

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**JIŘÍ
KRÁLÍK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Králík** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **468813**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Paliva pro jadernou fúzi a jejich vliv na životní prostředí

Název diplomové práce anglicky:

Fusion fuels and their environmental impact

Pokyny pro vypracování:

V první části rešerše student popíše současný stav vývoje fúzních elektráren. V druhé části rešerše student dohledá data o palivech pro fúzní reakce DT, DD, DHe3 a HB11.

Ve výpočtové části práce student provede analýzu dostupnosti jednotlivých paliv, jejich energetické výtěžnosti a velikosti zdroje z hlediska energetické spotřeby lidstva. Na závěr analýzy porovná ekonomické a environmentální charakteristiky jednotlivých fúzních paliv mezi sebou a s palivy používanými v současnosti (uhlí, plyn, uran).

Seznam doporučené literatury:

S. Entler, J. Horacek, T. Dlouhy, V. Dostal, Approximation of the Economy of Fusion Energy, Energy 152 (2018) 488-497.
Maisonnier D, et al., A conceptual study of commercial fusion power plants. 2005. Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS), EFDA-RP-RE-5.0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Slavomír Entler, Ph.D. ústav energetiky

Jméno a pracoviště druhé(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**

Ing. Slavomír Entler, 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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 01. 06. 2022

.....
Jméno Příjmení

Poděkování

Děkuji Ing Slavomíru Entlerovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a za cenné rady a připomínky, které tuto práci obohatily. Také bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za jejich neutuchající podporu. Za cenné rady a připomínky bych chtěl taktéž poděkovat Bc. Vojtěchu Smolíkovi

Anotační list

- Jméno autora:* Jiří Králík
- Název DP:* Paliva pro jadernou fúzi a jejich vliv na životní prostředí
- Anglický název:* Fusion fuels and their environmental impact
- Akademický rok:* 2021/2022
- Ústav/Obor:* Ústav energetiky/Jaderná energetická zařízení
- Vedoucí DP:* Ing Slavomír Entler, Ph.D.
- Bibliografické údaje:* Počet stran: 98
Počet obrázků: 37
Počet tabulek: 46
Počet příloh: 0
- Klíčová slova:* fúzní elektrárna, ekonomika, životní prostředí
- Keywords:* fusion power plant, economy, environment
- Anotace:* Práce se zabývá palivy pro fúzní reakce D-T, D-D, D-³He a H-¹¹B. První část popisuje stav vývoje fúzních elektráren, další část řeší různé vlastnosti těchto paliv, především ty, které jsou spojené s jejich environmentálními a ekologickými aspekty. Ve praktické části jsou pak tyto dále analyzovány. Na závěr jsou získané hodnoty porovnány s danými hodnotami pro paliva používaná v současnosti, jako je uhlí, plyn a uran.
- Abstract:* Master's thesis deals with fuels for D-T, D-D, D-³He and H-¹¹B fusion reactions. The first part of this thesis describes the current state of fusion power plant research, next one focuses on their various environmental and economic aspects. These aspects are further analysed in the practical part. Gained results are compared with aspects of currently used energy sources.

Obsah

Seznam zkratk.....	8
Seznam veličin.....	8
Seznam tabulek.....	10
Seznam obrázků.....	12
1. Úvod.....	14
2. Základní popis fúzní elektrárny.....	15
2.1. Reakce.....	15
2.2. Lawsonovo kritérium.....	16
2.3. Tokamak.....	17
2.4. Pomocné technologie.....	18
2.5. Výroba elektrické energie.....	19
2.6. Shrnutí.....	19
3. Současnost a budoucnost vývoje fúzních elektráren	20
3.1. Před reaktorem ITER.....	20
3.2. ITER.....	20
3.3. DEMO.....	21
3.4. Shrnutí.....	21
4. Palivové cykly budoucích fúzních elektráren.....	22
4.1. První generace fúzních elektráren.....	23
4.1.1. Blanket.....	23
4.1.2. Lithium (${}^6\text{Li}$).....	24
4.1.3. Tritium (T).....	28
4.1.4. Deuterium (D).....	31
4.1.5. Berylium (${}^9\text{Be}$).....	33
4.1.6. Olovo (${}^{208}\text{Pb}$).....	37
4.1.7. Helium (${}^4\text{He}$).....	41
4.2. Druhá generace fúzních elektráren.....	42
4.2.1. Helium (${}^3\text{He}$).....	42
4.3. Třetí generace fúzních elektráren.....	45
4.3.1. Bor (${}^{11}\text{B}$).....	45
4.3.2. Vodík (${}^1\text{H}$).....	48
4.4. Srovnání.....	50
4.5. Shrnutí.....	52
5. Výpočty některých ekonomických a environmentálních aspektů vybraných palivových cyklů budoucích fúzních elektráren.....	53
5.1. Denní spotřeba paliv.....	54
5.2. Denní spotřeba násobičů neutronů.....	57
5.3. Vydatnost jednotlivých paliv a násobičů.....	58
5.4. Vliv palivových cyklů na cenu budoucích fúzních elektráren.....	68
5.5. Náklady na palivo budoucích fúzních elektráren.....	73
5.6. Vliv palivových cyklů na cenu elektřiny z budoucích fúzních elektráren.....	75
5.7. Vliv palivových cyklů na environmentální následky budoucích fúzních elektráren.....	81

