapacitní rezerva FV systému (2)

Tato roční instalovaná, výkonová kapacita lze převést na výkon FV systému dle rovnice 3 vydělením počtem hodin v roce.

$$P_{FV,real} = \frac{C_{FV,real}}{8760} [MWp]$$

Rovnice 3 – Výpočet výkonu FV systému (3)

Celkovou plochu fotovoltaických panelů získáme na základě parametrů zvoleného panelu podle rovnice 4.

$$S_{FVE} = \frac{P_{FV_{real}}}{P_{1FVP}} \cdot S_{1FVP} [m^2]$$

Rovnice 4 - Výpočet plochy FV panelů.

(4)

Celkový výkon fotovoltaického systému je definován pomocí tzv. peakového výkonu, tedy výkonu panelů při ideálním dopadu a intenzitě záření v laboratorních podmínkách. Díky vypočtené roční výkonové kapacitě je možné pomocí obrázku 7 a výsledku z rovnice 3 vypočítat poměrné výkony v jednotlivých měsících v roce. [10]

2.4 Větrné systémy

2.4.1 Větrné technologie

Větrná turbína se běžně skládá z trojlístého rotoru s natáčivými lopatkami a otočnou gondolou, ve které je umístěna převodovka. Ta je nutná pro zvýšení otáček hřídele rotoru, jelikož otáčky rotoru turbíny jsou proti potřebným otáčkám generátoru příliš nízké. Za převodovkou se nachází rotorová brzda a generátor. Samotná gondola je umístěná na hlavní stojné konstrukci, která je ukotvena v železobetonovém základu. Elektrické měniče a elektrická přípojka se nachází v dolní části konstrukce. Geometrie samotných lopatek je totožná s geometrií profilu křídla letadla, jelikož i princip funkce je stejný. Na obou stranách listu dochází k rozdílné rychlosti proudění vzduchu a v tomto důsledku vzniká vztlak, který roztáčí rotor. [17]

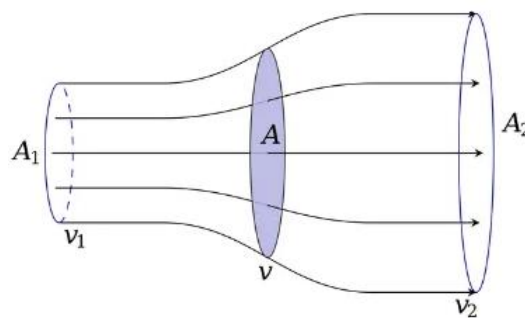
Rotor musí mít natáčivé lopatky, aby byly vždy udržovány proti relativní rychlosti větru k udržení co nejvyšší účinnosti. Natáčivé lopatky jsou hlavním prvkem regulace větrných turbín, tzv. pitch regulace. Ta poskytuje variabilnější možnost regulace a rychlejší náběh na provozní otáčky. Geometrie lopatek je velmi složitá a samotná lopatka je rozměrná součást, která se vyrábí z kompozitních materiálů. Musí odolávat velkému mechanickému namáhání, a to hlavně tahu, ohybu a krutu a zároveň nesmí být příliš těžká, neboť by samotná hmotnost lopatky dále navyšovala zatížení a veškerá silová působení. Rotory dnešních turbín dosahují rozměrů běžně přes 100 metrů v průměru a tím jsou způsobeny největší komplikace hlavně během stavby a transportu takových zařízení, protože se většinou jedná o velké a nerozebíratelné díly. Důležité je mít na paměti, že takto velký stroj má velkou setrvačnost a je tedy nutné počítat s delším časem náběhu, pokud je splněna minimální provozní rychlost větru.

Velkou nevýhodou je, že v případě poškození, nejčastěji listů, je jen velmi malá pravděpodobnost, že bude možné list opravit. [17] [18]

2.4.2 Betzovo kritérium a dosahované parametry

Běžně používané větrné turbíny v ČR se pohybují ve výkonové oblasti v řádu stovek kilowatt až nízkých jednotek MW na jednu jednotku. Nejvyšší výkony jsou ale dosahovány v offshore zařízeních, která jsou instalovaná na vodních plochách. Vítr zde stabilně fouká a není zde limitace prostorem, a proto největší větrné offshore zařízení dosahují výkonů až 10 MW. [19] [20]

Limitem využití potenciálu větru je tzv. Betzovo kritérium. Jeho vyjádřením pomocí kinetických energií větru před rotorem a za rotorem je definován ideální poměr rychlostí před a za rotorem: $v_2 / v_1 = 1/3$ viz. obrázek 8 níže. Z toho vyplývá maximální, dosažitelná účinnost ideálního větrné turbíny 59,3 %. Tento limit je dán tím, že v případě teoretické 100 % účinnosti by rychlost proudění vzduchu za rotorem musela být nulová, což není reálné z důvodu, že by došlo k zastavení proudění větru v okolí turbíny. Reálné nejvýkonnější turbíny dosahují maximálně 80 % z maximální teoretické účinnosti, tedy okolo 47,5 %. [20] [21]

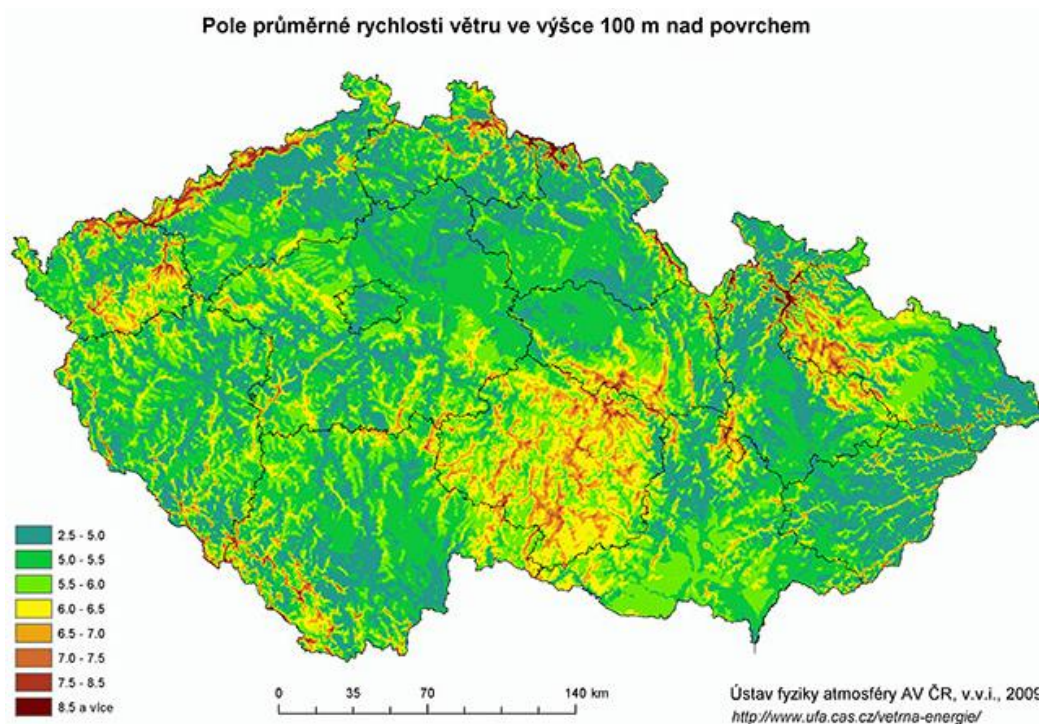


Obr. 8 – Znáznornění proudění větru před a za rotorem větrné turbíny. [21]

Posledním parametrem je počet lopatek rotoru, kdy se převážná většina větrných turbín staví v trojlisté konfiguraci. V případě použití čtyřlistých turbín by byly systémy ekonomicky velmi nákladné a celá turbína by musela být předimenzovaná. Výhodou by ovšem byla možnost provozu v nižších rychlostech větru než 3-listá varianta. Na druhou stranu 2 listy by musely být profilově dvakrát hlubší a musely by rotovat rychleji pro generování stejného výkonu. Tím by byly hlučnější a tedy nerealizovatelné v blízkosti zastavěných oblastí, neboť infrazvuk způsobovaný pomaluběžnými rotory je jedním z hlavních důvodů, proč se větrná energetika potýká s odporem veřejnosti. To by způsobovalo nulovou finanční výhodu, protože právě

lopatky jsou nejdražšími díly na celém zařízení. Zvýšení rychlosti otáčení a mohutnosti lopatek by mělo za následek o to větší navýšení mechanického namáhání během rotace. Listy i gondola by tak byly opět příliš předimenzované a tedy i drahé.

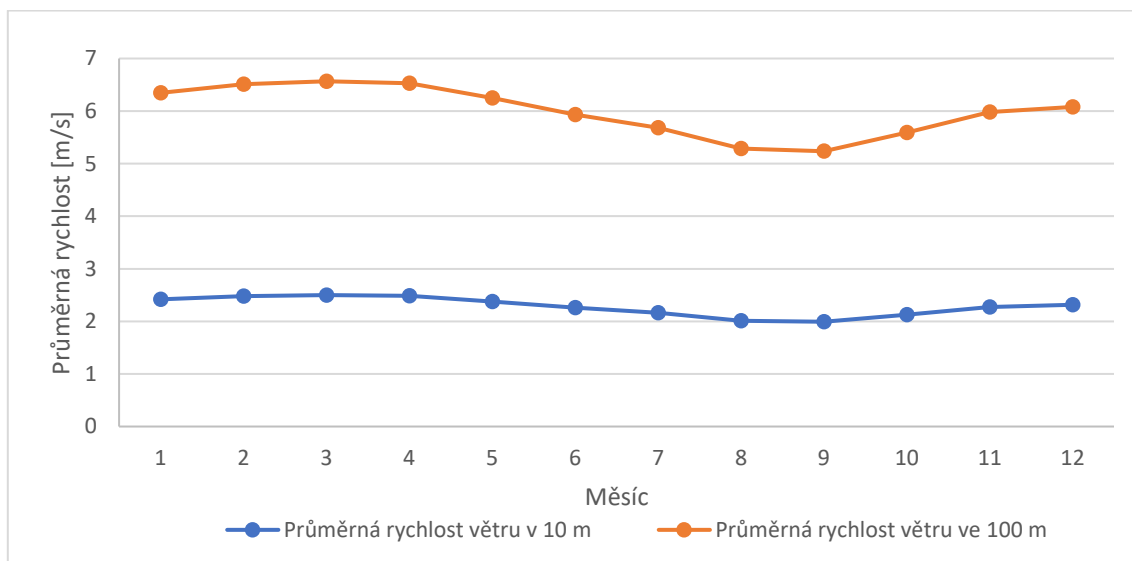
Jak je již patrné, větrná energie je získávána za cenu vysokých finančních nákladů a nutnosti stavby velkých zařízení. To je také důvod, proč je ve světě, až na výjimky, větrná energetika zatím obecně zastoupena v nízkých procentech v celkovém energetickém mixu. Z hlediska zakomponování větrné energie do našeho teoretického systému je nutné zvážit oblastní větrné podmínky a určit lokalitu k zástavbě. Použijeme k tomu podobného postupu jako u fotovoltaiky, tedy využitím větrné mapy na obrázku 9. [18]



Obr. 9 Mapa průměrné rychlosti větru 100m nad zemí. [22]

Z obrázku 9 je patrné, že můžeme zpřesnit lokalitu teoretické výstavby našeho systému. Je evidentní, že nejideálnější jsou oblasti s tmavými nebo alespoň žlutými plochami znázorňující oblastní rychlost větru přes 6 m/s. Pohoří a hory je možné ihned zavrhnout, jelikož výstavba takového zařízení je v hornatých oblastech velmi obtížná až nereálná a velmi nákladná. Z části o fotovoltaice víme, že ideální oblasti jsou Jihomoravský kraj a případně Vysočina. Při pohledu na mapu na obrázku 9 vidíme jasně, že jižní část kraje Vysočina je nejzajímavější adept. Pro zvolení kompromisu by tedy z hlediska napájení z OZE byla nejvýhodnější lokalita na

hranicích těchto dvou krajů. Běžná minimální rychlost pro start větrných turbín o výkonu 2MW je 3 m/s, a tedy nehrozí, že by byly turbíny často odstavovány. Nominálního výkonu dosahují větrné turbíny mezi rychlostmi větru 6,5 - 10 m/s a v našem případě bude nutné provést výkonovou korekci dle rovnice 7, neboť nebude dosahováno těchto rychlostí větru ve většině měsíců v roce a tedy i nominálního výkonu. Průměrná rychlost větru v dané lokalitě je získána ze statistiky ČHMÚ z měření za posledních 40 let. [23]



Obr. 10 - Roční chod průměrné rychlosti větru na stanici Moravské Budějovice v období 1961 – 2021. [24]

Na obrázku 10 výše je možné vidět průběhy průměrných rychlostí větru v jednotlivých měsících v roce získaných z databázi ČHMÚ. Na základě průměrných hodnot pro výšku 10 m byla data poměrově přepočtena pomocí rychlostí znázorněných na obrázku 9 na výšku 100 m, neboť žádná databáze rychlostí větru v této výšce není dostupná.

Podobně jako u fotovoltaiky bude dimenzování provedeno pro pokrytí energetických potřeb systému. Pro výpočet instalovaného výkonu větrných systémů je nutné vypočítat roční výrobu energie podle rychlostí větru z obrázku 10 ve výšce 100 m a pomocí koeficientu pro využití výkonu větrných systémů získaných obdobně jako v kapitole 2.3.2, vypočítat potřebný instalovaný výkon. Jak již bylo zmíněno v kapitole o fotovoltaice, nespornou výhodou větrných systémů proti fotovoltaickým je vyšší roční využitelná výkonová kapacita. Ta je dle ERÚ [16] a na obrázcích 3 a 4 pro větrné systémy rovna $k_{VE} = 0,232$.

Požadovaná roční instalovaná kapacita větrného systému je získána dle rovnice 5 níže.

$$C_{VE,y} = \frac{C_{s,y}}{k_{VE}} [MWh]$$

Rovnice 5 – Výpočet roční výkonové kapacity VE (5)

Tuto roční instalovanou výkonovou kapacitu lze převést na výkon VE systému dle rovnice 6 vydělením počtem hodin v roce.

$$P_{VE_{real}} = \frac{C_{VE,y}}{8760} [MW]$$

Rovnice 6 – Výpočet výkonu VE systému (6)

Jak již bylo zmíněno výše, průměrná rychlost v dané lokalitě nebude nabývat během celého roku dostatečné hodnoty pro nominální výkon zvolené větrné turbíny. Vzhledem k závislosti výkonu větrné turbíny na třetí mocnině rychlosti větru se dá jednoduše při uvažování konstantní hodnoty C_p vypočítat korigovaný výkon při rychlosti, která neodpovídá rychlosti pro nominální výkon turbíny dle rovnice 7. [18]

$$P_{VE_{kor}} = P_{VE_{real}} \cdot \frac{v_{1real}^3}{v_{1nom}^3} [MW]$$

Rovnice 7 - Korekce výkonu při rozdílné rychlosti větru než pro nominální výkon. (7)

Výsledný počet větrných věží je získán porovnáním celkového instalovaného výkonu a nominálního výkonu jedné turbíny dle rovnice 8.

$$N_{VE} = \frac{P_{VE_{kor}}}{P_{1VE_{nom}}} [-]$$

Rovnice 8 - Zisk počtu větrných turbín dle požadovaného příkonu (8)

2.5 Akumulace elektrické energie

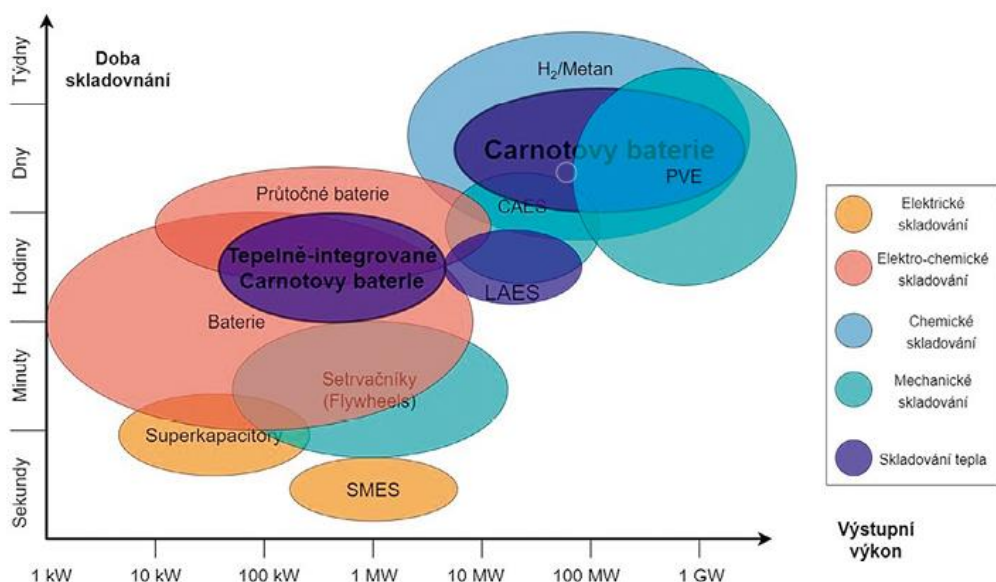
Tradiční známou formou akumulace elektrické energie je využití elektrochemických článků, které se dnes používají prakticky ve všech průmyslových odvětvích. Průmyslová akumulátorová úložiště, ale nejsou u nás postavena. Pokud pomineme, že pro tento typ akumulace není v ČR připravena legislativa, tak hlavní nevýhodou akumulátorových úložišť je nízká energetická hustota a cena akumulátorů. Z důvodu nízké energetické hustoty by pro zařízení, která by měla kapacitu pro výkonovou rovnováhu, bylo nutné enormní množství akumulátorů a tento koncept by byl neúměrně drahý. Další komplikací je, že akumulátory

pracují se stejnosměrným proudem, tudíž je nutná instalace výkonových střídačů a další výkonové elektroniky, které dodávají systému prvky poruchovosti. [25]

Tyto faktory brzdí rozvoj průmyslově využitelných bateriových úložišť, a proto je nutné se zaměřit i na jiný typ akumulace v smyslu zvyšování energetické hustoty akumulačního média. Tento parametr splňují syntetická a nízkoemisní plynná a kapalná paliva.

Ukládání elektrické energie pomocí různých chemicko – technologických procesů do paliv má řadu výhod. Paliva mají vysokou energetickou hustotu a tedy akumulované množství energie je na jednotku hmotnosti několikanásobně vyšší. Další výhodou je, že na rozdíl od baterií můžeme takto vytvořené palivo transportovat v existující infrastruktuře nebo pozemní dopravou přímo na místo využití. Případně je možné syntetické palivo zpětně rozložit na jiné plyny například vodík. Všechny tyto procesy jsou samozřejmě spojeny se ztrátami a není možné je neustále provádět dle potřeby, jelikož by se celý systém stal ekonomicky neudržitelným. [25]

Způsoby akumulace jsou rozděleny pro konkrétní aplikace podle diagramu na obrázku 11 níže, který znázorňuje závislost výkonu poskytovaného akumulací v závislosti na času, po který je systém schopen energii poskytnout. Pro modelovou technologii je relevantní modrá oblast, kde lze vidět, že akumulace do SNG má potenciál dlouhodobého využití energie v případě potřeby v řádu jednotek až desítek MW výkonu.



Obr. 11 - Kapacita různých druhů akumulačních systémů. [26]

2.6 Biomasa

2.6.1 Definice a dělení biomasy

Z hlediska úvodní definice je možné biomasu řadit do obnovitelných i neobnovitelných zdrojů energie. Obecně pod pojem biomasa spadá veškerý materiál organického původu, tedy obsahující uhlovodíky. Hlavními skupinami prezentující obnovitelnou biomasu tedy jsou: [27]

- V přírodě žijící fytomasa (rostliny) a zoomasa (živočichové).
- Zbytky a produkty jejich existence.
- Odumřelá, ale nikoliv fosilní fytomasa a zoomasa (např. sláma a suché listí).
- Veškerý materiál, který vznikl technologickou přeměnou z předchozích zdrojů (např.: papír, domovní odpad, odpady z průmyslu zpracovávající fytomasu a zoomasu).

Hlavní skupinou prezentující neobnovitelnou biomasu je ta, která je součástí geologických formací a je přeměněna v nerostné suroviny označované jako fosilní paliva (tj.: uhlí, ropa, zemní plyn, rašelina atd). Je to ta forma, ve které byla naakumulovaná energie po delší dobu a není možné jí v reálné časové ose obnovit. [27]

Dále se biomasa dělí na primární a sekundární biomasu: [27]

- Primární biomasa jsou takové materiály, které vznikaly přímou fotosyntézou, tedy veškerá rostlinná biomasa (dřevo), ale i veškeré produkty a zbytky lesního a zemědělského hospodaření.
- Sekundární biomasa jsou organické produkty vzniklé bez přímého působení Slunce ve vyšších organismech, tj. zvířatech.

Pro náš systém je použit i z hlediska spalovaného paliva obnovitelný zdroj, tedy dřevní pelety. Ty se dle předchozí definice řadí do obnovitelné, primární dendromasy, (dřevní biomasy), kategorie 3, (kategorizace z vyhlášky 477/2012 Sb.).