5.8. Shrnutí.....	81
6. Srovnání fúzní energetiky s vybranými zdroji energie.....	82
6.1. Denní spotřeba paliva	82
6.2. Vydátnost.....	83
6.3. Cena elektrárny.....	85
6.4. Cena elektřiny.....	86
6.5. Environmentální následky.....	87
6.6. Shrnutí.....	88
7. Závěr.....	88
Seznam literatury.....	91

Seznam zkratek

AEM	- aniontová výměna přes membránu
ADS	- akcelerátorem řízený podkritický systém
APT	- produkce tritia pomocí urychlovačů
CANDU	- typ energetického těžkovodního reaktoru
CCFE	- Středisko pro fúzní energetiku v Culhamu
CLRW	- komerční lehkovodní reaktor
DEMO	- Demonstrativní fúzní elektrárna
GS proces	- Gilderův sulfidový proces
HCPB	- heliem chlazený pebble bed
ICOMAX	- na koloně založená vylepšená výměna amalgámu
ITER	- Mezinárodní termojaderný experimentální reaktor
JET	- Spojený evropský torus
JT-60	- Japonský torus-60
JT-60SA	- Japonský torus-60 velmi pokročilý
KQS	- kinetické kvantové síto
NMR	- nukleární magnetická rezonance
PEM	- technologie s polymerní membránou
PEZ	- primární energetické zdroje
SOEC	- elektrolyzér s pevným oxidem
TER	- systém extrakce a odstranění tritia
TFTR	- Fúzní testovací reaktor s tokamakem
VN	- vakuová nádoba
WCLL	- vodou chlazené lithium olovo

Seznam veličin

c	$[m \cdot s^{-1}]$	- rychlost světla
C_{eir}	$[\$/Wh]$	- relativní náklady na izotop i a cyklus r
C_{jr}	$[\$/Wh]$	- relativní náklady na cyklus r
C_{mi}	$[\$/kg]$	- relativní náklady na izotop i
C_A	$[\$]$	- náklady pro D-T cyklus
C_B	$[\$]$	- náklady po extrapolaci
C_1	$[\$]$	- výše známé částky pro D-T cyklus
C_2	$[\$]$	- výše neznámé částky pro D-T cyklus
C_{3r}	$[\$]$	- výše známé částky pro cyklus r
C_{4r}	$[\$]$	- výše neznámé částky pro cyklus r
E	$[J]$	- energie
E_r	$[J]$	- energie získaná jednou souhrnnou reakcí cyklu r
E_{PEZ}	$[J/rok]$	- celková roční spotřeba energie
f_r	$[s^{-1}]$	- frekvence souhrnné reakce cyklu r
k_{er}	$[-]$	- extrapoláčnı́ koeficient pro cyklus r
k_z	$[-]$	- poměrné zastoupenı́ fúznı́ energie v PEZ
k_{zn}	$[\]$	- koeficient ztráty neutronu
m	$[kg]$	- hmotnost
m_i	$[kg]$	- hmotnost atomu izotopu i
m_{si}	$[kg]$	- množství izotopu i ve zdroji/zásobách s
M_{dir}	$[kg/den]$	- dennı́ spotřeba izotopu i cyklem r
M_{fir}	$[kg/rok]$	- roční spotřeba izotopem i cyklem r
M_{ir}	$[kg/s]$	- spotřeba/produkce izotopu i cyklem r
N_e	$[-]$	- počet fúznı́ch elektráren
N_{ir}	$[-]$	- množství atomů izotopu i v jedné souhrnné reakci cyklu r
P_c	$[W]$	- celkový čistý výkon fúznı́ch elektráren
P_{ec}	$[W]$	- čistý elektrický výkon jedné fúznı́ elektrárny
P_{fuz}	$[W]$	- fúznı́ výkon jedné fúznı́ elektrárny
η_{tot}	$[-]$	- celková účinnost elektrárny

Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání jednotlivých variant produkce tritia	29
Tabulka 2: Srovnání některých fyzikálních vlastností D ₂ O a H ₂ O.....	32
Tabulka 3: Vlastnosti jednotlivých kategorií měsíčních hornin.....	43
Tabulka 4: Shrnutí jednotlivých metod elektrolýzy vody.....	49
Tabulka 5: Porovnání jednotlivých izotopů vhodných jako paliva budoucích fúzních elektráren.....	50
Tabulka 6: Porovnání jednotlivých uvažovaných izotopů vhodných jako násobiče neutronů budoucích fúzních elektrárnách.....	51
Tabulka 7: Parametry použitého modelu elektrárny.....	53
Tabulka 8: Potřebné velikosti magnetické indukce a jejich srovnání.....	54
Tabulka 9: Optimální teploty plazmatu nutné pro splnění Lawsonova kritéria a jejich porovnání.....	54
Tabulka 10: Denní spotřeba jednotlivých izotopů pro jednotlivé palivové cykly.....	55
Tabulka 11: Denní spotřeba jednotlivých izotopů pro násobiče neutronů.....	57
Tabulka 12: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři A.....	60
Tabulka 13: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři A.....	60
Tabulka 14: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D- ³ He cyklus při scénáři A.....	60
Tabulka 15: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H- ¹¹ B cyklus při scénáři A.....	60
Tabulka 16: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři B.....	61
Tabulka 17: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři B.....	61
Tabulka 18: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D- ³ He cyklus při scénáři B.....	61
Tabulka 19: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H- ¹¹ B cyklus při scénáři B.....	61
Tabulka 20: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři C.....	61
Tabulka 21: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři C.....	61
Tabulka 22: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D- ³ He cyklus při scénáři C.....	62
Tabulka 23: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H- ¹¹ B cyklus při scénáři C.....	62
Tabulka 24: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři D.....	62
Tabulka 25: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři D.....	62
Tabulka 26: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D- ³ He cyklus při scénáři D.....	62
Tabulka 27: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H- ¹¹ B cyklus při scénáři D.....	62
Tabulka 28: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři E.....	63

Tabulka 29: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři E.....	63
Tabulka 30: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D- ³ He cyklus při scénáři E.....	63
Tabulka 31: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H- ¹¹ B cyklus při scénáři E.....	63
Tabulka 32: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři F.....	63
Tabulka 33: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři F.....	63
Tabulka 34: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D- ³ He cyklus při scénáři F.....	64
Tabulka 35: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H- ¹¹ B cyklus při scénáři F.....	64
Tabulka 36: Náklady na výstavbu jednotlivých fúzních elektráren.....	70
Tabulka 37: Palivové náklady pro jednotlivé izotopy a palivové cykly.....	74
Tabulka 38: Celková bilance nákladů na paliva a násobiče neutronů na 1 kWh pro jednotlivé palivové cykly.....	74
Tabulka 39: Složky ceny elektrické energie.....	75
Tabulka 40: Složky ceny komponent.....	75
Tabulka 41: Jednotlivé položky ceny komponent pro jednotlivé palivové cykly.....	76
Tabulka 42: Jednotlivé položky ceny elektrické energie pro jednotlivé palivové cykly	75
Tabulka 43: Denní spotřeba paliva jednotlivých elektráren.....	82
Tabulka 44: Vydatnost pro jednotlivé zdroje energie.....	83
Tabulka 45: Investiční náklady na jednotlivé druhy elektráren.....	85
Tabulka 46: Cena elektrické energie z jednotlivých zdrojů.....	85

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma modulu blanketu koncepce ECLL, směr toku slitiny Pb-Li a schéma modulu blanketu konceptu HCPB, jeho množivý modul ve tvaru U, převzato ([21a, 21b]).....	24
Obrázek 2: Podíl jednotlivých zemí na celkových zásobách lithia, převzato ([17]).....	26
Obrázek 3: Rozdělení spotřeby lithia jednotlivými průmyslovými odvětvími v roce 2020, převzato ([26b]).....	26
Obrázek 4: Rozložení produkce těžké vody mezi zeměmi v roce 2019, převzato ([34])....	32
Obrázek 5: Účinný průřez (n, 2n) reakce pro izotopy ^9Be a ^{208}Pb , převzato ([37]).....	34
Obrázek 6: Podíl jednotlivých zemí na světových zásobách berylia, převzato ([17]).....	35
Obrázek 7: Rozdělení spotřeby berylia jednotlivými odvětvími v roce 2020, převzato ([26d]).....	36
Obrázek 8: Podíl jednotlivých zemí na světových zásobách olova, převzato ([17]).....	39
Obrázek 9: Rozdělení spotřeby olova jednotlivými odvětvími v roce 2019, převzato ([26e]).....	39
Obrázek 10: Rozdělení spotřeby helia jednotlivými odvětvími v roce 2021, převzato ([26g]).....	41
Obrázek 11: Podíl jednotlivých zemí na světových zásobách boru, převzato ([46b]).....	46
Obrázek 12: Rozdělení spotřeby boru mezi jednotlivými odvětvími v roce 2015, převzato ([26h]).....	46
Obrázek 13: Graf rozložení spotřeby vodíku mezi jednotlivými odvětvími, převzato ([26j]).....	49
Obrázek 14: Porovnání zásob jednotlivých izotopů.....	51
Obrázek 15: Porovnání množství jednotlivých izotopů v hydrosféře.....	52
Obrázek 16: Vydátnost zásob a zdrojů násobičů neutronů pro dva nejextrémnější scénáře.....	65
Obrázek 17: Srovnání vydátnosti lithia pro různé úrovně mimofúzní spotřeby.....	66
Obrázek 18: Srovnání vydátnosti deuteria pro různé scénáře a zdroje pro D-D cyklus.....	66
Obrázek 19: Srovnání vydátnosti pro různé scénáře a zdroje ^3He pro D- ^3He cyklus.....	67
Obrázek 20: Poměrné zastoupení jednotlivých složek přímých nákladů pro D-T elektrárnu, převzato ([57]).....	71