2.6.2 Dřevní pelety – parametry

Jako palivo v modelu technologie jsou použity dřevní pelety. Ty mají obecně podíl vody až cca 8 % a obsahují vysoký obsah prchavé hořlaviny a hořlavina obsahuje významný podíl kyslíku. Biomasa se vyznačuje velmi nízkým podílem popelovin maximálně do 5-ti %, což snižuje hlavně množství TZL a snižuje nároky na odlučování tuhých zbytků ze spalin. V modelu jsou použity pelety s obsahem popelovin 1%. Výhřevnost paliva silně závisí na obsahu vody, ale sušina má obvykle hodnotu výhřevnosti okolo 18 MJ/kg. [28]

2.6.3 Spalování biomasy

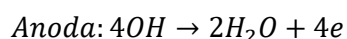
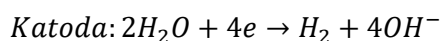
Spalování biomasy probíhá obecně ve čtyřech fázích. Vyšší zastoupení vody v palivu má za následek, že prvotní proces je zahřátí paliva a sušení, tedy odpaření veškeré zbytkové vody v palivu. Po celou tuto dobu palivo jako takové není spalováno a energie je odebírána na odpaření vody. V druhé fázi dochází k uvolňování prchavé hořlaviny, která je v biomase zastoupena mnohem více, než v běžných, fosilních palivech. Tento proces probíhá již za vyšších teplot a pyroliticky se tak rozkládají některé složky paliva. Ty se následně v třetí fázi spalují po dosažení zápalné teploty. Až ve čtvrté fázi dojde k samotnému spálení pevné hořlaviny. Tato fáze je nejdelsí část celého spalovacího procesu a je čistě závislá na rychlosti přívodu okysličovačla na povrch tuhého uhlíku v palivu a rychlostí spalovacích reakcí. [28]

Zařízení pro spalování biomasy a jejich správná volba pro danou technologii, je silně určena druhem spalované biomasy. Hlavní je především rozsah vlhkosti použitého paliva a forma (pelety, štěpka, kaly, atp.), ve které je palivo dávkováno do kotle. Z tabulky 2 lze vidět, že palivo použité pro model jsou dřevní pelety o velmi nízké vlhkosti a z výsledků modelové části můžeme předpovídat výkon kotle v řádu jednotek MW. Tyto faktory paliva spolu s druhem spalování (oxyfuel) omezují výběr použitelného spalovacího zařízení na kotel se stacionární, bublinkovou fluidní vrstvou. Celý tento systém včetně procesu spalování biomasy bude v modelu prezentován sérií reaktorů, které znázorní celý proces spalování. [29]

3 Technologie výroby vodíku

3.1 Elektrolýza vody

Elektrolýza je fyzikálně-chemický soubor procesů, popsáný Faradayovými zákony elektrolýzy, který za přítomnosti dodané elektrické energie způsobuje změny na elektrodách ponořených do elektrolytu. Obecně platí, že na záporné elektrodě - katodě, dochází k redukci a na kladné elektrodě - anodě, dochází k oxidaci. Elektrolýzu je možno využít mnoha způsoby, ale zde se zaměřím pouze na variantu elektrolýzy vody za účelem zisku vodíku a kyslíku, kde elektrolytem pro tento proces může být voda nebo hydroxid. Základní rovnice alkalické elektrolýzy s použitím vody a hydroxidu sodného (NaOH) jsou uvedeny níže v rovnici 9. [30]

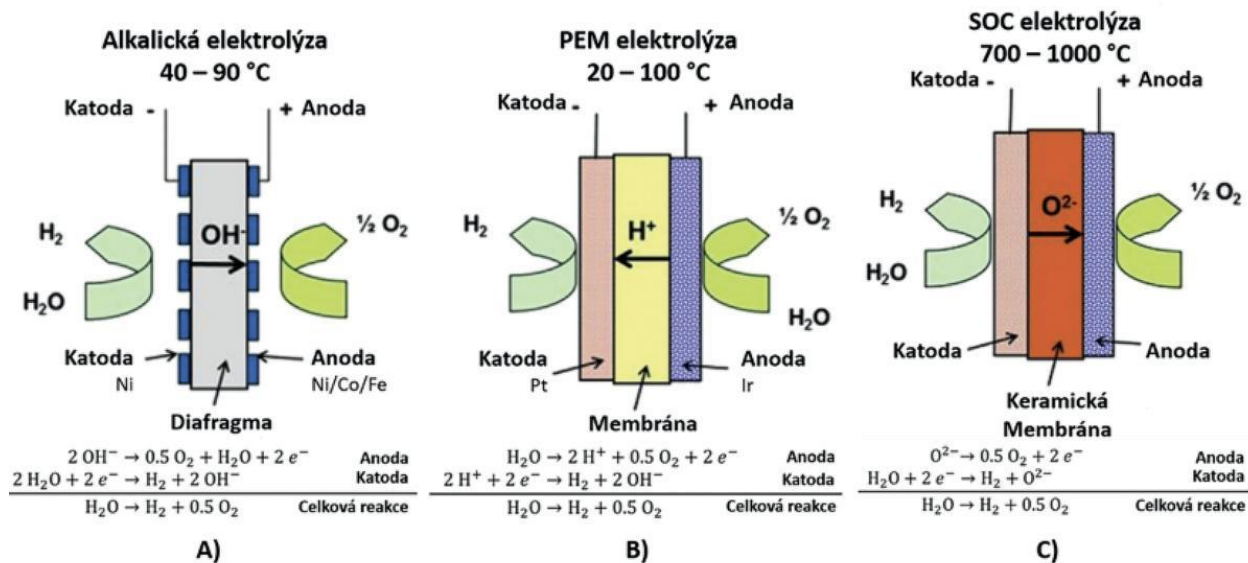


Rovnice 9 - Chemické rovnice reakcí na elektrodách. (9)

NaOH (hydroxid sodný) se rozkládá na Na^+ (sodíkový kationt) a OH^- (hydroxidový aniont) a neustále se rekombinuje. Díky velkému elektrickému potenciálu prakticky nedochází k redukci Na^+ na Na, a pokud by došlo k redukci, bude sodík okamžitě reagovat s vodou za vzniku vodíku.

3.1.1 Používané technologie a jejich parametry

V energetice používané technologie elektrolýzy jsou v zásadě tři ilustrované na obrázku 12 níže. Nízkoteplotní alkalická elektrolýza pro teploty (40–90 °C), nízkoteplotní PEM elektrolýza (s polymerní membránou) (20–100 °C) a vysokoteplotní SOC elektrolýza (700–1000 °C). Všechny tyto technologie se rozlišují pracovní teplotou i energetickými nároky na provoz, dočasnými meziprodukty během procesu rozkladu vody, potřebnými přídavnými látkami, výstupní kvalitou produktů a druhem nositele náboje mezi elektrodami. U alkalické elektrolýzy se jedná o hydroxidové anionty, u PEM elektrolýzy jsou to vodíkové kationty a u SOC elektrolýzy jsou to kyslíkové anionty. Na obrázku 12 je možné vidět jednotlivé porovnání výše zmíněných technologií, jejich pracovní teploty, nositele náboje, ale i materiály nejčastěji používané pro elektrody spolu s rozepsanými reakcemi probíhající na elektrodách. [31]



Obr. 12 – Porovnání jednotlivých technologií elektrolyzy vody. [32]

3.1.2 Alkalická elektrolyza

Alkalická elektrolyza je již komerčně zvládnutá a z hlediska pořizovacích nákladů poměrně levná technologie oproti ostatním typům. Její zvýšená energetická náročnost je vyjádřena tím, že množství dodané elektrické energie pro stejný zisk chemické energie z produktů je vyšší než u ostatních technologií. K jejímu provozu je nutné použití alkalického roztoku, který bývá nejčastěji buďto 30% KOH nebo 30% NaOH. V literatuře je uváděna účinnost 60 – 65 %, která je vypočtena z poměru získané chemické energie ku energii dodané ve formě elektřiny dle vztahu z rovnice 10. Oproti ostatním technologiím elektrolyzy má hlavní nevýhodu využití produktů z hlediska jejich čistoty. Kyslík a vodík nesplňují dostatečnou čistotu pro použití v citlivých systémech jako je například metanizační reaktor použitý v této práci. Znečištění je v případě alkalické elektrolyzy způsobeno vodní parou a kyslíkem přítomnými ve vodíku, jejichž zastoupení je běžně okolo 5% celkového objemu. Další nevýhodou je nižší výkonová flexibilita například oproti PEM elektrolyzátoru, v kapitole 3.1.3 níže, z důvodu závislosti reakční kinetiky alkalického roztoku na elektrickém příkonu. [31] [33]

$$\eta_{ELY} = \frac{E_{Z.chem}}{E_{EL.dod}}$$

Rovnice 10 - Účinnost elektrolyzy.

(10)

3.1.3 PEM elektrolýza

PEM elektrolýza je technologie, které je v současnosti věnována pozornost kvůli jednoduchosti a všestranně dobrým vlastnostem samotného procesu jako jsou: vysoká čistota vodíku vzhledem k ceně technologie, velká výkonová flexibilita od 10 – 100% jmenovitého výkonu a rychlé ustálení reakce do dynamické rovnováhy, což znamená že počet vznikajících a zanikajících iontových párů se v reálném čase rovná. Užití drahých kovů zapříčiňuje do značné míry vyšší cenu PEM elektrolýzérů, ale absence nutnosti použití alkalického roztoku zvyšuje kvalitu výstupních plynů a snižuje provozní náklady. Nevýhodou je také citlivost na kvalitu vodíku, resp. vznikajících vodíkových kationtů, protože ty během reakce procházejí skrze polopropustnou membránu a jakékoliv cizí atomy by membránu a i katalyzátory mohly poškodit. Tomu se dá zabránit použitím kvalitního systému úpravy vstupní vody, jež musí být v kvalitě demivody, ideálně s použitím reverzní osmózy. Při dodržení kvality vody dosahuje PEM elektrolýza vysokých čistot technických plynů. Účinnost PEM elektrolýzy se pohybuje v rozmezí 67–90 %. [34]

3.1.4 SOC elektrolýza

SOC elektrolýza představuje v současnosti spíše vývojové zařízení, jelikož se v průmyslovém měřítku zatím nepoužívá tolik jako dvě předchozí technologie. Využívá pevný elektrolyt k transportu iontů mezi elektrodami. Vysoká provozní teplota poskytuje výhodu, že část energie, která je potřebná k běhu elektrochemických reakcí, je dodána pomocí tepla, které je typicky levnější než elektrická energie, pokud ovšem teplo nepochází z elektrického zdroje. Proto je SOC elektrolýza často zmiňována jako výhodná ve spojení s procesy, při kterých vzniká větší množství odpadního tepla. Díky tomuto efektu dosahuje SOC technologie vysoké účinnosti až 90%. Náběh na provozní teplotu však kvůli vysoké pracovní teplotě obvykle trvá poměrně dlouho. [35]

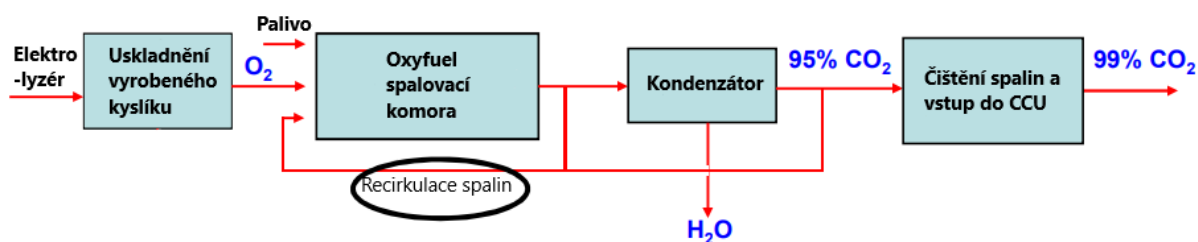
4 Oxyfuel spalování a technologie zachytu CO₂

4.1 Oxyfuel spalování

Oxyfuel je proces spalování, kdy jako jediné oxidační činidlo je čistý kyslík. Ten je smíchán s palivem a recirkulovanými spalinami pro dosažení nižších teplot hoření. Adiabatická teplota by při čistě kyslíkovém spalování dosahovala hodnot přes 3000 °C, což není realizovatelné v praxi, neboť běžně používané materiály nejsou schopny takovým teplotám dlouhodobě odolávat. Použití a nastavení recirkulace spalin určuje poměr O₂ : CO₂ v plynu vstupujícího do spalovacího procesu. Tento poměr se v praktickém použití pohybuje v rozsahu 12 – 40% zastoupení kyslíku. Díky nepřítomnosti složek vzduchu ve spalovacím procesu, není zahřívána balastní hmota, převážně dusík. Výsledkem je snížení množství spalin vystupující z recirkulace, které obsahují vysoké zastoupení CO₂. V modelovém systému bude pracováno se systémem fluidního oxyfuel spalování a spalovací teploty budou drženy ideálně na 850 °C. Toho bude dosaženo významnější recirkulací spalin a plyn na vstupu do kotle bude v jeho složení obsahovat přes 75% CO₂. Oxyfuel spalování má tedy následující výhody: [36] [37]

- Je tedy významnou technologií pro snižování emisí NO_x. Ke tvorbě emisí NO_x v oxyfuel spalování dochází pouze z dusíku obsaženého v palivu a z případného znečištění způsobeného netěsností systému a vniknutí vzduchu do proudu plynu.
- Zvyšuje rychlost hoření paliva.
- Snižuje zápalnou teplotu paliva.
- Snižuje potřebný přebytek spalovacího kyslíku oproti přebytku vzduchu ve vzduchovém spalování.
- Snižuje objem výstupních spalin a zvýšení jejich hustoty.
- Z výstupních spalin o vysokých koncentracích CO₂ a vodní páry se lépe separuje CO₂ pro další využití.
- Zvýšení účinnosti spalovacího procesu díky spalování čistým kyslíkem.
- V případě nutnosti použití systému pro odstraňování síry ze spalin není nutné tak výkonné a velké zařízení z důvodu snížení objemu spalin.
- Oxyfuel technologii je možné instalovat do nových i již existujících zdrojů.

Na obrázku 13 níže je znázorněno jednoduché schéma oxyfuel systému. [36]



Obr. 13 – Zjednodušený popis spalovací větve modelové technologie s použitím oxyfuel spalování. [36]

Oxyfuel spalování produkuje přibližně o 75 – 80 % méně spalin než běžné spalování za přítomnosti vzduchu a v ideálním případě produkuje spaliny skládající se převážně z oxidu uhličitého a vody. Díky snížení množství produkovaných spalin dochází ke snížení tepelných ztrát a to hlavně komínové ztráty, která bývá obecně ztrátou nejvýznamnější, což vede k vyšší účinnosti kotle. Menší množství spalin zároveň vyžaduje menší technologii pro následnou úpravu spalin. Díky použití vlastního elektrolyzáru se eliminuje hlavní nevýhoda tohoto systému, což běžně bývá velmi drahé a složité zařízení na separaci kyslíku za vzduchu, které je velmi energeticky náročné. U konvenční uhelné elektrárny je spotřeba tohoto zařízení separace v nízkých desítkách procent celkového elektrického výkonu elektrárny. V našem systému je však spalování zásobováno direktně ze zásobníku z elektrolyzy vody, která poskytuje kyslík o téměř 100% čistotě. [38]

Výhodou použití dřevních pelet jako paliva je, že biomasa je jako palivo považována za uhlíkově neutrální dle definice, že množství uvolněného uhlíku při spalování je stejné jako množství spotřebované k jejímu růstu. [39]

V tabulce 1 níže je možné vidět popis obecného složení dřevní štěpky. V tabulce 2 je zápis složkového složení biomasy použité v modelové části.

Obecné složení biomasy - dřevní štěpky			
daf	hm%	h, A, V	
C	50	Vázaný uhlík	20
H	6	Prchavé látky	80
O	43,55	Popelovina	2
N	0,4	Voda	30
S	0,05		

Tabulka 1 - Obecné složení biomasy. [28]

Složení biomasového paliva - pelet (formát Aspen)					
Ultimate analysis		Proximate analysis		Sulfate analysis	
C	51	Fixed Carbon	17	Pyritic	0
H	6	Volatiles	82	Fixed	0
O	43,7	Ash	1	Suphur	0
N	0,3	Moisture	8		
S	0				
Cl	0				
Ash	1				

Tabulka 2 - Formát zadání složení biomasy v Aspen Plus včetně základních použitých hodnot. [28]

Pro snížení adiabatické teploty plamene a zamezení tvorby oxidu uhelnatého ze spalování potřebujeme přebytek spalovacího kyslíku. Z důvodu, že v oxyfuel režimu spalujeme čistým kyslíkem, budou vznikat NO_x pouze z paliva (biomasy) a ve spalinách se bude vyskytovat i nevyužitý kyslík. Potřebný přebytek spalovacího kyslíku je vypočítán podle následujícího vztahu v rovnici 11, pokud není explicitně zadaná konkrétní hodnota: [28]

$$\alpha = \frac{\dot{V}_{O_2,Real}}{\dot{V}_{O_2,Stech.}}$$

Rovnice 11 - Výpočet přebytku spalovacího vzduchu. (11)

Pro zjištění potřebného množství kyslíku pro spálení 1kg paliva jsou použity vztahy dle rovnic 12 a 13 níže. [40]

$$\dot{V}_{O_2,Stech.} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} - \frac{O^r}{32} \right) \left[\frac{m^3}{kg_{pal}} \right]$$

Rovnice 12 - Výpočet minimálního množství spalovacího kyslíku. (12)

$$\dot{V}_{O_2,Real} = \dot{V}_{O_2,Stech.} \cdot \alpha \left[\frac{m^3}{kg_{pal}} \right]$$

Rovnice 13 - Výpočty reálného množství spalovacího kyslíku. (13)

K získání množství spalin a nastavení parametru recirkulace spalin (“r”) je nutné nejdříve vypočítat objemy složek ve spalinách, minimální množství suchých spalin, minimální množství vlhkých spalin a závěrem reálné množství spalin. Spalovací proces bude v tématu této práce počítán dle databázi použitého simulačního programu, z toho důvodu není důležité výpočtové vztahy uvádět. Vztahy pro výpočet oxyfuel spalování jsou dostupné ve zdroji [41]. Poté je možné zjišťovat hodnotu recirkulačního poměru, která bude dále využita v simulačních scénářích v modelové části práce. Vztah pro výpočet recirkulačního poměru platí dle rovnice 14 a popisuje poměr cirkulujících spalin vůči výstupním spalinám z technologie.

$$r = \frac{\dot{V}_{spal_{FGR}}}{\dot{V}_{spal_{výst}}}$$

Rovnice 14 - Recirkulační poměr FGR.

(14)

4.2 Zachycování a využití oxidu uhličitého (CCU) a čištění CO₂

4.2.1 Zachycování CO₂

Zachycování a využití uhlíku je koncept zachycování oxidu uhličitého a jeho recyklace pro další použití. Zachycování a využívání může přispět k významnému snížení emisí skleníkových plynů z velkých průmyslových zařízení. CCU se liší od zachycování a ukládání uhlíku (CCS) v tom, že CCU nemá za cíl trvalé geologické ukládání oxidu uhličitého. Proto v práci uvažují použití spíše CCU, neboť CCS je zatím negativně vnímáno, jeho logistika je složitá a dlouhodobá bezpečnost úložišť zatím není vyzkoušená, protože se jedná o novou technologii. V CCU technologii se zachycené spaliny čistí na téměř 100% čistý oxid uhličitý, který se buďto okamžitě využívá v metanizačním reaktoru nebo může být pod tlakem skladován v nádržích. Uskladněný koncentrovaný oxid uhličitý může být použit mimo výrobu SNG například pro výrobu cennějších produktů jako jsou plasty, beton nebo jiná biopaliva. V případě poruchy CCU technologie může být kotel provozován ve vzduchovém režimu a spaliny po denitrifikaci vypouštěny do ovzduší. [42]

Výše popsaná technologie záchytu a využití oxidu uhličitého je forma záchytu z koncentrovaných zdrojů, tedy ze spalin konvenčních elektráren, továren a jiných průmyslových podniků. Teoreticky použitelnými procesy separace CO₂ ze spalin jsou:

- chemická absorpce, kde se oxid uhličitý separuje ze spalin pomocí rozpouštědel
- adsorpce CO₂ na povrchy adsorbentů
- membránová separace
- kryogenní destilace, použitá v modelové technologii této práce
- biosystémy využívající živé řasy

Další technologií může být záchyt ze vzduchu, tedy z nekoncentrovaného zdroje. V případě záchytu ze vzduchu existují experimentální zařízení, která pomocí ventilátorů protlačují vzduch skrz zařízení, které obsahuje síto, po kterém stéká kapalně médium sloužící k záchytu oxidu uhličitého ze vzduchu. [43]

4.2.2 Čištění spalin a CO₂

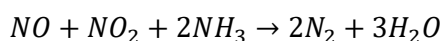
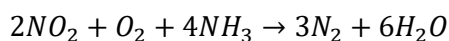
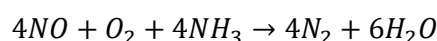
Samotný proces zachycení oxidu uhličitého pomocí jedné z výše zmíněných chemických technologií není jediným procesem, který je nutné provést. Vzhledem k nutnosti získání tlakového a ideálně 100 % čistého CO₂ pro metanizaci je nutné vystupující spaliny zbavit veškerých nežádoucích složek. Jejich přítomnost by totiž v metanizačním reaktoru nepříznivě ovlivňovala proces tvorby metanu za vzniku nežádoucích produktů, snížení účinnosti reakce, až dokonce poškození reaktoru či vysoké spotřebě katalyzátoru.

Pokud tedy není uvažován ideální systém, tak hlavními složkami spalin z oxyfuel spalování jsou: CO₂, H₂O, přebytek O₂, NO_x a TZL. Všechny tyto složky vyjma CO₂ je nutné extrahovat před natlakováním oxidu uhličitého do zásobníků pro metanizaci.

Metody separování použité v systému jsou:

- Odstranění TZL pomocí cyklonového odlučovače a látkových filtrů.
- SCR technologie pro redukcí NO_x na dusík – Pro odstranění NO_x musí být ve spalinovém tahu umístěna SCR jednotka, která je zodpovědná za redukcí oxidů dusíku za přítomnosti katalyzátoru na plynný dusík. Redukčním činidlem u nás uvažované SCR technologie je amoniak (NH₃), který s katalyzátorem umožňuje redukovat spaliny při nižší teplotě, než by tomu bylo například u nekatalytické redukce. [44]

Během procesu redukce probíhají následující hlavní reakce dle bloku rovnic 15: [45]



Rovnice 15 - Chemické bilance SCR DeNO_x technologie.

(15)

- Kryogenní separace pro odstranění nekondenzovatelných plynů (O₂, N₂) a kompletní separaci vody, která nezkondenzuje v kondenzátoru.

Důvody separace jednotlivých složek spalin jsou následující.:

- Voda – Nutná separace z důvodu namrzání v systémech kryogenní separace nekondenzovatelných složek spalin. Nesmí být přítomna v kompresorech zkapalňovací technologie.
- Kyslík – Formu nezreagovaného kyslíku z oxyfuel spalování je nutné separovat kryogenní separací, neboť nesmí vstoupit do následné metanizační reakce. Jedná se o tzv. nekondenzovatelnou složku spalin (NCG). Toho je nutné využít právě v systému kryogenní separace, kdy je CO₂ zkapalňováno a plynné NCG složky jsou odváděny.
- Dusík – Dusík nezreagovaný během oxyfuel spalování je nutné separovat ze stejného důvodu jako výše zmíněný kyslík. Také se jedná o složku NCG.
- NO_x – Oxidy dusíku je nutné přeměnit v SCR technologii, neboť se jedná o nežádoucí a nebezpečné složky emisí spalovacích systémů a pro každé zařízení je nutné dodržovat normy o vypouštění těchto emisí do ovzduší. Zároveň je nepřijatelná jejich přítomnost v systému kryogenního chlazení.
- TZL – Tuhé znečišťující látky se musí separovat ihned po využití tepla z proudu spalin v některém z dostupných typů odlučovačů ještě před rozdělením proudu do recirkulované části a výstupní části. Tuhé látky by totiž mohly způsobovat nánosy ve spalovacím zařízení a potrubních trasách. K jejich separaci by byla pravděpodobně použita kombinace cyklonového odlučovače a látkový filtrů.

Výsledný čistý oxid uhličitý je pro metanizační reakci potřebný pod vysokým tlakem, proto je vhodné ho hned po vyčištění natlakovat a skladovat takto do jeho využití v syntéze SNG. [42] [46]

5 Technologie P2G

5.1 Metanizace – Sabatierova reakce, výroba SNG

Metanizace je proces syntézy syntetického zemního plynu nejčastěji z oxidu uhelnatého nebo oxidu uhličitého. Sabatierova reakce spočívající v konverzi vodíku vyrobeného elektrolýzou vody a zachyceného oxidu uhličitého na methan. Reakce je silně exotermická a probíhá podle rovnice 16. Je tedy nutné zajistit dostatečné a vhodné chlazení celého reaktoru, čímž se naskýtá možnost využití tepla z reakce na předehřev reaktantů. Dalšími parametry, které ovlivňují

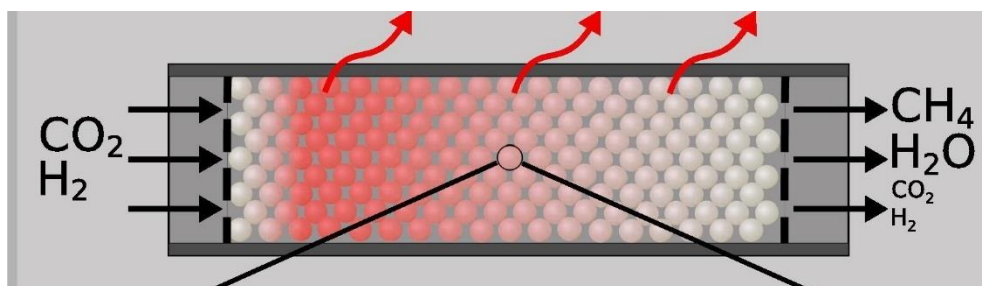
výsledné výkony reaktoru jsou: druh používaného katalyzátoru, čistota přiváděných reaktantů, pracovní tlak a režimy výroby, na které má být reaktor navržen, tedy zda se jedná o dlouhodobý či krátkodobý provoz. Pokud se jedná o provoz dlouhodobý, vyvstává otázka regulace výkonu v závislosti na proměnném napájení z OZE i z hlediska zásobování reaktoru reaktanty. [47]

Výroba z oxidu uhličitého a vodíku pro tuto modelovou studii probíhá podle reakce z obrázku 14 a rovnice 16.



Rovnice 16 - Metanizace z CO₂. (16)

Tato reakce je katalyzační, je tedy nutné mít v technologii dostupný katalyzátor, který může být tvořen z následujících prvků a jejich sloučenin: Ni, Mo, Co, Ru nebo Rh. [48]

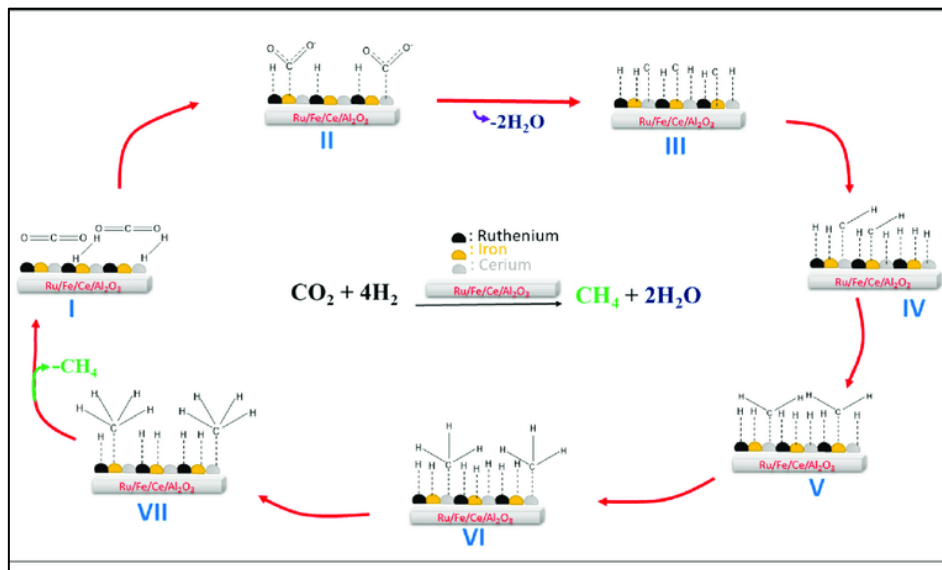


Obr. 14 – Znárodnění metanizačního reaktoru. [49]

5.1.1 Katalyzátory

První pro metanizaci používané katalyzátory byly na bázi niklu. Oxid uhličitý se velmi ochotně disociačně adsorbuje (adsorpce – vázání na povrch pevné látky) na nikl a již při teplotách okolo 175 °C se srovnává rychlost adsorpce s rychlostí desorpce, což je pro funkci katalyzátoru velmi důležité, protože se rychleji uvolňuje pro adsorpci dalšího oxidu uhličitého. Hlavní výhodou katalyzátorů na bázi niklu je jejich příznivá cena oproti ostatním na bázi vzácných kovů a jejich vysoká selektivita na metan. Nevýhodou je tendence velmi rychle se deaktivovat, pokud se v systému objeví jakékoliv známky sirných sloučenin, převážně z poruchy odsiřovacích zařízení. To dává ovšem větší volnost při použití v našem modelovém systému, neboť síra není obsažena v palivu a tudíž by bylo v praxi využití širšího spektra katalyzátorů. [50]

Na obrázku 15 níže jsou zjednodušeně znázorněny chemické procesy a fungování katalyzátoru během metanizační reakce.



Obr. 15- Průběh katalytické reakce. [50]

Další možností jsou výkonnější ale i dražší katalyzátory na bázi vzácných kovů, hlavně ruthenia a rhodia. Ty jsou sice dražší, méně selektivní na metan, ale stabilnější a nehrozí jejich deaktivace a tedy i zastavení procesu metanizace. [48]

K detailnímu výpočtu reakcí bude sloužit simulace v programu Aspen Plus, který využívá matematické modely k výpočtům chemických a fázových bilancí na základě zvolené výpočetní metody z databáze.

5.1.2 Faktory ovlivňující průběh metanizace [47]

Hlavními faktory ovlivňující proces jsou: teplota, tlak, poměr vodíku ku oxidu uhličitému na vstupu do reakce a množství vody přítomné při reakci.

Vliv teploty je nejvýraznější v rozmezí teplot 250 – 370 °C, kde dochází k nárůstu konverze CO₂ od 14% do 87%. Při dalším nárůstu teploty je již dosažena termodynamická rovnováha a konverze začíná klesat.

Vliv tlaku, stejně tak dále i poměr H_2 / CO_2 na vstupu do reakce působí pozitivně ve smyslu rychlosti metanizace. Čím vyšší tlak nebo poměr H_2 / CO_2 , tím dále stoupá konverze CO_2 .

Jediný vliv působící negativně je přítomnost vody na vstupu do reakce. Voda snižuje konverzi oxidu uhličitého, která je úměrná množství přítomné vody v reakci. Po odstranění vody z reakce se konverze opět zvýší. Z toho důvodu je velmi důležité při zachytu oxidu uhličitého provést kondenzaci vody ze spalin, aby tak nedocházelo k následnému snížení konverze v metanizačním reaktoru.

6 Návrh modelové technologie

6.1 Program Aspen Plus V10

Program Aspen Plus V10, jehož licenci poskytla ČVUT, pro tuto diplomovou práci je chemický, procesní, simulační software společnosti AspenTech® určený pro chemický a energetický průmysl. Vzhledem k povaze procesů probíhajících v technologii je procesní, simulační program použit pro kompletní látkovou a energetickou bilanci všech částí kromě zdrojové, neboť program Aspen neumožňuje simulaci fotovoltaiky a větrných systémů. Jejich výkony a dimenzování budou dopočítány na základě spotřeb uvedených v technických listech použitých, výkonových zařízení (elektrolyzér) a z energetické bilance vypočtené programem. Aspen Plus pracuje na základě potřebného zadání termodynamických veličin, chemických vlastností použitých látek, analytických složení nekonvenčních směsí (např.: biomasa) nebo energetických bilancí. K výpočtu jsou používány matematické modely pro získání odhadu výkonu a průběhu procesů na základě zvolených výpočetních metod, které uživatel nastavuje. Dostupné simulační kategorie jednotek programu Aspen Plus:

- Výměníky tepla
- Reaktory
- Ventily, čerpadla, kompresory, expandéry, atp.
- Destilační kolony
- Absorpční kolony
- Extraktory
- Flash systémy
- Separátory a směšovače

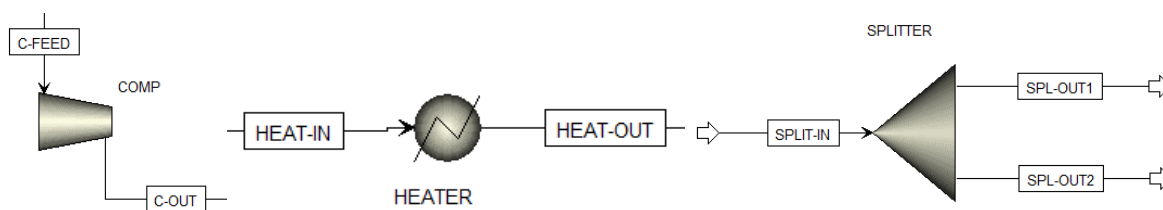
- Separátory pevných částic
- Uživatelské modely

Z důvodu komplexnosti simulačního programu, jehož znalost je velmi odborná, jsou znázorněny pro lepší přehlednost jednotlivé funkční moduly použité ke složení jednotlivých technologických celků a důvod jejich použití v kapitole 6.2. Dále jsou uvedeny náhledy na jednotlivé technologické celky s popisem nastavení jednotlivých modulů.

Simulace technologického celku byla provedena s určitými zjednodušeními, jelikož kompletní detailní simulace odpovídající 100% reálným technologiím není proveditelná v rozsahu diplomové práce. Veškerá aplikovaná zjednodušení jsou okomentována u každého technologického celku.

6.2 Technologické jednotky použité pro simulaci

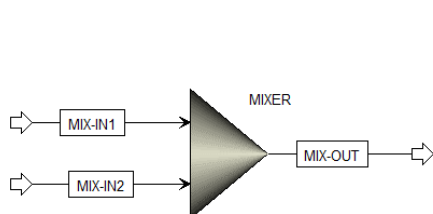
Technologické jednotky vyobrazené níže a popsané v Tabulce č.3, jsou vždy složeny ze vstupu látky / látek, jednotky samotné a výstupu / výstupů. Pro každý látkový vstup nebo výstup je nutné definovat jeho teplotu, tlak, průtok nebo kvalitu, což platí pro čisté látky. Pro směsi je nutné zadávat jednotlivé frakce dané směsi, které dohromady složí celkový látkový tok. Pro nekonvenční látky (v Aspen Plus definováno jako: „Non-conventional“), kterou je například použitá biomasa je nutné definovat kompletní prvkovou analýzu biomasy a popelovin.



Obr. 16 - Kompresor

Obr. 17 - Ohříváč / Chladič

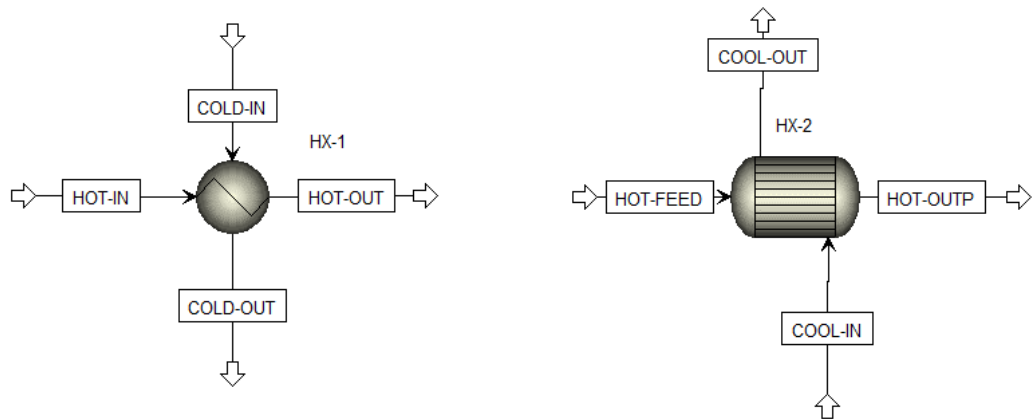
Obr. 18- Rozdělovač



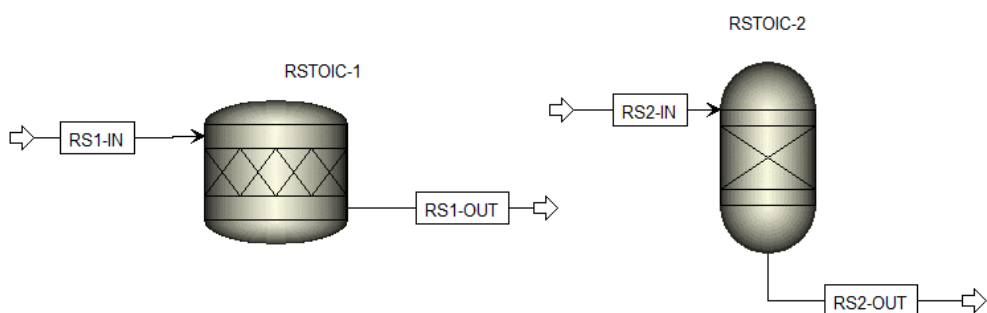
Obr. 19 – Směšovač

Obr. 20 - Flash separátor

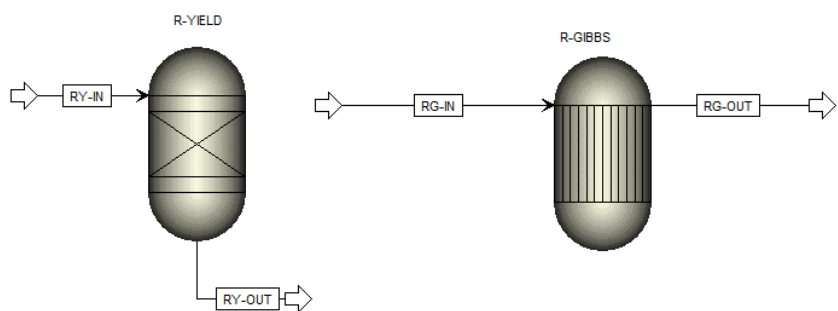
Obr. 21 - Prvkový separátor



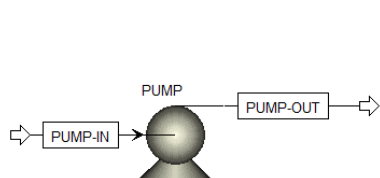
Obr. 22 - Výměník tepla



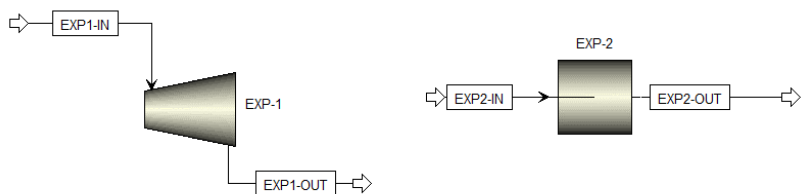
Obr. 23 - Stechiometrický reaktor



Obr. 24 - Vlevo: Nestechiometrický reaktor; Vpravo: Rigorózní reaktor



Obr. 25 - Čerpadlo



Obr. 26 - Vlevo: Expandér / Turbína; Vpravo: Expandér / Expanzní ventil

Jednotka	Obr. č.	Základní nastavované parametry v této simulaci	Funkce
Kompresor	16	Typ (isoentropický, polytropický); Výstupní tlak; Účinnost (isoentropická, mechanická, polytropická). Dovolené fáze pracovních médií.	Změna tlaku plynného média.
Ohřivač / Chladič	17	Požadovaná výstupní teplota a tlak.	Změna teploty média.
Rozdělovač	18	Frakce rozdělení do jednotlivých výstupních proudů nebo průtoky do jednotlivých proudů.	Rozdělení proudu podle frakce nebo průtoku.
Směšovač	19	Není vyžadováno žádné nastavení. Blok provede smísení vstupních proudů a vypočítá výstupní teplotu a tlak.	Smísení vstupních proudů.
Flash separátor	20	Teplota a tlak separovaných médií nebo dodané či odebrané teplo vstupnímu proudu.	Separace vstupního proudu na kapalnou a plynnou složku s možností ohřevu nebo chlazení.
Prvkový separátor	21	Frakce rozdělení do jednotlivých výstupních proudů nebo průtoky do jednotlivých proudů.	Separace podle frakce, médií nebo průtoků s možností ohřevu nebo chlazení.
Výměník tepla	22	Typ výměníku, výpočtový režim, specifikace jednoho parametru jednoho proudu, minimální teplotní rozdíl.	Předání tepelné energie.
Stechiometrický reaktor	23	Teplota a tlak reagujících médií nebo dodané či odebrané teplo během reakce. Stechiometrie všech probíhajících reakcí, konverze reaktantů, sekvence reakcí, vlastnosti nekonvenčních komponent.	Provedení chemických reakcí konvenčních látek na základě zadaných stechiometrických rovnic a konverze reaktantů.
Nestechiometrický reaktor	24	Teplota a tlak reagujících médií nebo dodané či odebrané teplo během reakce. Výtěžnost konvenčních médií z nekonvenčního média.	Provedení chemických reakcí nekonvenčních látek na základě zadané produktové výtěžnosti jejich jednotlivých složek.
Rigorózní reaktor	24	Teplota a tlak reagujících médií nebo dodané či odebrané teplo během reakce. Odhad produktů a inertní média.	Vypočtení fázové a chemické rovnováhy na základě zadané teploty reakce, tlaku a předpokládaných produktů.
Čerpadlo	25	Výstupní tlak nebo příkon. Účinnost a dovolené fáze pracovních médií.	Zvýšení tlaku kapalného média.
Expandér / Expanzní ventil	26	Typ (isoentropický, polytropický); Výstupní tlak; Účinnost (isoentropická, mechanická, polytropická). Dovolené fáze pracovních médií.	Snížení tlaku plynného média s možnou změnou na směs kapalina-plyn během expanze za účelem konání práce.

Tabulka 3 - Vlastnosti a funkce použitých jednotek simulace.

6.3 Vstupní, okrajové a zvolené parametry a technologie

Pro modelovou simulaci bylo nutné některé parametry a technologie navolit. Účinnosti modulů pro simulaci byly nastaveny na 0,7 a 0,9 dle tabulky 4 níže. Výpočtová metoda v programu Aspen plus byla zvolena Peng-Robinson, která pracuje se stavovou rovnicí reálného plynu Peng-Robinson.

Elektrolyzátor byl použit dle reálných parametrů PEM elektrolyzátoru NEL M2000 s 95% konverzí při rozkladu vody z důvodu vysoké výkonové flexibility PEM systémů a absenci aditivace alkalického roztoku do reakce. Jako větrné turbíny použité pro dimenzování napájení jsou použity jednotky GE o nominálním výkonu 2 MW s výškou gondoly 94 metrů z důvodu teoreticky uvažované lokalizace tohoto systému v ČR, kde jsou 2 MW větrné systémy nejvyšší používanou výkonovou třídou. Modelová metoda pro zkapalňování plynů byla použita Linde-Hampson dle [51]. Tabulka 4 níže shrnuje všechny výše popsané vstupní parametry.

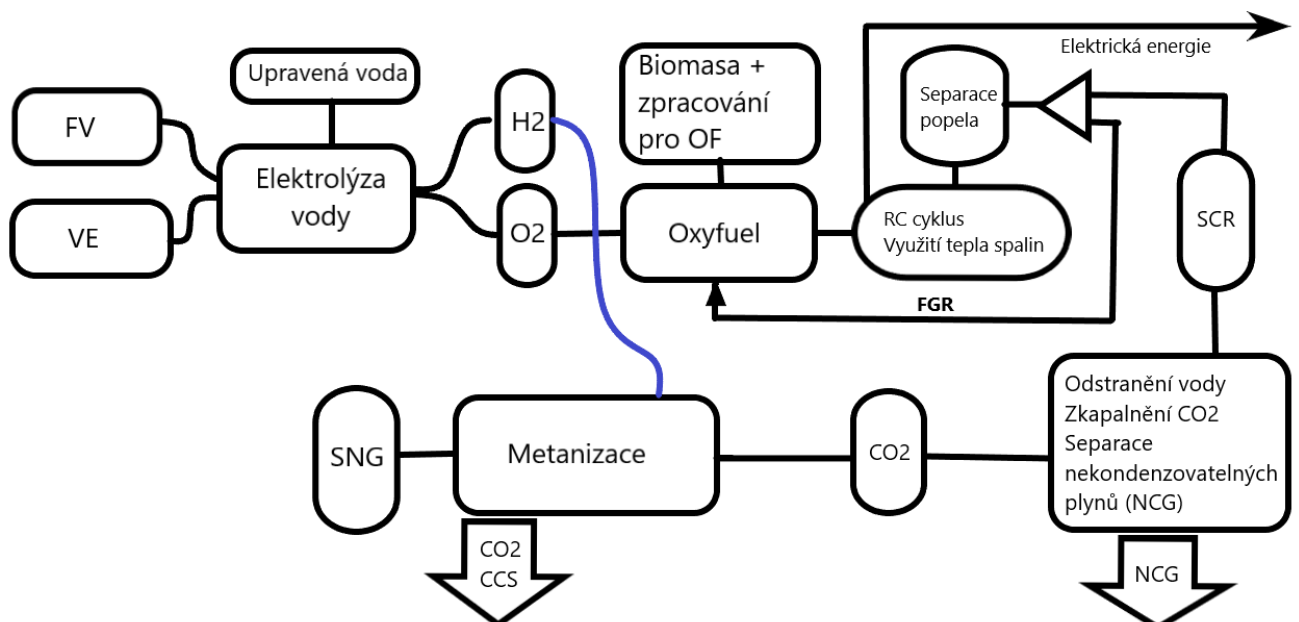
Vstupní a okrajové parametry	
Množství %hm. vody v peletách	8%
Množství %hm. síry (S) v biomase	0%
Množství %hm. chloru (Cl) v biomase	0%
DeNO _x technologie	SCR (NH ₃)
Přebytek kyslíku v OF	1,1
Množství %hm. popelovin v biomase	max. 1%
Zvolené parametry	
Isoentropická účinnost komponent	0,7
Mechanická účinnost komponent	0,9
Výpočty látkových stavů pomocí metody	Peng-Robinson
Typ elektrolyzátoru	PEM
Konverze H ₂ O při rozkladu v elektrolyzátoru	95%
Množství %hm. dusíku v biomase	max. 0,3%
Metoda zkapalňování plynů	Linde-Hampson
Model elektrolyzátoru jako vzor	NEL M2000
Model větrné turbíny jako vzor	GE 2MW - 132
Nominální výkon FV panelu	290 Wp

Tabulka 4 - Vstupní, okrajové a zvolené parametry.

6.4 Technologické schéma procesu a celky vytvořené pro simulaci

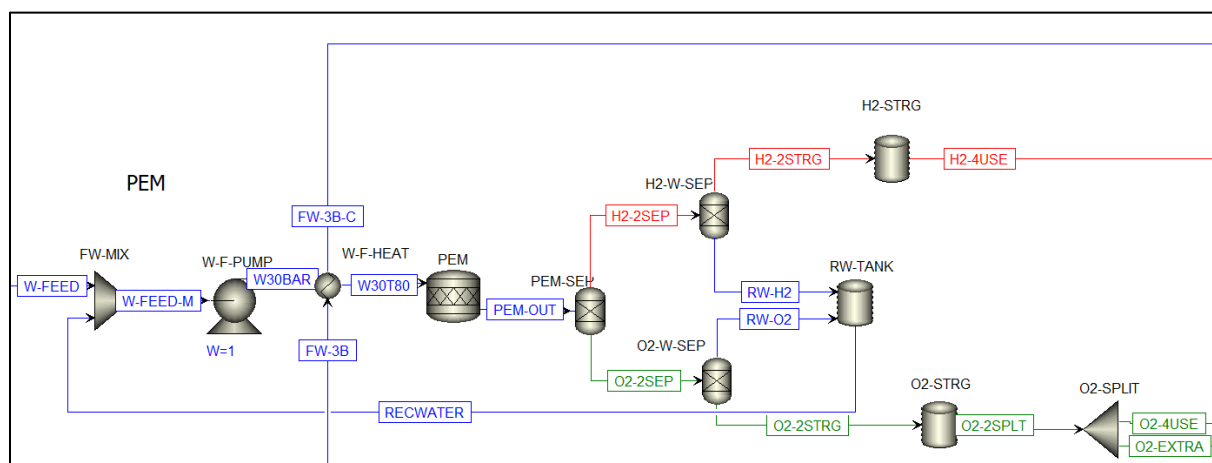
Orientační průběh tohoto systému vyobrazeného na obrázku 27, je následující: Fotovoltaické panely a větrné systémy poskytují systému napájení elektrinou. Do elektrolyzátoru je přiváděna upravená voda, která je v procesu elektrolýzy rozkládána na kyslík a vodík, (pozn. úprava vody v procesu simulována není). Tyto dva produkty jsou separovány a uskladněny pro další použití. Kyslík vstupuje jako okysličovadlo do oxyfuel spalování spalující biomasu. Po spálení a předání tepla spalin ve výměnících parního cyklu následuje separace popelovin a rozdělení proudu spalin na výstup a recirkulaci. Následně, separační technologie SCR přemění oxidy dusíku ze spalin na dusík. Výstupní spaliny poté pokračují do separačních a čistících procesů, kde je nutné ze spalin odstranit vodu a nekondenzovatelné plynné složky, protože by při výsledné separaci kapalného CO₂ kryogenní separací ze spalin docházelo k namrzání v důsledku přítomnosti vody a snižování čistoty výstupního plynu vlivem vmísených nekondenzovatelných složek a nezreagovaných zbytků amoniaku z SCR.

Kapalný CO₂ z čistícího procesu a dříve získaný vodík je využit v metanizačním reaktoru při syntéze SNG ve formě velmi čistého metanu CH₄. Takto vzniklý metan je připravený pro zásobování přímo do plynovodů nebo je možné jeho uskladnění v místě výroby a následný transport na místo využití.



Obr. 27 - Přehledové schéma procesu.

6.4.1 Elektrolyzátor



Obr. 28 - Simulační schéma PEM elektrolyzátoru vody.

Celek elektrolyzátoru s polymerní membránou (PEM), na obrázku 28, představuje jeden z hlavních vstupů do technologie. Vstupní voda (W-FEED) musí být řádně upravena v úpravně vody, která musí být součástí každého takového zařízení, které vyžaduje vysoké nároky na pracovní média. Voda vstupuje do směšovače, který mísí vstupní vodu s recirkulovanou, také vyčištěnou vodou (RECWATER) separovanou z výstupních plynů. Voda je dále tlakována čerpadlem (W-F-PUMP) a předehřívána odběrem z výstupu výparníku proudem (FW-3B), který ohřívá vodu na 80 °C a ochlazuje se na proud (FW-3B-C). Elektrolyzátor představuje stechiometrický reaktor (PEM) v němž probíhá rozklad vody dle schématu pro PEM články na obrázku 12. Výstupní proud (PEM-OUT) je pouze pomocný proud směsi vody, vodíku a kyslíku, který směřuje do bloku (PEM-SEP) představující elektrody samotné. Na elektrodách dochází k separaci výstupních plynů podle stechiometrie s 95% konverzí vody, která je odloučena v separátorech každého z proudů dále. Výstupem je separovaná voda, jež je odváděna do nádrže (RW-TANK), čistý vodík odváděný do nádrže (H2-STRG) a čistý kyslík v nádrži (O2-STRG). V tabulce 5 je uveden přehled vybraných proudů z bloku elektrolyzátoru, které nejsou závislé na výkonu.

Parametry bloku elektrolyzátoru									
Proud	W-FEED	W-FEED-M	W-30BAR	W30T80	H2-STRG	O2-STRG	RECWATER	FW-3B	FW-3B-C
Tlak [bar]	1	1	30	30	30	30	1	80	80
Teplota [°C]	15,00	18,28	18,38	80	80	80	80	294,18	33,29

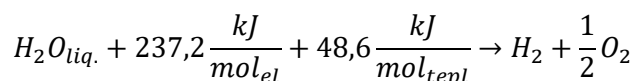
Tabulka 5 - Základní parametry bloku elektrolyzátoru.

6.4.2 Dimenzování elektrolyzéro

Pro modelový systém bude nutné zvážit několik parametrů při dimenzování velikosti, výkonu a dalších parametrů elektrolyzéro. Vzhledem k tomu, že elektrolyzér představuje pravděpodobně nejdůležitější technologický celek, který je potřeba napájet obnovitelnými zdroji, je zvolena možnost použít jako vstupy do modelu existující průmyslový elektrolyzér a podle něj dimenzovat celý model. Obecně z hlediska materiálové a energetické náročnosti procesu můžeme orientačně popsat spotřebu na výrobu 1 kg vodíku a 8 kg kyslíku je potřeba 9 litrů demineralizované vody, tedy v průmyslu nejčistší varianty vody a přibližně 50 kWh elektrické energie při uvažování účinnosti elektrolyzéro 78%. [52]

V reálném provozu je další provozní zátěží demineralizovaná voda, jelikož není možné použít běžnou, ani destilovanou vodu. Důvodem je, že i malé množství jakýchkoliv minerálních příměsí ve vodě by mělo na následek rychlé zanesení elektrolyzéro vzniklými solemi. Demineralizovanou vodu je nutné vyrábět na místě čišěním vody nebo je potřeba ji externě zásobovat. Čišěcí kolona na vodní hospodářství je další provozní zátěží systému, ale je pro chod nezbytná. Ta ovšem nebude ve výpočtové simulaci zahrnuta, neboť to není hlavním tématem této práce. Samozřejmostí je také maximalizace zpětného využití odpadní vody za účelem minimalizace spotřeby vody v systému. [52]

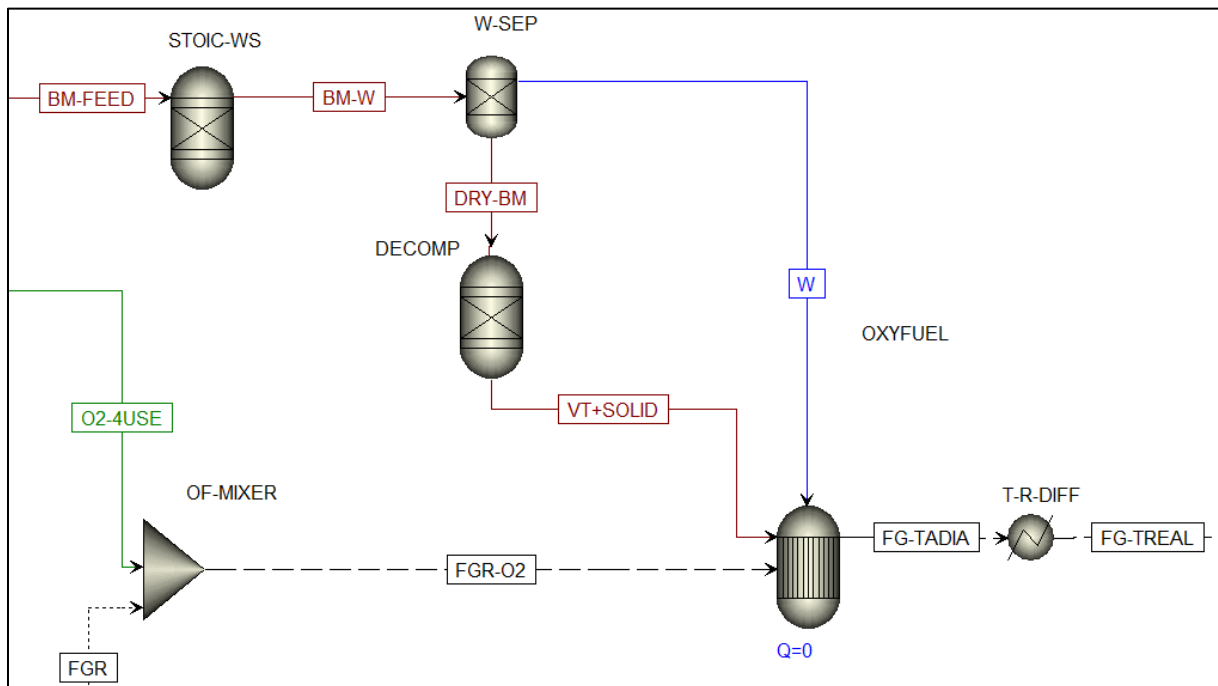
Pro názornost lze elektrolytický rozklad vody prezentovat energetickou bilancí dle rovnice 18: [53]



Rovnice 17 - Rovnice energetické bilance elektrolyzy vody. (18)

Samotná reálná spotřeba elektrické energie je uváděna v technickém listu konkrétního elektrolyzéro a je udávána v kWh na jednotku vyrobeného Nm^3 plynu. Průměrná spotřeba konkrétního, použitého elektrolyzéro NEL M2000 je 4,5 kWh na produkovaný 1 Nm^3 vodíku. [54]

6.4.3 Oxyfuel



Obr. 29 - Simulační schéma zpracování a oxyfuel spalování biomasy.

Oxyfuel systém na obrázku 29 spalující dřevní pelety, sestává ze tří vstupů do kotle. První vstup je kyslík, který je dávkován podle potřeby z proudu (O2-4USE) a je mísen s druhým vstupem recirkulovaných spalin, které jsou přiváděny z ventilu umístěného za výměníky tepla vycházejícího z kotle. Tím se tvoří směs (FGR-O2) o určitém poměru O₂ : CO₂, který může být běžně v rozsahu od 12% : 88% do 36% : 64%. Hlavní přívod paliva (BM-FEED) představuje biomasu o konkrétním prvkovém složení, které je v programu Aspen představováno zadáním obsahu: C, H, O, N, S, Cl, popelovin, vázaného uhlíku, těkavé složky paliva a vlhkostí paliva. Biomasa a popel jsou v programu Aspen definovány dle databáze programu, kdy složení popelovin je generováno podle zadaných parametrů při definování biomasy. Obě složky jsou v programu jako nekonvenční látky, tzn. vyžadují zadávání prvkových zastoupení. Dále je nutné provozovat simulaci v režimu MIXNC, který umožňuje reaktorům práci s nekonvenčními látkami. [36]

Podle druhu spalovaného paliva a výkonů kotle by reálný kotel pro tuto aplikaci byl kotel fluidní. Z toho vyplývá provozní omezení z hlediska teploty spalování, kdy je při všech dále v práci popisovaných scénářích provozu udržováno teplotní okno pro spalování 840 – 860 °C.

Z biomasy je nejprve odstraněna voda v procesu sušení stechiometrického reaktoru (STOIC-WS) a v separátoru (W-SEP) je vodní složka oddělena od sušiny biomasy. Vodu je nutné oddělit, neboť následující nestechiometrický reaktor (DECOMP), který rozkládá biomasu na prchavé látky a pevný uhlíkatý zbytek, by vodu zpětně rozložil na vodík a kyslík.

Za reaktorem (DECOMP) je již biomasa konvertována na konvenční látky, pevný uhlík a nekonvenční popeloviny, které se spolu s vodní složkou paliva a směsí kyslíku s recirkulovanými spaliny mísí v reaktoru typu Gibbs, (OXYFUEL) za průběhu reakcí níže:

- $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$
- $2H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2H_2O_{(g)}$
- $N_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{(g)}$
- $H_2O_{(l)} \rightarrow H_2O_{(g)}$

Rovnice 18 - Reakce probíhající při spalování. [55]

(18)

Parametry bloku oxyfuel								
Proud	BM-FEED	VT+SOLID	W	O2-4USE	FGR	FGR-O2	FG-TADIA	FG-TREAL
Tlak [bar]	1	1	1	30	1	1	1	1
Teplota [°C]	15,00	400,00	15,00	80,00	78,00	75,80	1180,00	850,00

Tabulka 6 – Základní parametry oxyfuel bloku.

V tabulce 6 jsou uvedeny základní parametry oxyfuel bloku. Je důležité říci, že adiabatická teplota, reálná teplota spalování a teplota recirkulačního proudu se mohou mírně lišit v řádu jednotek stupňů podle nastavení systému pro různé scénáře popsané dále v práci. Spalovací komora (OXYFUEL) je nastavena na adiabatický režim, tedy nedochází zde k žádné tepelné výměně s okolím. Toto nastavení slouží k zisku adiabatické teploty plamene na výstupu z reaktoru v proudu (FG-TADIA). Rozdíl mezi adiabatickou teplotou a reálnou teplotou reprezentuje blok (T-R-DIFF), na jehož výstupu vycházejí spaliny o reálné teplotě v proudu (FG-TREAL) do bloku parního okruhu. Reálná teplota odcházejících spalin je vypočtena podle rovnice 19 dostupné z [40]. Parametry M , a_0 a B_0 jsou zvoleny $M = 0,6$, $a_0 = 0,8$ a $B_0 = 2$ z důvodu, že kotel existuje pouze v simulaci, a proto není možné parametry přesně spočítat.

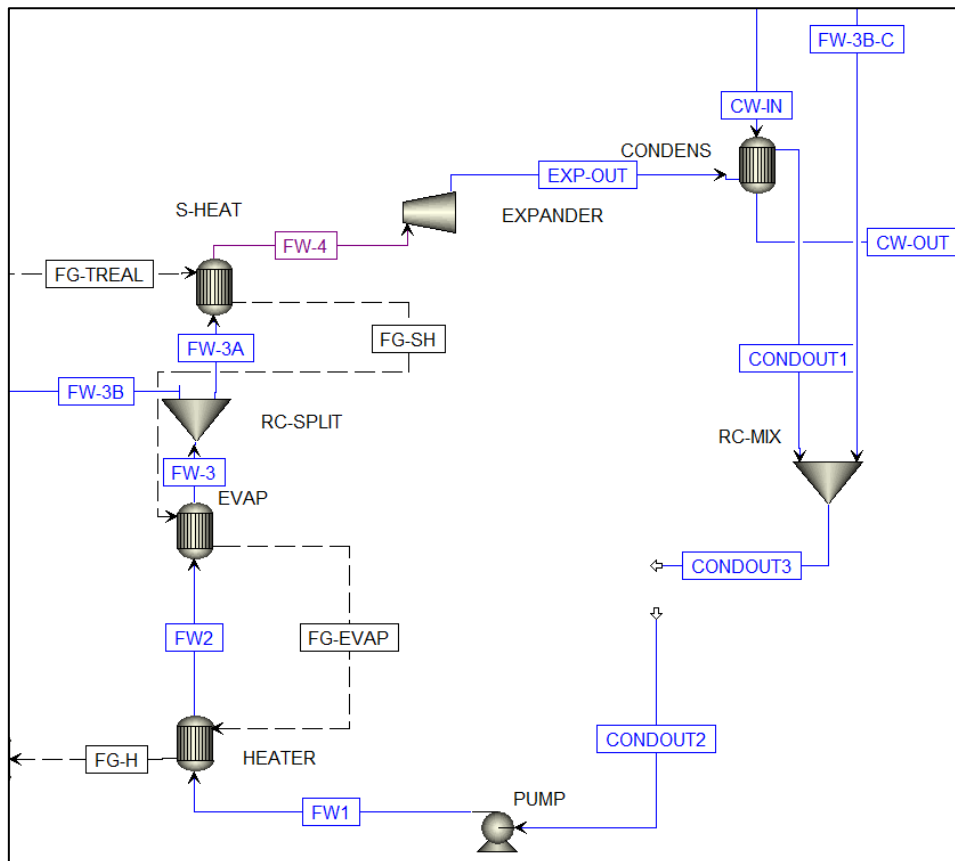
$$t_{spal} = \frac{T_{ad} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Rovnice 19 - Výpočet reálné teploty spalín.

(19)

Podle spalovaného paliva a maximálního množství příkonu v palivu je nejvhodnější použít fluidní oxyfuel kotel a je nutné udržovat spalovací teplotu ideálně při 850 °C.

6.4.4 Parní cyklus



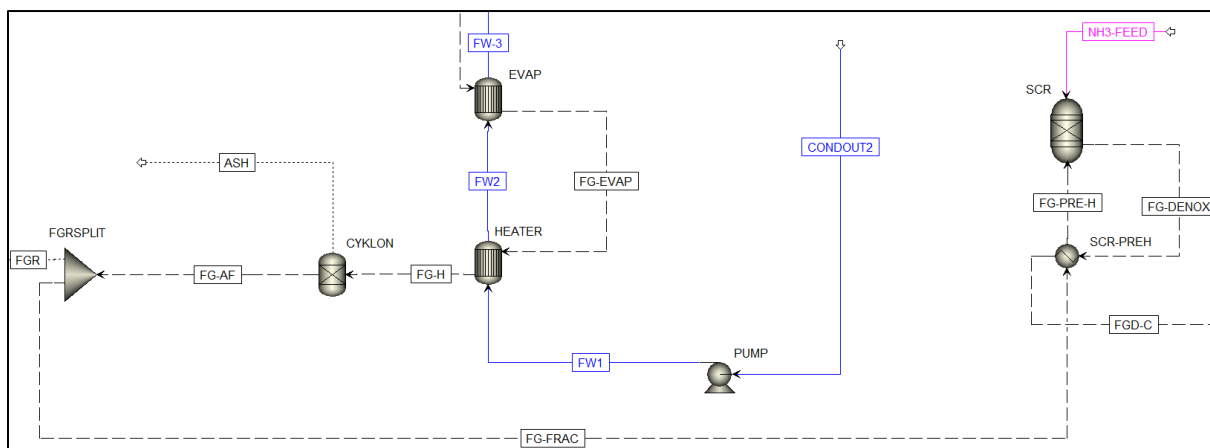
Obr. 30 - Simulační schéma parního okruhu pro využití tepla spalín.

Parametry bloku RC								
Proud	FW-1	FW-2	FW-3A	FW-3B	FW-4	EXP-OUT	FW-3B-C	W-2-COND
Tlak [bar]	80	80	80	80	80	0,04	80	0,04
Teplota [°C]	28,3	294,2	294,2	294,2	320	32,2	33,3	32,2
Parametry bloku RC								
Proud	CON-DOUT1	CON-DOUT2+3	CW-IN	CW-OUT	FG-TREAL	FG-SH	FG-EVAP	FG-H
Tlak [bar]	0,04	0,04	1	1	1	1	1	1
Teplota [°C]	27,8	28	15	29,34	850	832	457	78,3

Tabulka 7 – Základní parametry parního RC cyklu, využití tepla spalín a chladicího okruhu.

Výstupní proud ze spalování (FG-TREAL) směřuje do teplosměnných ploch kotle, které reprezentují protiproudý ohřívák (HEATER), výparník (EVAP) a přehřívák (S-HEAT). V nich se předává teplo spalín vodě / páře, která pohání modelovou turbínu. Za výstupem z výparníku je veden odvod 3% hmotnostního průtoku pro ohřev napájecí vody do elektrolyzáru. Ten se ochlazený připojuje zpět za kondenzátorem. Výstupní proud z turbíny se chladí v kondenzátoru (CONDENS) chladicí smyčkou reprezentovanou proudy (CW-IN) a (CW-OUT). Kondenzát dále směřuje do napájecího čerpadla (PUMP) a uzavírá cyklus. Ochlazené spaliny vystupují z ohříváku jako proud (FG-H). V tabulce 7 jsou uvedeny základní parametry parního oběhu z obrázku 30. Je důležité zmínit, že turbína je pouze simulační model, který neuvažuje výkonová a provozní omezení reálných turbín. Jedním z těchto parametrů je poměrně nízká kvalita emisní parovodní směsi $Q=0,77$, což je na hraně běžně používaných emisních parametrů parních turbín. Pro oběh byla dle výkonu zvolena turbína Siemens D-H RHL. Parní cyklus pracuje s pevně nastavenými parametry admisní páry s proměnným průtokem vody uzavřeným okruhem a chladicí voda s procesní vodou je uvažována jako systém s maximální možnou recyklací vody. [56]

6.4.5 FGR + SCR



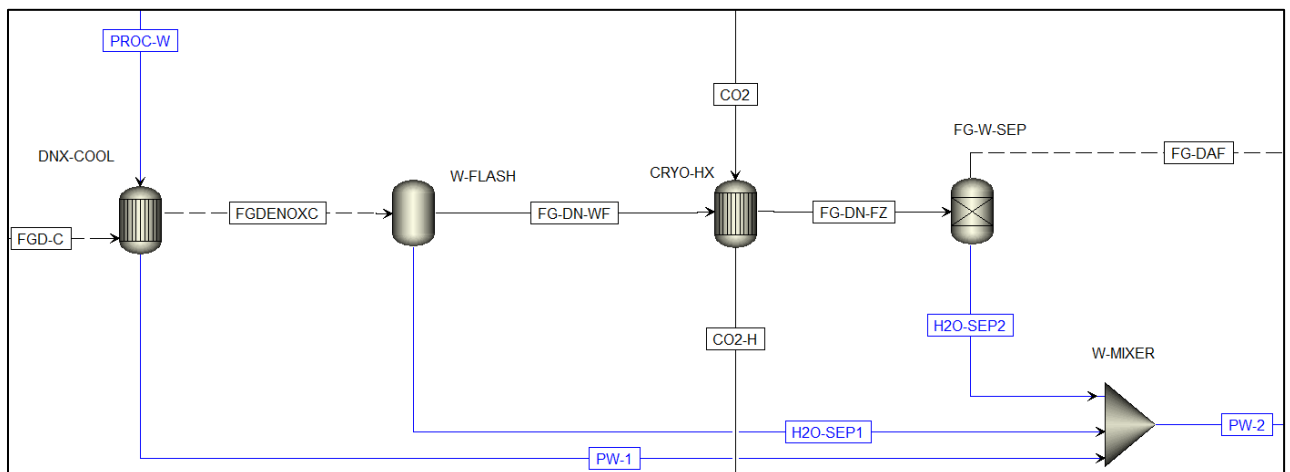
Obr. 31 - Simulační schéma FGR ventilu a vstupu do SCR technologie.

Parametry bloku FGR+SCR								
Proud	FG-AF	ASH	FGR	FG-FRAC	FG-PRE-H	NH3-FEED	FG-DENOX	FGD-C
Tlak [bar]	1	1	1	1	1	1	1	1
Teplota [°C]	78,00	78,00	78,00	78,00	330,00	15,00	350,00	89,00

Tabulka 8 - Základní parametry bloku FGR + SCR

Bloková část FGR + SCR na obrázku 31 má zmíněné orientační parametry v tabulce 8. Zvýšení teploty spalin proudu FG-DENOX je způsobeno ohřevem v bloku SCR na pracovní teplotu katalytické reakce. Za výstupem z ohříváku vystupují ochlazené spaliny do bloku (CYKLON) simulujícímu technologii odlučování popelovin ze spalin. Proud (FG-AF) se dále rozděluje v bloku (FGRSPLIT), který se stará o rozdělení proudu zpět do spalování a minoritní částí dále do denitrifikační technologie. Poměr recirkulovaných spalin vůči výstupním je určen parametrem „r“ dle rovnice 14 na základě požadavku na teplotu spalování. Následně se spaliny mísí ve stechiometrickém reaktoru (SCR) s redukčním činidlem (amoniak – NH₃) a vystupují jako proud (FG-DENOX), který neobsahuje žádné oxidy dusíku, ani mírné přebytky redukčního činidla a dusík. Tato reakce vyžaduje zvýšenou teplotu, kterou si reaktor (SCR) zajišťuje vyjádřením potřeby přívodu tepla ve výsledné energetické bilanci. Výstupní proud (FG-DENOX) slouží ve výměníku (SCR-PREH) k předehřátí spalin, kde byl nastaven minimální teplotní rozdíl na horké straně výměníku 20 °C. Tímto se regeneruje teplo a výrazně se snižuje dodatečné teplo přidávané přímo v SCR reaktoru a jsou chlazené výstupní spaliny (FGD-C).

6.4.6 Dochlazení spalin a separace vody



Obr. 32 - Simulační schéma separace vody ze spalin.

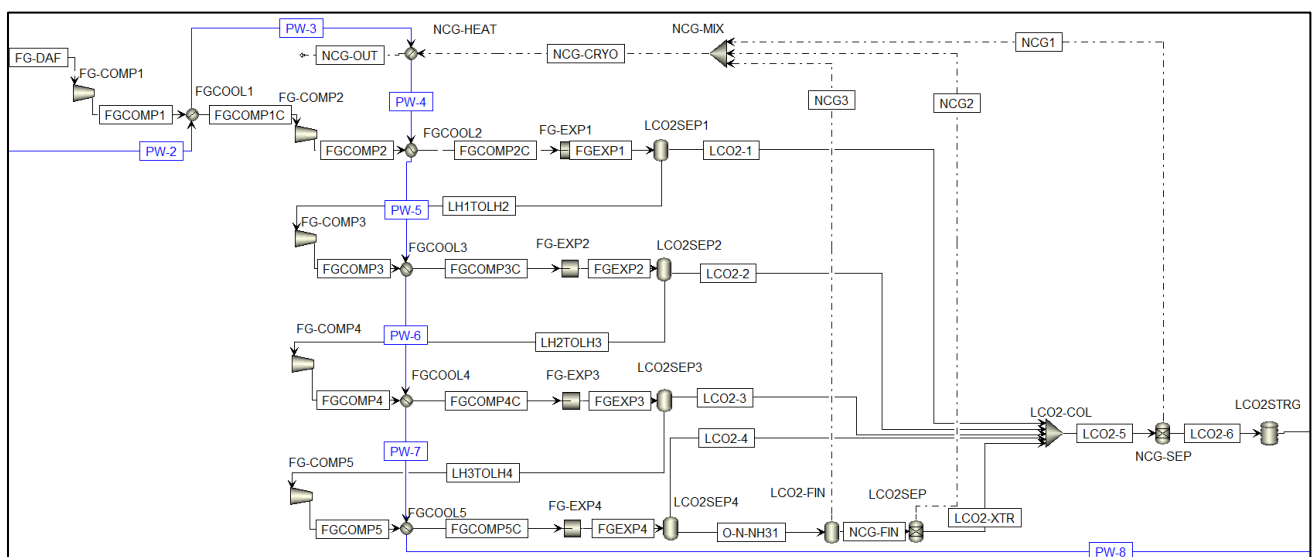
Po výstupu z SCR technologie je nutné vystupující proud spalin (FGD-C) opět ochladit. K tomu slouží vstupní procesní voda (PROC-W), která ochlazuje proud spalin před vstupem do separátoru (W-FLASH), ve kterém se separuje kapalná fáze (voda) a plynná fáze proudu spalin. Tato separace ale není 100%, jelikož se spaliny neochlazují dostatečně ke kompletní kondenzaci vodní páry. Vzniká tak přechodný proud spalin (FG-DN-WF) obsahující přibližně 10% původního obsahu vody. Tato voda projde kryogenním výměníkem (CRYO-HX), kde je

voda zmrazena proudem kapalného CO₂ z výstupu kryogenní separace popsané dále. Dochází tak k určité formě rekuperace energie, protože je nutné kapalný CO₂ ohřát a převést do plynné fáze. Proud spalin je ochlazen na teplotu tuhnutí vody a v separátoru (FG-W-SEP) dochází k finální separaci zbytkové vody. Výsledný proud vycházející z této části (FG-DAF) již neobsahuje vodu a reprezentuje suché spaliny bez NO_x. Separovaná voda se z proudů (PW-1, H2O-SEP1 a H2O-SEP2) mísí v kolektoru (W-MIXER) a postupuje dále do systému kryogenní separace. V tabulce 9 dále jsou uvedeny parametry bloku dochlazení spalin a separace vody z obrázku 32. Díky využití části chladu uloženého v kapalném CO₂ lze snížit následnou potřebu ohřevu procesní vodou před metanizační reakcí a odmražením vody lze získat spolehlivě suché spaliny bez obsahu vody.

Parametry dochlazení a separace						
Proud	FGD-C	FG-DENOX-C	FG-DN-WF	FG-DN-FZ	FG-DAF	PROC-W
Tlak [bar]	1	1	1	1	1	1
Teplota [°C]	89,00	40,00	40,00	0,00	0,00	15,00
Proud	PW-1	H2O-SEP1	H2O-SEP2	PW-2	CO2	CO2-H
Tlak [bar]	1	1	1	1	1	1
Teplota [°C]	23,70	40,00	0,00	24,00	-109,00	-88,00

Tabulka 9 - Parametry bloku dochlazení spalin a separace vody.

6.4.7 Kryogenní separace



Obr. 33 - Simulační schéma Linde-Hampson metody zkapalňování plynů.

Na obrázku 33 je znázorněn model kryogenní separace. Hlavním účelem tohoto zařízení je separovat zbytky amoniaku z SCR denitrifikace a oddělit oxid uhličitý v kapalné formě od

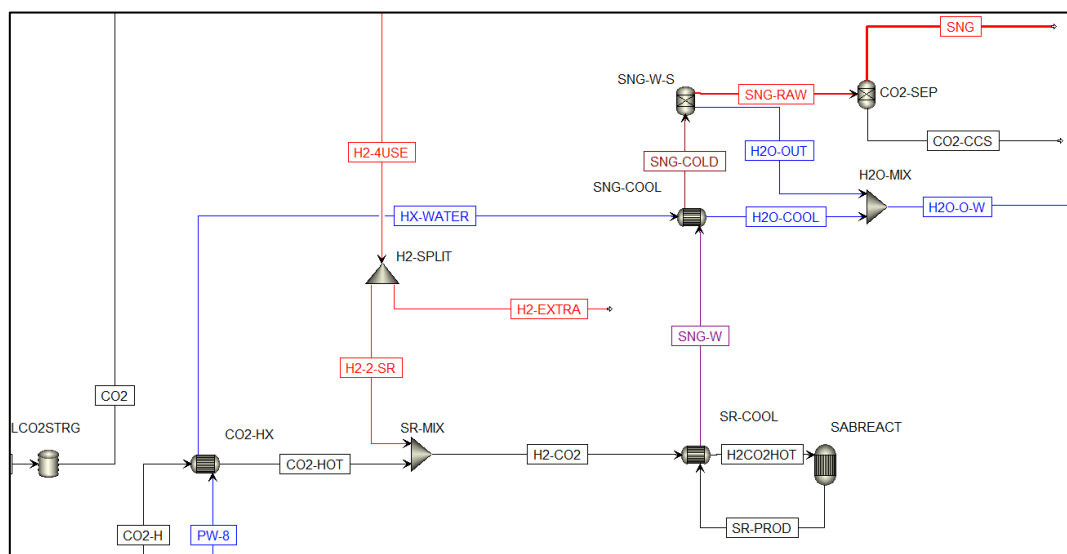
nekondenzovatelných plynů (O₂ a N₂) obsažených ve spalinách. Dusík pochází z SCR technologie a kyslík je přebytekový z oxyfuel spalování.

Pro zkapalnění CO₂ byla použita technologie Linde-Hampson [51], ve které se proud spalin stlačuje na tlak 200 bar s mezichlazením procesní vodou a následně expanduje v expanzním ventilu na tlak 1 bar. Po expanzi dojde k prudkému ochlazení proudu spalin za vzniku kapalného CO₂ a odseparování plynných složek pomocí flash separátorů (LCO2SEPx). Tento postup se kaskádovitě opakuje, dokud nedojde k téměř kompletní separaci kapalného CO₂ z proudu spalin. Každá kaskáda pracuje s menším průtokem spalin, a proto je také spotřeba energie pro vykonání kompresní práce v každé kaskádě menší. Separované nekondenzovatelné plyny se odvádí do sběrnice (NCG-MIX) a jsou ohřáty ve výměníku (NCG-HEAT). Separovaný kapalný oxid uhličitý se odvádí do sběrnice (LCO2-COL) a pokračuje dále do dočasné kryogenní nádrže (LCO2STRG). Proudění procesní vody (PW-2 až PW-8) slouží k chlazení mezi kompresemi plynu. V tabulce 10 jsou uvedeny vybrané parametry bloku kryogenní separace.

Parametry kryogenní separace							
Proud	FG-DAF	LCO2-1	LCO2-2	LCO2-3	LCO2-4	LCO2-5	NCG-CRYO
Tlak [bar]	1	1	1	1	1	1	1
Teplota [°C]	0,00	-93,00	-96,00	-98,00	-102,00	-110,00	-180,00
Proud	FG-COMP1	FG-COMP1-C	FG-COMP2	FG-COMP3	FG-COMP4	FG-COMP5	LCO2-XTR
Tlak [bar]	20	20	200	200	200	200	1
Teplota [°C]	392,60	40,00	306,40	462,80	466,20	471,50	-94,50
Proud	PW-2	PW-3	PW-4	PW-5	PW-6	PW-7	PW-8
Tlak [bar]	1	1	1	1	1	1	1
Teplota [°C]	26,00	29,50	29,00	33,30	37,60	40,60	43,00

Tabulka 10 - Vybrané parametry kryogenní separace.

6.4.8 Metanizace



Obr. 34 - Simulační schéma metanizace a separace produktů.

Proces metanizace z obrázku 34 je následující: kapalné CO₂ o velmi nízké teplotě není vhodné pro metanizační reakci, proto je nutné převést oxid uhličitý zpět do vyšších teplot a do plynného skupenství. K tomu je využita ohřátá procesní voda ze zkapalňovací technologie. Ve směšovači (SR-MIX) se mísí ohřátý oxid uhličitý (CO₂-HOT) s vodíkem z prvního bloku elektrolyzáru. Vodík prochází rozdělovačem (H₂-SPLIT), aby bylo možné řídit množství vodíku vstupujícího do metanizačního reaktoru. Směs vodíku a CO₂ se ohřeje v regeneraci tepla z výstupu z metanizace a vstupuje do reaktoru typu Gibbs (SABREACT), kde probíhá metanizační Sabatierova reakce podle rovnice 16. Parametry bloku metanizace jsou uvedeny v tabulce 11 níže. [47]

Parametry bloku metanizace							
Proud	PW-8	HX-WATER	H ₂ O-COOL	H ₂ O-OUT	H ₂ O-O-W	CO ₂ -H	CO ₂ -HOT
Tlak [bar]	1	1	1	1	1	1	1
Teplota [°C]	43,00	39,40	54,00	45,00	53,80	-88,00	25,00
Proud	H ₂ -CO ₂	H ₂ -CO ₂ HOT	SR-PROD	SNG-W	SNG-COLD	SNG	
Tlak [bar]	1	1	10	10	10	10	
Teplota [°C]	61,60	185,00	370,00	223,00	45,00	45,00	

Tabulka 11 - Parametry bloku metanizace

Výstupní proud je nutné dále dochladiť procesní vodou ve výměníku (SNG-COOL) a v kondenzátoru (SNG-W-S) separovat vodu. Poslední je separace nezreagovaného CO₂ od CH₄ pomocí membránové separace prezentované blokem (CO₂-SEP). Membránová separace může

zpravidla probíhat na dvou základních typech polymerních membrán, porézních a neporézních. Zjednodušený princip separace je následující: Směs plynů z výstupu z metanizace po kondenzaci a separaci vodní páry je veden na polymerní membránu. Ta umožňuje difúzi skrze její molekulární strukturu pouze oxidu uhličitému nikoliv methanu. Tímto způsobem jsou oba plyny separovány. Pro zásobování sítě zemním plynem z této technologie bude určující tzv. Wobbeho index (W_s^0), který dovoluje porovnávat zemní plyn různého původu a při blízké podobnosti Wobbeho čísla obou směsí je možné plyny mísit bez nutnosti přenastavení spotřebičů. Ten pro čistý SNG (100% CH₄) vychází podle [57]: $W_s^0 = 48494 \text{ kJ/m}^3$. Ve výstupní směsi je přibližně 2,5x více CO₂ než CH₄ a Wobbeho index pro tuto směs vychází $W_s^0 = 18631 \text{ kJ/m}^3$, a proto není možné tuto směs smísit se standardním zemním plynem. CO₂ se buďto může skladovat technologií CCUS nebo vypouštět jako spaliny do ovzduší. Výstupní proud SNG je hlavní produkt této technologie a je směsí čistého methanu (CH₄) s malým nebo ideálně nulovým zastoupením vodíku podle nastavení provozního režimu technologie. [58]

7 Simulace modelových scénářů

7.1 Úvod k simulacím scénářů

Výše popsaný simulační model byl využit pro znázornění chování systému při různých provozních podmínkách a nárocích na vstupy, či výstupy technologie. Níže jsou formou tabulek prezentovány výsledky pěti simulačních scénářů z hlediska energetické a látkové bilance vybraných komponent, kterými jsou:

- množství napájecí vody do elektrolyzáru
- přívod paliva
- vlastní spotřeba systému
- spotřeba amoniaku
- spotřeba procesní
- spotřeba chladicí vody
- recirkulační poměr
- poměr O₂ / CO₂ na vstupu do oxyfuel spalování
- množství zbytkového vodíku
- množství zbytkového kyslíku
- množství zbytkového oxidu uhličitého

- výstup SNG
- výroba parního cyklu
- akumulční příkon
- množství vyrobeného SNG na akumulovanou MWh
- účinnost akumulace elektrické energie do paliva

Jako jeden z parametrů technologie byl definován akumulční příkon ukazující maximální schopnost systému akumulace elektrické energie do paliva podle rovnice 20 níže a určuje tak množství energie, které je konvertováno do paliva při získané hodinové produkci SNG, resp. vyrobené množství SNG na akumulovanou MWh dle rovnice 21.

$$P_{aku} = P_{PEM} + P_{komp} + P_{ohřev} - P_{PC} [MW]$$

Rovnice 20 - Výpočet akumulčního příkonu. (20)

$$m_{SNG_aku} = \frac{Q_{SNG}}{P_{aku}} \left[\frac{kg_{SNG}}{MWh_{aku}} \right]$$

Rovnice 21 - Výpočet množství vyrobeného paliva z MWh energie. (21)

Celková účinnost systému je pak definovaná podle výhřevnosti vyrobeného paliva (CH₄) v MJ/kg a množství vyrobeného paliva na jednu MWh podle rovnice 22.

$$\eta_{aku} = \frac{\left(\frac{Q_{i,m_SNG}}{3600} \right)}{\left(\frac{1}{m_{SNG_aku}} \right)} [-]$$

Rovnice 22 - Výpočet účinnosti systému (22)

Rovnice 20 zároveň vyjadřuje aktuální možnou příkonovou kapacitu celého systému se započítáním vlastní spotřeby i výroby pro případ, že by systém nebyl napájen vlastními OZE zdroji, ale byl by provozován v režimu poskytování výkonové rovnováhy. Vzhledem k simulační povaze práce nejsou bloky oxyfuel kotle ani turbíny výkonově omezeny a jsou přizpůsobovány podle zaměření jednotlivých scénářů, tedy není zde respektován konkrétní minimální a maximální výkon kotle a turbíny. Obě technologie tak pouze reagují na příkon v palivu a uvažuje se tedy jejich možný provoz v té dané výkonové hladině.

7.2 Modelové scénáře

Všechny níže popsané scénáře pracují s níže uvedenými, vstupními parametry dle tabulky 12.

Sledovaný parametr	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Jednotka
Scénář č.	1	2	3	4	5	
Napájecí voda elektrolyzéro	158	1580	1580	790	1580	kg/h
Množství paliva	90	900	900	575	1150	kg/h
Spotřeba elektrolyzéro	0,76	7,64	7,64	3,82	7,64	MW

Tabulka 12 - Vstupní parametry pro modelové scénáře

- Scénář č.1 – Provoz při minimálním provozním výkonu elektrolyzéro

Pro scénář č.1 byl systém nastaven na minimální výkon elektrolyzéro. Palivo je dávkováno dle stechiometrie a podle kyslíku. Ostatní komponenty a proudy pracovních médií se dimenzují ke splnění látkových a energetických bilancí. Tabulka v Kapitole 7.5 níže uvádí vybrané sledované parametry vstupů a výstupů do / ze systému.

- Scénář č.2 – Provoz při maximálním provozním výkonu elektrolyzéro

Scénář maximálního výkonu elektrolyzéro je obdobou scénáře č.1 s tím rozdílem, že elektrolyzéro je nastaven na maximální výkon. Na základě výstupu kyslíku z elektrolýzy je dávkováno palivo v maximálním možném množství, aby bylo dosaženo minimálního zbytkového množství kyslíku v odchozích spalínách za stálého udržení teplotního okna pro fluidní spalování. Ostatní provozní parametry se přizpůsobují výstupu z oxyfuel spalování a množství a složení spalin vystupujících z recirkulační smyčky.

- Scénář č.3 – Provoz s maximalizací využití H₂ a produkcí SNG

Provozní režim s maximalizací využití vodíku pro metanizaci byl realizován úpravou parametrů Gibbsova reaktoru (SABREACT), který řídí metanizační reakci tím způsobem, že byl zadán požadavek na nalezení chemické a fázové rovnováhy při ideálně nulovém výstupním proudu vodíku. Tento režim byl realizován na bázi scénáře č.2, tedy při maximálním výkonu elektrolyzéro pro zjištění maximální výrobní kapacity SNG v podobě čistého methanu CH₄, nezreagovaného CO₂ a vody.

- Scénář č.4 - 5 – Provoz s maximálním využitím kyslíku a vodíku na 50% a 100% výkonu elektrolyzéro

Režim provozu s maximálním využitím obou technických plynů je navržen tak, aby bylo maximalizováno využití kyslíku i vodíku během celého procesu. Výkonová kapacita elektrolyzéro je ve scénáři č.4 50% nominálního výkonu a ve scénáři č.5 100%. Množství využitého kyslíku je řízeno úpravou množství paliva a recirkulačního poměru k udržení spalovací teploty relevantní pro zvolený typ spalování. Scénář č.4 byl vytvořen se stejným nastavením jako scénář 5, aby byly prezentovány menší, realizovatelnější výkony tohoto akumulčního zařízení. Reálně by se parametry nepohybovaly takto lineárně a vznikla by určitá nelinearita mezi výkony scénářů 4 a 5.

7.3 Diskuse a rozbor výsledků scénářů

7.3.1 Látkově - energetické bilance systému

Výsledky vybraných parametrů z jednotlivých scénářů jsou uvedeny v tabulce 13 a na obrázcích níže.

Sledovaný parametr	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Jednotka
Scénář č.	1	2	3	4	5	
Napájecí voda elektrolyzéro	158	1580	1580	790	1580	kg/h
Množství paliva	90	900	900	575	1150	kg/h
Spotřeba elektrolyzéro	0,76	7,64	7,64	3,82	7,64	MW
Spotřeba pro kompresní práci	0,086	0,859	0,859	0,377	0,754	MW
Spotřeba k ohřevu	0,007	0,065	0,064	0,020	0,040	MW
Spotřeba amoniaku	0,43	4,29	4,29	1,93	3,86	kg/h
Potřeba chladicí vody	14400	126000	126000	81000	162000	kg/h
Potřeba procesní vody	3600	36000	36000	18000	36000	kg/h
Recirkulační poměr "r"	4	4	4	5	5	-
Poměr O ₂ /CO ₂ na vstupu do oxyfuel	29/71	29/71	29/71	14/86	14/86	-
Zbytkový, výstupní vodík	0,47	4,68	0	0	0	kg/h
Zbytkový, výstupní kyslík	33,3	333,4	333,4	18,2	36,3	kg/h
Zbytkový, výstupní oxid uhličitý	57,8	577,6	552,0	435,3	870,5	kg/h
Výstup SNG	34,2	342,4	351,8	175,9	351,8	kg/h
Výroba elektřiny v parním cyklu	0,106	1,006	1,006	0,692	1,383	MW
Akumulční příkon systému	0,751	7,559	7,559	3,505	7,011	MW

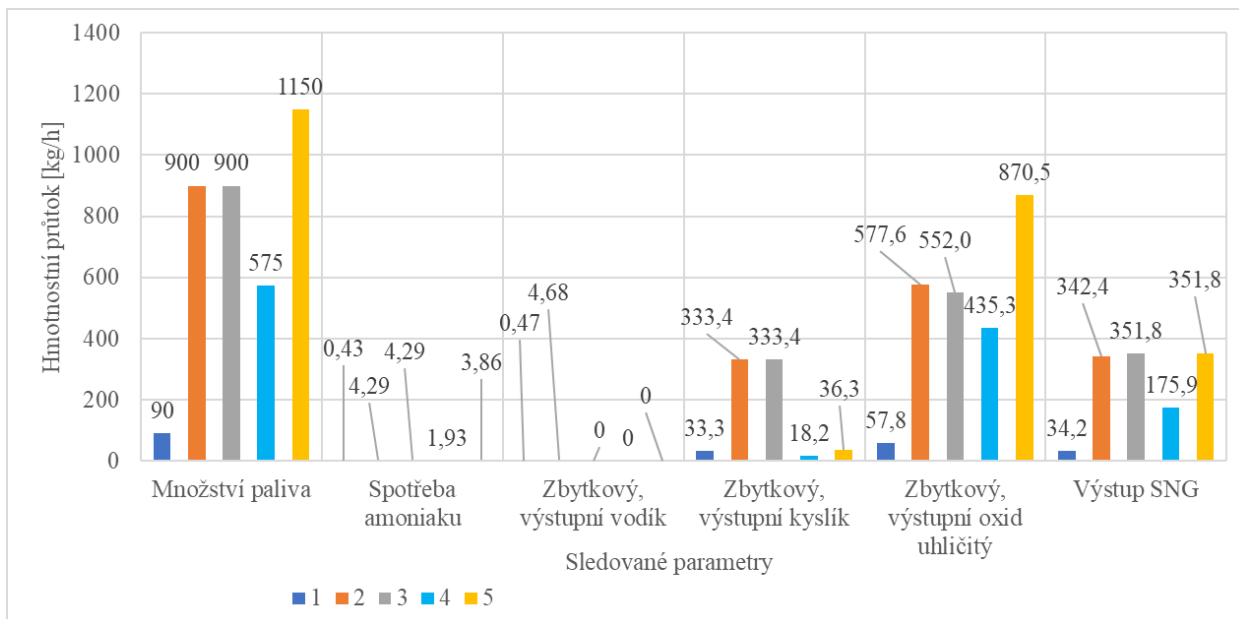
Sledovaný parametr	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Jednotka
Scénář č.	1	2	3	4	5	
Vyrobené SNG na akumulovanou MWh	45,59	45,30	46,53	49,87	49,87	kg/MWh
Účinnost akumulace	63,32	62,92	64,63	69,27	69,27	%

Tabulka 13 - Výpis vybraných parametrů modelových scénářů.

Tabulka výše popisuje základní přehled výše popsáných scénářů, kdy pro scénáře 1 – 3 je shodné nastavení recirkulačního poměru a poměru O_2 / CO_2 na vstupu do kotle. Z porovnání scénářů 1 a 2 je patrné, že zvýšení přívodu paliva a výkonu elektrolyzérů úměrně zvyšuje všechny návazné provozní parametry kromě účinnosti akumulace. Ta mírně klesá z důvodu mírného poměrového rozdílu výkonu parní turbíny, která ovlivňuje akumulací příkon systému.

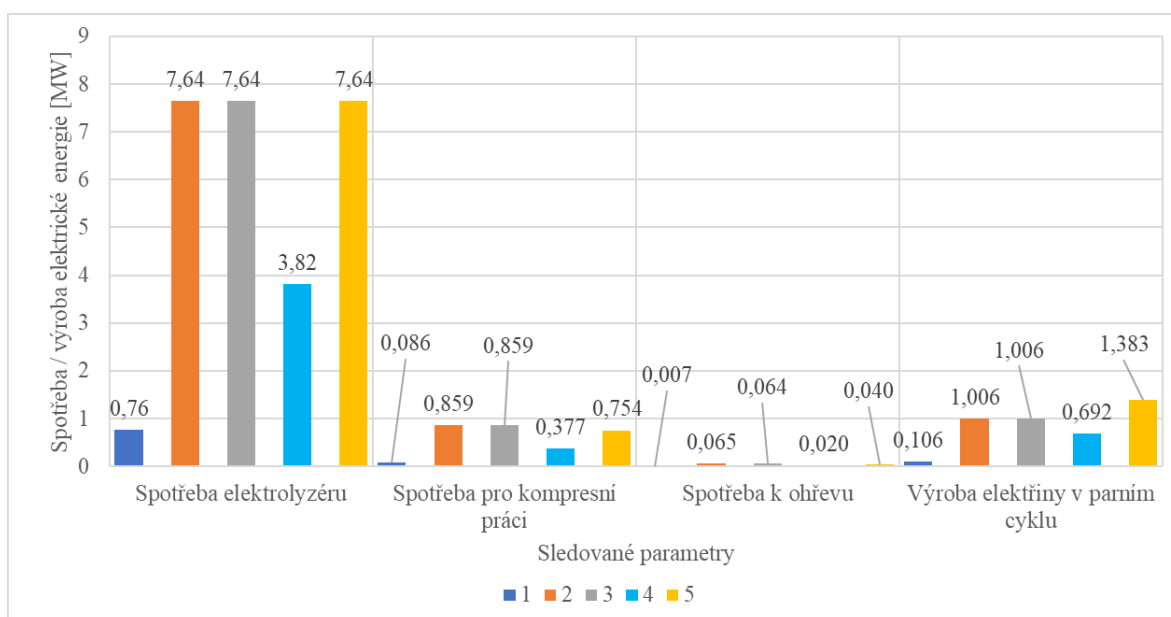
Z porovnání scénářů 2 a 3, které jsou oba simulovány při stejném maximálním výkonu elektrolyzérů, je patrný vliv na množství zbytkového vodíku, kyslíku a oxidu uhličitého na produkci SNG, výkon parního cyklu a akumulací příkon. Při maximalizaci využití vyrobeného vodíku dochází k vyšší konverzi CO_2 na SNG a zvýšení celkového vyrobeného množství SNG na akumulovanou MWh elektrické energie systému. Díky vyšší konverzi CO_2 při zachování stejného výkonu kotle nastává snížení emisí celkových emisí CO_2 při zachování stejného vlastního výkonu parního cyklu. Díky využití většího množství vodíku a tedy zvýšení výroby SNG ve scénáři 3, došlo k nárůstu akumulací účinnosti o 1,71%.

Při maximalizaci využití technických plynů ve scénářích 4 a 5 dochází ke změně recirkulačního poměru, jelikož maximalizace vpuštěného kyslíku do kotle dramaticky zvyšuje teplotu spalování. Díky zvýšení množství okysličovadla bylo možné zvýšit přívod paliva do kotle spolu s nutným zvýšením recirkulačního poměru ke snížení teploty a udržení se v teplotním okně pro fluidní spalování. To má za následek mírně sníženou spotřebu amoniaku v SCR technologii díky zmenšení průtoku spalin, téměř desetinásobné snížení množství nevyužitého kyslíku, pokles akumulací příkonu způsobený zvýšeným výkonem parního cyklu, ale mírné zvýšení výroby SNG na akumulovanou MWh díky snížení množství spalin do systému a tedy snížení kompresní práce a příkonu k ohřevu. Zvýšení vlastního výkonu parní turbíny má za následek snížení akumulací příkonu za stejné produkce SNG. Důsledkem je, že na vyrobení stejného množství SNG je potřeba méně energie a tedy účinnost akumulace stoupá o 4,64% oproti třetímu scénáři. Na obrázcích 35 – 38 níže jsou uvedeny přehledové grafy jednotlivých scénářů podle popisu výše.



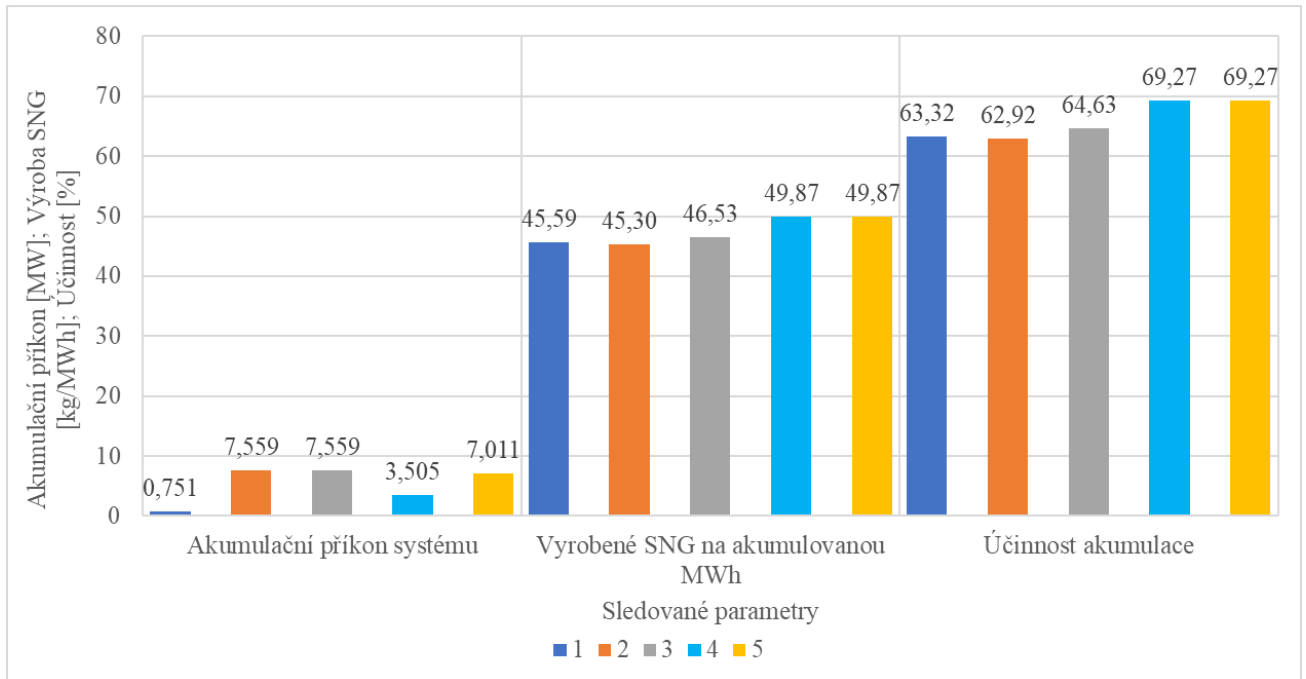
Obr. 35 - Analýza scénářů z hlediska látkových bilancí.

Na obrázku 35 je možné vidět hlavní látkové bilance jednotlivých scénářů. Je nutné dodat, že vysoké množství nevyužitého kyslíku ve scénářích 2 a 3 je způsobeno tím, že velká část vyrobeného kyslíku není vůbec vpuštěna do spalovacího procesu. Kyslíkový rozdělovač na výstupu z nádrže pro kyslík upouští přibližně 12% vyrobeného kyslíku do skladovacích nádrží, zbytek se separuje po procesu kryogenní separace. Je zajímavé, že scénář 1 a 5 mají obdobné velmi nízké zbytky kyslíku, i když se výkon obou scénářů liší 10x. Obrázek 36 ukazuje energetickou bilanci systému se zahrnutým recirkulačním poměrem pro jednotlivé scénáře. Při srovnání s tabulkou 13, konkrétně s parametrem vyrobeného SNG na akumulovanou MWh, je patrný velký vliv mírného snížení vlastní spotřeby na zvýšení akumulací schopnosti technologie i přes zvýšení vlastní výroby elektrické energie.

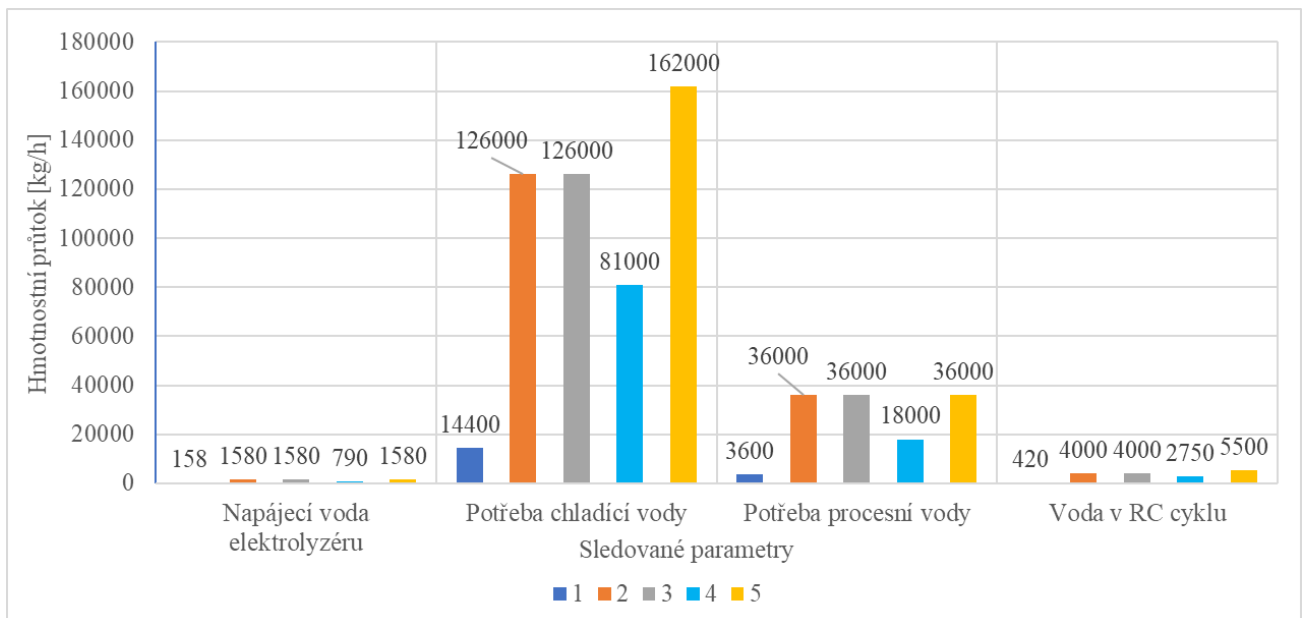


Obr. 36 - Analýza scénářů z hlediska energetických bilancí.

Obrázek 37 níže znázorňuje vztahy akumulčního příkonu do systému vyrobeného SNG na akumulovanou MWh a účinností systému. Hlavní nepřímá závislost je mezi akumulčním příkonem, ve kterém je zahrnuta vlastní spotřeba systému s odečtením vlastní výroby a účinností akumulace, která s klesajícím příkonem za stále výroby stoupá.



Obr. 37 - Akumulační bilance s účinností.



Obr. 38 - Analýza scénářů z hlediska vodního hospodářství.

Obrázek 38 popisuje vedlejší látkovou bilanci základního vodního hospodářství. Znázorňuje hodinové průtoky chladicí vody potřebné k chlazení výstupu z parní turbíny, procesní vody

sloužící pro lepší využití tepla v rámci systému a oběhové vody v parním RC cyklu. Chladicí i procesní voda vstupuje do systému o tlaku 1 bar při teplotě 15 °C. Maximální dovolené ohřátí chladicí vody je 30 °C při chlazení kondenzátu jdoucího do napájecího čerpadla na teplotu 28 °C. Procesní voda je voda využívaná ke snížení množství externích ohřevů systému. Její využití je následující: Prvně slouží k chlazení kondenzátoru spalin k separaci vody, dále slouží v systému kryogenního chlazení jako dochlazovací médium po kompresích suchých spalin. Poté je získané teplo využito ke zpětnému ohřátí zkapalněného CO₂ do plynné fáze. Posledním využitím je ochlazení výstupu SNG z metanizace. V reálném systému by byla voda dále zpětně využívána, čištěna a recyklována, což je zde uvažováno ve výsledné hodnotě spotřeby vody popsané v závěru práce, která je získána odečtením hodnoty výstupního proudu vody od vstupního. Tuto informaci je nutné sdělit, neboť v modelu je procesní voda vedena „průtokovým“ způsobem, který by mohl evokovat pouhé vypouštění procesní vody ze systému. Takový provoz by ovšem byl velmi neekonomický a neekologický.

7.3.2 Dimenzování napájecích obnovitelných zdrojů systému

Na základě poznatků a vztahů shrnutých v kapitolách 2.3.2. a 2.4.2. o fotovoltaických a větrných systémech a jejich způsobu dimenzování je uvedena na další stránce na obrázku 39 celková roční bilance výroby elektřiny z FV a VE v jednotlivých měsících a závislost výroby SNG na vypočtené výrobě.

Pro každý měsíc v roce jsou zpracovány 3 varianty napájení. Nejprve je uvedena výroba čistě z fotovoltaických systému, dále následuje napájení pouze z větrných systémů a v poslední variantě je výkon OZE rozdělený poměrově mezi FV a VE. Toto rozdělení bylo zvoleno ve prospěch fotovoltaických systému i přes více než dvojnásobnou využitelnost instalovaného výkonu větrných systémů z důvodu úvahy o teoretické výstavbě ve zvolené lokalitě.

Jak lze vidět na obrázku 39, počet potřebných větrných věží je na podmínky ČR moc vysoký a taková výstavba by velmi pravděpodobně nebyla realizovatelná, neboť v našich podmínkách uvažují maximální výstavbu 10-ti věží na jednu větrnou farmu dle zdroje [22]. Oproti tomu instalace fotovoltaických systémů v ČR dosahuje z hlediska maximální instalované kapacity mnohem výše. Maximum instalovaného výkonu reprezentuje FVE Ralsko s výkonem 55,7 MWp. Proto bylo rozhodnuto o vyšším zastoupení výkonu fotovoltaiky než větrné energie, aby byly jejich instalované výkony blíže realitě.

Dimenzování obnovitelných zdrojů na obrázku 39 je prezentováno následujícím způsobem: fotovoltaické pole je uváděno ve výkonu v MWp a plochou článků v hektarech. Větrné systémy jsou vyjádřeny instalovaným výkonem v MW a počtem 2MW turbín typu GE 2MW – 132. Rozdělení výkonu bylo vypočítáno dle rovnice 23 níže.

$$P_{C_{syst}} = P_{FVreal} + P_{VEkor} = 0,62 \cdot P_{C_{syst}} + 0,38 \cdot P_{C_{syst}} [MW]$$

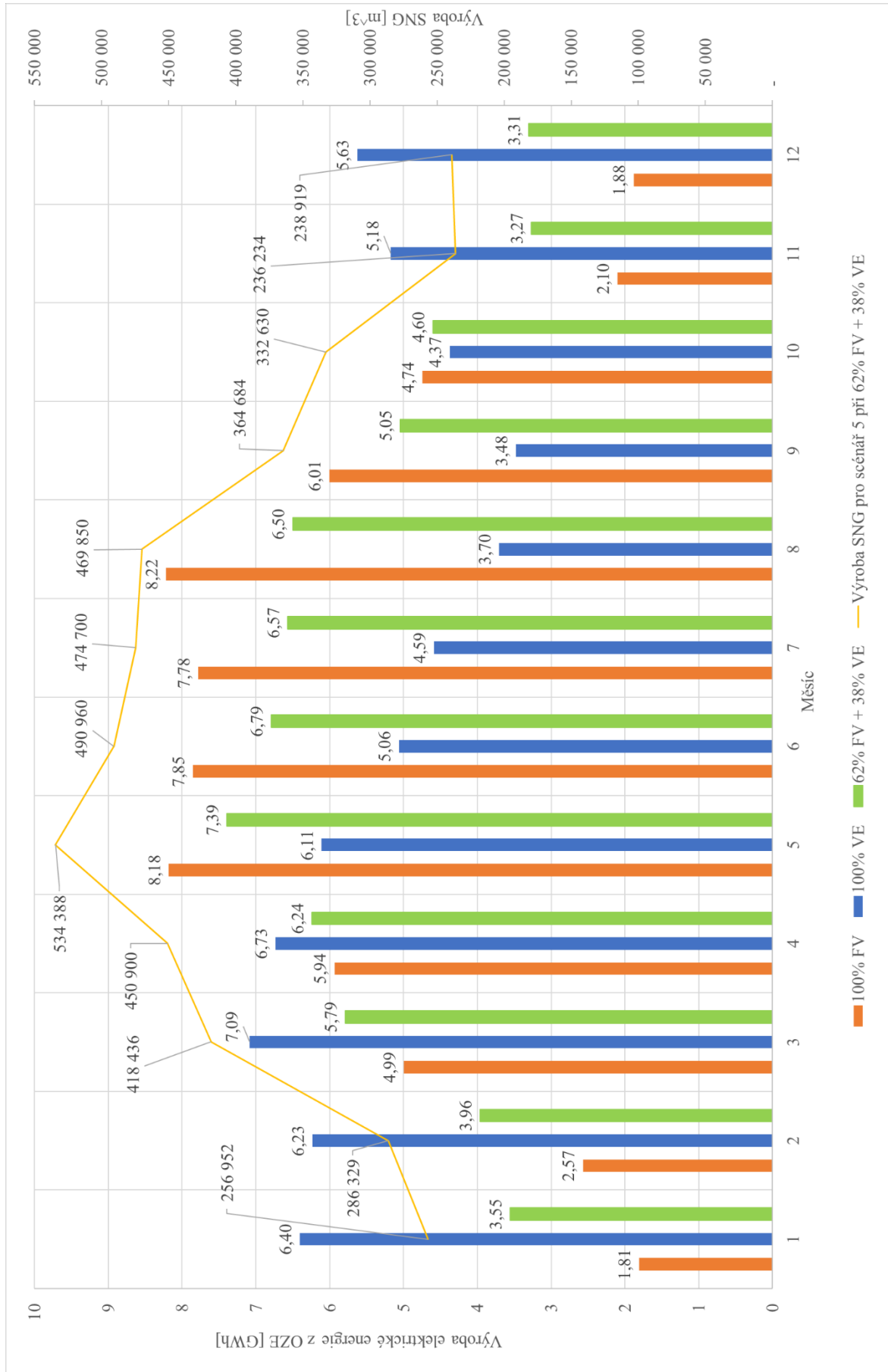
Rovnice 23 - Výpočet poměrného, výkonového zastoupení FV/VE. (23)

Dimenzování obnovitelných zdrojů k napájení systému akumulace						
Scénář č.	1	2	3	4	5	
100% napájení FV	7,6	76,0	76,0	37,4	62,2	MWp
100% napájení FV	4,37	43,73	43,73	21,53	35,79	ha
100% napájení VE	4,6	45,8	45,8	22,6	37,5	MW
100% napájení VE	2	18	18	9	15	N_2MW
62% napájení FV	4,8	47,2	47,2	23,3	38,7	MWp
62% napájení FV	2,76	27,15	27,15	13,40	22,26	ha
38% napájení VE	2,0	18,0	18,0	9,0	15,0	MW
38% napájení VE	1	7	7	4	6	N_2MW

Obr. 39 – Shrnutí dimenzování napájecího bloku.

Z hlediska roční výroby elektrické energie a SNG můžeme na obrázku 40 vidět průběh závislý na výrobě kombinovaného napájecího systému FV + VE v jednotlivých měsících v roce. Celková roční výroba se při této konfiguraci rovná $Q_{SNG} = 4\,554\,981\,m^3$.

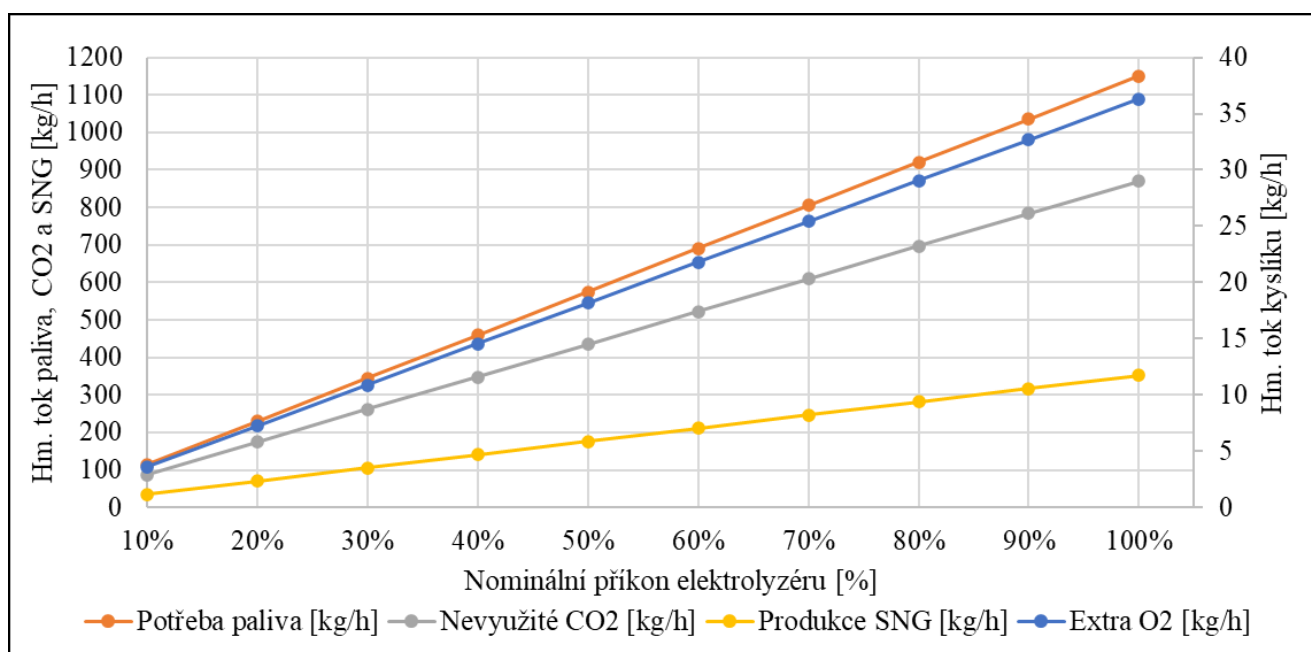
Obr. 40 - Celková roční výrobní bilance



7.4 Citlivostní analýzy

V této kapitole bude detailněji popsáno chování akumulčního systému formou jednoduché citlivostní analýzy. Pro analýzu byl zvolen scénář 5 z předchozí kapitoly, jelikož vykazuje nejlepší výsledky z hlediska výkonů, výroby i využití dostupných zdrojů. Nastavením určitého kroku vybraných parametrů byla provedena řada simulací s účelem zisku závislosti ostatních parametrů na vybraném. Hlavní vybrané parametry, které zásadně ovlivňují výkony ostatních komponent, jsou:

- Příkon elektrolyzéry – hlavní výkonový díl systému.
- Výroba vodíku – přímo vázaný na výkon elektrolyzéry, zde uvažováno 100% využití.
- Obsah dusíku v palivu – vliv změny chemického složení dřevních pelet.
- Recirkulační poměr – hlavní řídicí parametr pro řízení oxyfuel spalování pro udržení ideálního teplotního okna fluidního spalování.



Obr. 41 - Vliv výkonu elektrolyzéry na palivové toky.

Na obrázku 41 je znázorněna lineární závislost látkových toků na výkonu elektrolyzéry. Z porovnání hmotnostních toků vstupních látek a výstupního SNG je možné vidět, že účinnost tohoto systému není vysoká. Dle tabulky 13 dosahuje scénář 5 akumulace 49,87 kg SNG na 1 MWh. To odpovídá přibližně 20,05 kWh elektrické energie pro zisk 1 kg SNG dle rovnice 24.

$$E_{SNG_aku} = \frac{1}{m_{SNG_aku}} \cdot 1000 [kWh]$$

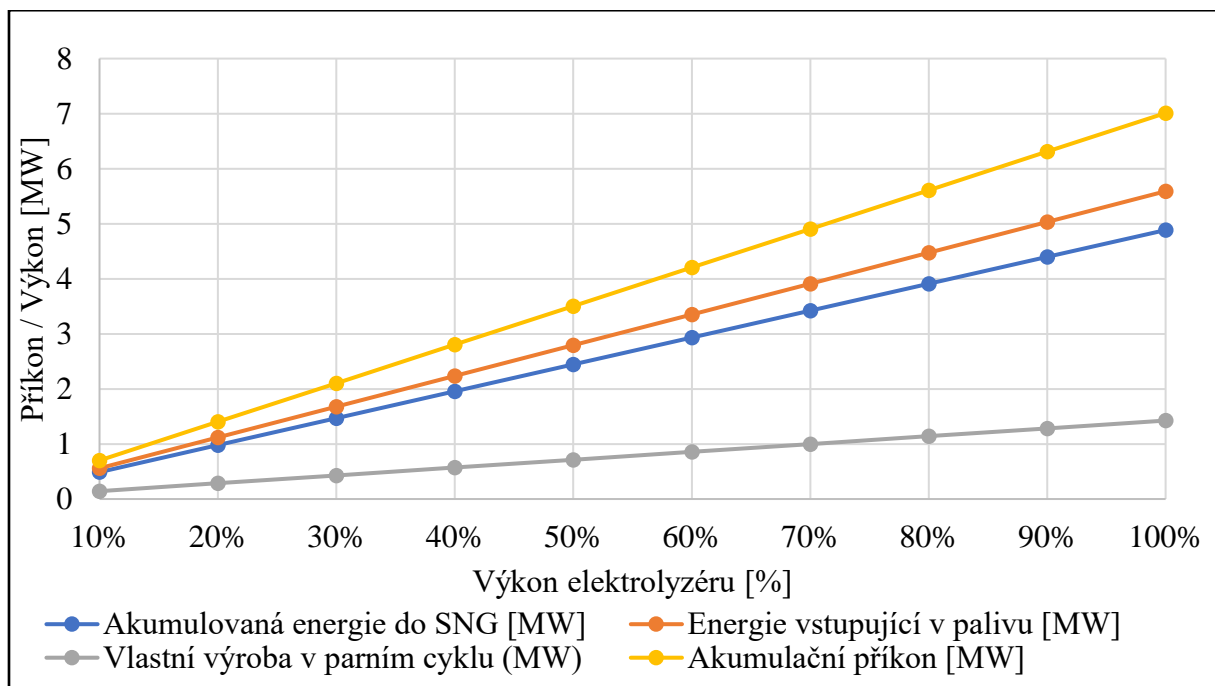
Rovnice 24 - Výpočet energie pro získání 1 kg SNG pro scénář 5. (24)

SNG je zde ve formě čistého methanu, tudíž při zpětném přepočtu získáme 13,89 kWh z 1 kg SNG při zpětném využití podle rovnice 25.

$$E_{SNG} = \frac{Q_{im_SNG}}{3600} \cdot 1000 [kWh]$$

Rovnice 25 – Teoreticky zpětně dosažitelná energie využitím 1 kg SNG. (25)

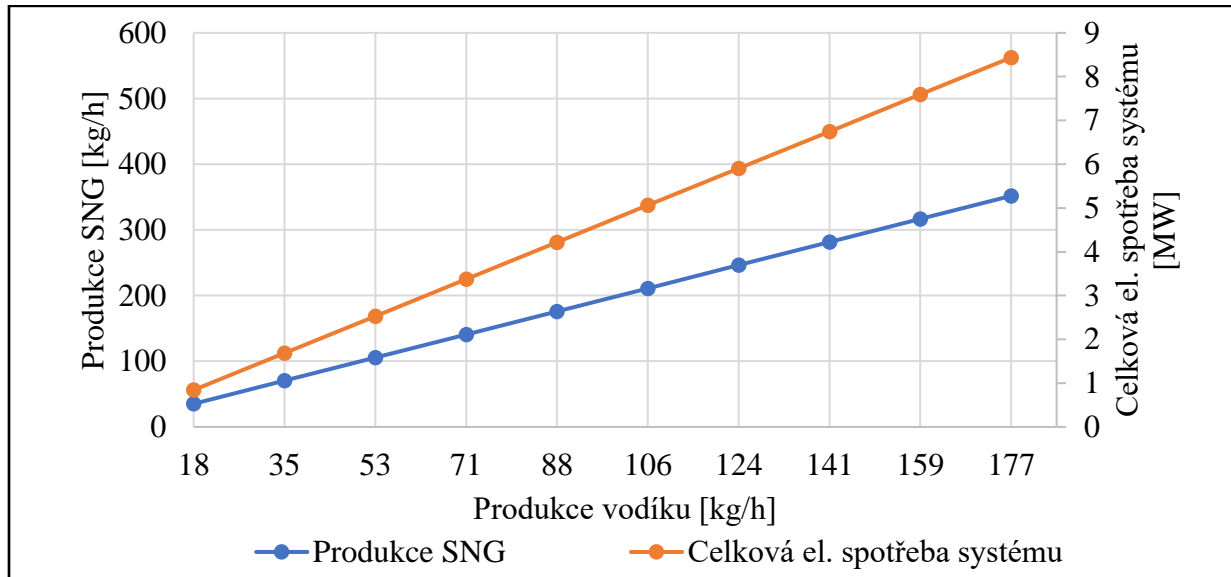
Účinnost tohoto systému je tedy přibližně 69,27 % dle tabulky 13. Ten představuje účinnost samotné akumulace v případě, že bychom z vytvořeného SNG získali zpětně 100% jeho energetické kapacity. Reálně by bylo nutné započítat účinnost zařízení, které by SNG využívalo např.: kogenerační jednotka nebo plynová turbína, abychom získali celkovou reálnou účinnost akumulace a využití.



Obr. 42 - Vliv výkonu elektrolyzátoru na příkon a výkon systému.

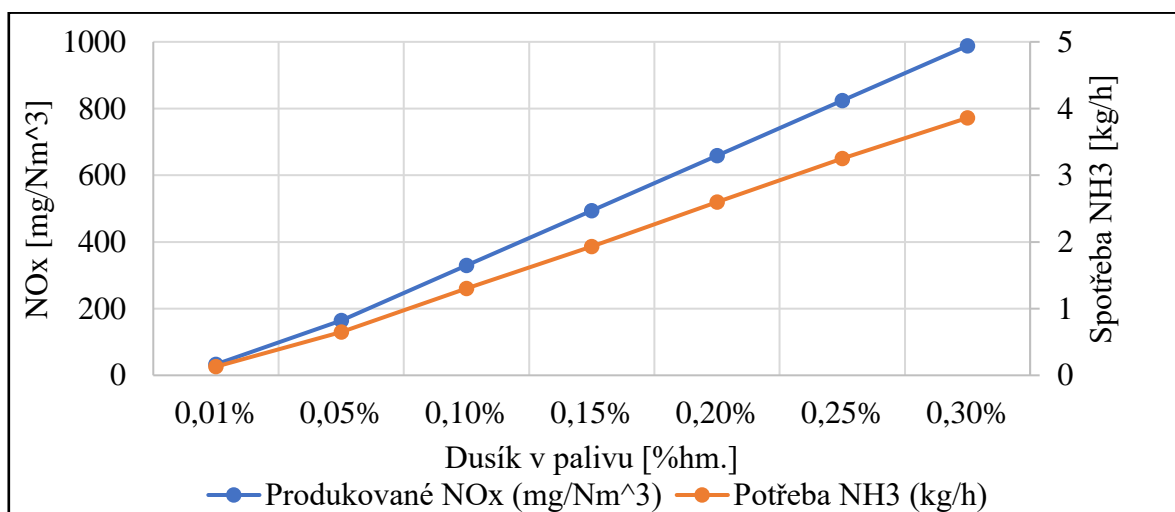
Obrázek 42 popisuje lineárně závislé energetické toky v systému. Vlastní výroba z využitého tepla spalin pokrývá z velké části vlastní spotřebu na kompresní práci a elektrický ohřev, což je patrné z tabulky 13. Zároveň trend nárůstu výkonu parního cyklu neodpovídá směrnici

nárůstu příkonu v palivu jelikož je parní cyklus limitován mnoha parametry a není možné ho adekvátně přizpůsobovat. Jak již bylo zmíněno stejně jako oxyfuel kotel je i parní cyklus modelový, tudíž nevykazuje 100% realistické chování.



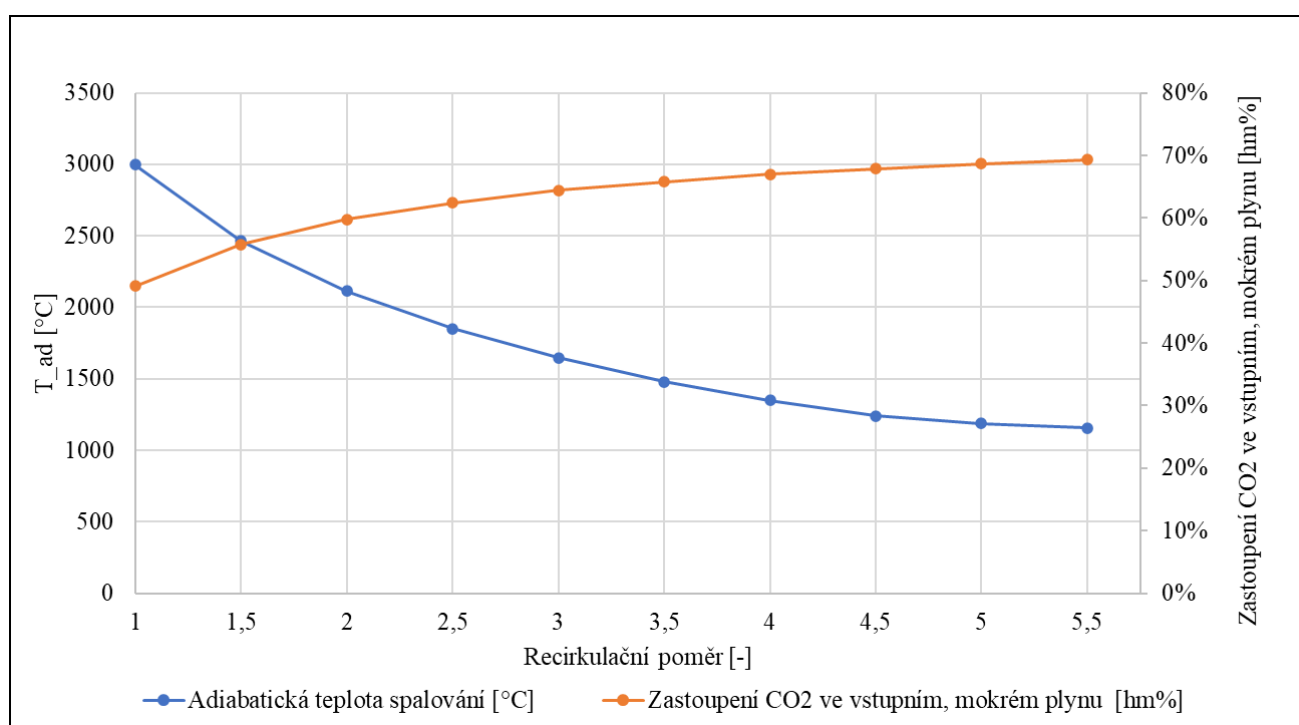
Obr. 43 - Vliv výroby vodíku na produkci SNG a spotřebu systému.

Obrázek 43 popisuje závislost míry produkce SNG a spotřeby systému se zvyšujícím se požadavkem výroby vodíku. Výroba vodíku je přímo vázaná s výkonem elektrolyzáru, ale v tomto scénáři (č.5) je uvažováno jeho 100% využití a tedy žádný vodík není externě uskladňován.



Obr. 44 - Vliv obsahu dusíku v palivu na emisích NO_x vztažených na suché spaliny.

Obrázek 44 ukazuje závislost obsahu dusíku v palivu promítnuté do potřeby amoniaku pro SCR technologii a produkce emisí NO_x . Tento parametr je z hlediska paliva asi nejdůležitější, jelikož vlastnosti biomasy jsou proměnné v rámci roku a její složení se může odlišovat. V této práci neuvažujeme zastoupení síry v biomase a popeloviny jsou řešené programem Aspen, ale zastoupení dusíku zásadně ovlivňuje produkované emise NO_x . Ze závislosti produkce emisí NO_x můžeme pozorovat vysoké emise oproti běžnému vzduchovému spalování. U spalování dřevních pelet se obvykle emise NO_x vztažené na objem spalin pohybují okolo 200 mg/Nm^3 [59]. Zvýšení emisí NO_x je způsobeno tím, že měrný objem spalin z oxyfuel spalování je menší než u vzduchového spalování.



Obr. 45 - Vliv recirkulačního poměru na spalovací podmínky.

Dalším důležitým řídicím parametrem je recirkulační poměr. Ten slouží k řízení oxyfuel spalování a je spolu poměrem O_2 / CO_2 a množstvím paliva odpovědný za udržování stabilní spalovací teploty. Obrázek 45 popisuje vliv recirkulačního poměru na spalovací podmínky při scénáři 4. Množství vstupujícího paliva je drženo jako konstantní na hodnotě 1150 kg/h a je možné vidět, že bez recirkulace by nebylo možné oxyfuel spalování vůbec provozovat. Pro fluidní spalování, jak již bylo zmíněno, je ideální teplota 850 °C a tedy adiabatická teplota nesmí překročit 1180 °C v závislosti na vlastnosti ohniště. Ze závislosti je tedy jasné, proč nebyl použit recirkulační poměr nižší než 4 u žádného ze zkoumaných scénářů. Adiabatická teplota plamene se snižujícím „r“ dramaticky zvyšuje a rychle opouští spalovací teploty pro fluidní

spalování. Zajímavá je také závislost zastoupení CO₂ ve vstupním plynu do kotle po smísení recirkulovaných spalin s kyslíkem z elektrolýzy. Vzhledem k tomu, že v našem systému recirkulujeme mokré spaliny, odpovídá hmotnostní zastoupení CO₂ závislosti viz. obr. 45 a jeho zastoupení od $r = 3,5$ nijak dramaticky nestoupá. To je způsobeno poměrně vysokým zastoupením vody ve spalinách a zbytkový prostor zaujímá kyslík.

8 Závěr

Cílem práce bylo analyzovat a ve výpočetním programu Aspen Plus vytvořit technologický řetězec CCU technologie a akumulace elektřiny se vstupem z obnovitelných zdrojů elektrické energie (solární, větrná), která byla využita v elektrolýze pro výrobu H₂ a O₂. Kyslík je využit v systému oxyfuel spalování biomasy (dřevních pelet), které po vyčištění spalin produkuje čistý CO₂. Ten je následně s vodíkem konvertován na umělý zemní plyn (SNG) v procesu metanizace. Byla provedena analýza z hlediska látkové a energetické bilance a byly analyzovány možné scénáře provozu této technologie s ohledem na preferenci zvolených vstupů a výstupů. Ze simulací byla vybrána varianta prezentující maximální potenciál tohoto systému z hlediska vytvořených scénářů. Technologie o maximálním příkonu 7,01 MW je schopna ročně uložit přibližně 64,57 GWh elektrické energie do 4 554 981 m³ SNG při maximální účinnosti 69,27%, spálení 10 075 tun dřevních pelet a spotřebě 1 980 000 litrů demineralizované vody při uvažování kompletní recyklace vody na výstupu z technologie, její vyčištění a znovupoužití. To je dosaženo za pomoci 38,7 MWp instalovaného výkonu ve fotovoltaice, což je zhruba 22,26 ha plochy fotovoltaických panelů a 15 MW instalovaného výkonu v 6-ti větrných turbínách v lokalitě jihu kraje Vysočina v ČR. Během analýzy byla zjištěna silná závislost využití plynů, hlavně vodíku, na celkové účinnosti systému, neboť množstvím vodíku je zvýšena celková produkce SNG. Maximalizace kyslíku vedla celkově k vyšší účinnosti systému, ale za cenu zvýšení produkce emisí nezpracovaného CO₂, který by mohl mít potenciál uložení v následné CCUS technologii. Maximální roční emise CO₂ při tomto výkonu jsou 7626 tun CO₂ za rok. Z analýzy tedy plyne, že tato technologie má velký potenciál, neboť nemusí být závislá na externím napájení ze sítě a v případě potřeby je schopna poskytovat služby výkonové rovnováhy. Spotřeba paliva a vody a emise CO₂ jsou velmi nízké v porovnání s konvenčními stacionárními zdroji. Hlavní nevýhodou je pravděpodobně velmi vysoká ekonomická náročnost kvůli použitým technologiím, jak z hlediska napájení, tak z hlediska výroby.

9 Bibliografie

- [1] David Coe, Walter Fabinski, Gerhard Wiegleb. *The Impact of CO₂, H₂O and Other “Greenhouse Gases” on Equilibrium Earth Temperatures*. *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences*. Vol. 5, No. 2, 2021, pp. 29-40. doi: 10.11648/j.ijaos.20210502.12 [online]. In: . [cit. 2022-05-20].
- [2] EU. *Energetika a Zelená dohoda: Přechod na čistou energii* [online]. In: . [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_cs
- [3] Crabtree, George & Misewich, Jim & Ambrosio, Ron & Clay, Kathryn & DeMartini, Paul & James, Revis & Lauby, Mark & Mohta, Vivek & Moura, John & Sauer, P.W. & Slakey, Francis & Lieberman, Jodi. (2011). *Integrating Renewable Electricity on the Grid*. *AIP Conference Proceedings*. 1401. 10.1063/1.3653865. [online]. [cit. 2022-05-20].
- [4] GREAT PLAINS SYNFUELS PLANT. In: *NETL* [online]. USA [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifiedia/great-plains>
- [5] HRDLIČKA, Prof. Ing. Jan. *Energetické využití biomasy*. ČVUT v Praze, 2021.
- [6] ČESKO. *Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165>. In: .
- [7] *Roční využití výkonu větrných elektráren v České republice: Hrubý odhad ročního využití* [online]. In: . [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/11077-rocni-vyuziti-vykonu-vetrnych-elektraren-v-ceske-republice>
- [8] *Zprávy o provozu elektrizační soustavy: Roční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2020* [online]. <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>, 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>
- [9] GHANNAM, Rami. *Photovoltaics* [online]. In: . [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://edshare.gla.ac.uk/715/>
- [10] LUQUE, A. a Steven HEGEDUS. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Chichester, England: Wiley, 2003. ISBN 0-471-49196-9.
- [11] STANĚK, K. *Analýza FV systémů na pasivních domech Koberovy.: Vliv provozních podmínek na produkci*. [online]. In: . [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2020/04/AZE2-P7_FV_produkce_FVT_panely.pdf
- [12] DUPRÉ, Olivier. *Physics of the thermal behavior of photovoltaic devices*. [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Sankey-diagram-of-the-distribution-of-the-solar-energy-incident-upon-a-photovoltaic_fig34_288670410
- [13] *The principle of photovoltaic effect* [online]. In: . [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.solartec.eu/en/small-installation/information-about-photovoltaic/what-you-must-know>
- [14] *Podmínky výstavby FVE v České republice* [online]. In: . [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <http://www.frankensolar.eu/cz/podminky-vystavby-fve-v-ceske-republice.html>
- [15] *Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR* [online]. In: . [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-slunecniho-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>
- [16] *Zprávy o provozu elektrizační soustavy: 2020* [online]. In: . [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>
- [17] KLEIN, Zdeněk. *Větrné elektrárny od A do Z*. Brno, 2009. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.
- [18] TONG, Wei. *Wind Power Generation and Wind Power Design* [online]. WITT Press, 2010 [cit. 2022-06-03]. ISBN 9781845642051. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=wU9bgvrl4rQC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [19] *ENERGIE Z VĚTRU* [online]. In: . [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie-pro-deti/vetrna-energie-pro-deti/vetrna-elektrarna/energie-z-vetru>
- [20] DELAY, Tom a Tom JENNINGS. *Offshore wind power: big challenge, big opportunity: Maximising the environmental, economic and security benefits* [online]. 10/2008. UK: Carbon Trust, 2008 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.carbontrust.com/resources/offshore-wind-power-big-challenge-big-opportunity>
- [21] ELECTRICAL4U. *Theory of Wind Turbine and Betz Coefficient* [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/theory-of-wind-turbine/>
- [22] *Větrná mapa: Pole průměrné rychlosti větru 100m nad povrchem*. [online]. In: . [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/vetrna-mapa/601>
- [23] GE. *2 MW onshore wind turbine platform: 2 MW wind turbine specifications table* [online]. In: . [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/2mw-platform>
- [24] ČHMÚ. *Měsíční a roční data dle zákona 123/1998 Sb.: Rychlost větru v Kraji Vysočina* [online]. In: . [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-data-dle-z.-123-1998-Sb#>
- [25] LEONARD, Matthew, Efstathios MICHAELIDES a Dimitrios MICHAELIDES. *Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants with renewables*. *Renewable Energy* [online]. 2020, **145**, 951-962 [cit. 2022-04-

- 13]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2019.06.066
- [26 Carnotovy baterie – dlouhodobá a cenově dostupná akumulace elektřiny v podobě tepla [online]. In: . [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://cz.energyhub.eu/cs/articles/547570/carnotovy-baterie-dlouhodobaa-cenove-dostupna-akumulace-ektriny-v-podobete-tepla>
- [27 HRDLIČKA, Prof. Ing. Jan. *Biomasa - charakteristika, specifika, obecné vlastnosti*. ČVUT v Praze, 2021.
- [28 HRDLIČKA, Prof. Ing. Jan. *BIOMASA: Biomasa jako palivo pro termochemickou konverzi*. ČVUT v Praze, 2021.
- [29 HRDLIČKA, Jan. *Termochemická konverze biomasy: Spalování*. ČVUT v Praze, 2021.
- [30 REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Faradayovy zákony elektrolyzy* [online]. In: . [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/279-faradayovy-zakony-elektrolyzy>
- [31 URSUA, Alfredo, Luis GANDIA a Pablo SANCHIS. Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2012, **100**(2), 410-426 [cit. 2021-06-21]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2011.2156750
- [32 TOCHÁČKOVÁ, Anna a Martin ŠILHAN. *Využití vodíkových technologií v energetice*. [online]. In: . [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/technologie-a-materialy/vyuziti-vodikovych-technologie-v-energetice-228>
- [33 Hadrava, Jan. (2014). *Alkalická elektrolyza, produkce vodíku, jeho čištění a skladování*. 10.13140/RG.2.1.1573.6401. [online]. In: . [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287197966_Alkalicka_elektrolyza_produkce_vodik_u_jeho_cisten_i_a_skladovani
- [34 *PEM Water Electrolysis* [online]. Elsevier, 2018 [cit. 2021-06-21]. ISBN 9780128111451. Dostupné z: doi:10.1016/C2016-0-00574-0
- [35 HELMETH. *High temperature electrolysis cell (SOEC)* [online]. In: . [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <http://helmeth.eu/index.php/technologies/high-temperature-electrolysis-cell-soec>
- [36 SHADDIX, Christopher. *Oxyfuel Combustion: Basic Principles and Results from Small-Scale Investigations* [online]. In: . [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1373464>
- [37 WALL, Terry, Yinghui LIU, Chris SPERO et al. An overview on oxyfuel coal combustion—State of the art research and technology development. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2009, **87**(8), 1003-1016 [cit. 2021-06-21]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2009.02.005
- [38 HRDLIČKA, Jan. *Zachycování CO₂: Oxyfuel*. ČVUT v Praze, 2021.
- [39 KOLONIČNÝ, Jan. *Emise při spalování biomasy*. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>.
- [40 DLOUHÝ, CSC., doc. Ing. Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. ČVUT v Praze, 2002. Skriptum. ČVUT v Praze.
- [41 UMÝSA, Radovan. *Kotel na spalování čistého dřeva 60t/h* [online]. Brno, 2011 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/5536>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Zdeněk Skála.
- [42 HO, Hsing-Jung, Atsushi IIZUKA a Etsuro SHIBATA. Carbon Capture and Utilization Technology without Carbon Dioxide Purification and Pressurization: A Review on Its Necessity and Available Technologies. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2019, **58**(21), 8941-8954 [cit. 2021-06-21]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/acs.iecr.9b01213
- [43 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. 2022-04-12]. ISSN 22129820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcou.2014.12.001
- [44 MEHERWAN P. BOYCE. *Selective Catalytic Reduction* [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/selective-catalytic-reduction>
- [45 HRDLIČKA, Prof. Ing. Jan. *Denitrifikace: Snižování emisí NO_x*. ČVUT v Praze, 2021.
- [46 WANG, Dandan, Sheng LI a Lin GAO. SNG production with CO₂ capture based on coal-steam gasification and one-step methanation. *Energy Procedia* [online]. 2019, **158**, 2397-2402 [cit. 2021-06-21]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2019.01.290
- [47 FALBO, Leonardo, Michela MARTINELLI, Carlo VISCONTI, Luca LIETTI, Claudia BASSANO a Paolo DEIANA. Kinetics of CO₂ methanation on a Ru-based catalyst at process conditions relevant for Power-to-Gas applications. *Applied Catalysis B: Environmental* [online]. 2018, **225**, 354-363 [cit. 2022-04-08]. ISSN 09263373. Dostupné z: doi:10.1016/j.apcatb.2017.11.066
- [48 ŠNAJDROVÁ A KOL., Veronika. *Syntéza katalyzátorů pro metanizační reakci* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-06-21]. Příspěvek. VŠCHT v Praze.
- [49 ZIMMERMANN, Ronny, Jens BREMER a Kai SUNDMACHER. Optimal catalyst particle design for flexible fixed-

-] bed CO₂ methanation reactors. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2020, **387** [cit. 2022-05-29]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2019.123704
- [50] Optimization study by Box-Behnken design (BBD) and mechanistic insight of CO₂ methanation over Ru-Fe-Ce/γ-Al₂O₃ catalyst by in-situ FTIR Technique [online]. In: . [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Proposed-reaction-pathways-for-CO-2-methanation-on-Ru-Fe-Ce-51085-c-Al-2-O-3-catalyst_fig4_333961246
- [51] BOSE, ARUNIM. SIMULATION OF AIR LIQUEFACTION USING ASPEN PLUS [online]. NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ROURKELA [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: http://ethesis.nitrkl.ac.in/3235/1/ARUNIM_BOSE-108CH051.pdf. Bakalářská práce. NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ROURKELA. Vedoucí práce Prof. (Mrs.) Madhusree Kundu.
- [52] Základní informace k vodíku [online]. In: . [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodik/ve-zkratce>
- [53] K.W. HARRISON, R. REMICK, AND G.D. MARTIN A. HOSKIN. *Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries* [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47302.pdf>
- [54] NEL HYDROGEN. *PEM Electrolyser: M series* [online]. In: . [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://nelhydrogen.com/product/m-series-3/>
- [55] Heats of Reaction [online]. In: . [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://ursula.chem.yale.edu/~chem220/chem220js/STUDYAIDS/thermo/thermointro.html>
- [56] SIEMENS ENERGY. *Efficiency: More value to your facility: Dresser-Rand Steam Turbines* [online]. In: . s. 24 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:333797d8-0fcc-4c63-9599-efc355bf2391/se-brochure-dresser-rand-steam-turbines-2021.pdf>
- [57] Záměnnost zemních plynů I. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/2049-zamennost-zemnich-plynu-i>
- [58] ZHANG, Yuan, Jaka SUNARSO, Shaomin LIU a Rong WANG. Current status and development of membranes for CO₂/CH₄ separation: A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2013, **12**, 84-107 [cit. 2022-06-01]. ISSN 17505836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2012.10.009
- [59] VODIČKA, Matěj, Jan HRDLIČKA a Pavel SKOPEC. *Emise oxidů dusíku při oxyfuel spalování dřevních pelet v ohništi se stacionární fluidní vrstvou* [online]. In: . s. 7 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2016/14_ENBIO_2016_Vodicka.pdf?fbclid=IwAR0PbYEUSEqGuso8b56vXp05uGK1duuuGjKVwbkWs0270h7LxcidJE9ig14