Obrázek 21: Poměrné zastoupení jednotlivých složek přímých nákladů pro D-D elektrárnu.....	71
Obrázek 22: Poměrné zastoupení jednotlivých složek přímých nákladů pro D- ³ He elektrárnu.....	71
Obrázek 23: Poměrné zastoupení jednotlivých složek přímých nákladů pro H- ¹¹ B elektrárnu.....	72
Obrázek 24: Porovnání výše celkové investice pro fúzní elektrárny s různými palivovými cykly.....	73
Obrázek 25: Srovnání celkových nákladů na palivo pro jednotlivé palivové cykly.....	74
Obrázek 26: Složky ceny paliva pro D-T reakci.....	77
Obrázek 27: Složky ceny elektrické energie pro D-T reakci.....	77
Obrázek 28: Cena elektrické energie pro fúzní elektrárny s jednotlivými palivovými cykly.....	78
Obrázek 29: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny pro D-D cyklus.....	78
Obrázek 30: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny pro D- ³ He cyklus.....	78
Obrázek 31: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny pro H- ¹¹ B cyklus.....	79
Obrázek 32: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny komponent pro D-D cyklus.....	79
Obrázek 33: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny komponent pro D- ³ He cyklus.....	79
Obrázek 34: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny komponent pro H- ¹¹ B cyklus.....	80
Obrázek 35: Porovnání vydatnosti pro jednotlivé zdroje energie.....	84
Obrázek 36: Srovnání investičních nákladů na jednotlivé druhy elektráren.....	85
Obrázek 37: Srovnání ceny elektrické energie z jednotlivých zdrojů.....	86

1. Úvod

Jedním z možných zdrojů energie je jaderná fúze. Její princip je lidstvu znám již déle než jedno století, k jejímu přímému energetickému využití však doposud nedošlo. Stejně jako u jiných zdrojů energie, je i přímé využívání jaderné fúze těsně spjata s palivy, které používá. K nim, respektive k vybraným aspektům jejich využití se vztahují i cíle této práce.

Prvním cílem této práce je popsat budoucí fúzní elektrárny, princip jejich fungování a jejich součásti, jakožto i současný stav jejich vývoje.

Fúzní elektrárny mohou využívat několik různých fúzních reakcí a tyto reakce spotřebovávají rozličná paliva. Druhým cílem této práce je tedy popis získávání těchto paliv, popis jejich zásob, zdrojů, obohacování a environmentálních problémů spojených s jejich užitím a stejně tak i popis jejich mimofúzního využití a ceny.

Třetím cílem této práce je analýza dostupnosti těchto paliv, jejich energetické výtěžnosti a velikosti jejich zdrojů z hlediska budoucí energetické spotřeby lidstva a rovněž také analýza vzájemných rozdílů jednotlivých paliv v daných problematikách.

Čtvrtým a posledním cílem této práce je srovnání jednotlivých ekonomických a environmentálních charakteristik fúzních paliv a jejich použití s vybranými palivy používanými v současné energetice. Také by měly být srovnány určité ekonomické a environmentální charakteristiky fúzních zdrojů energie s dalšími vybranými zdroji.

2. Základní popis fúzní elektrárny

2.1. Reakce

Podstatu fungování jaderné fúze lze dobře vysvětlit na základě objevů a Francise Astona a Alberta Einsteina. Konkrétně se jedná o Astonův objev rozdílu mezi celkovou hmotností (Δm) čtyř atomů vodíku a jednoho atomu helia; obojí je tvořeno čtyřmi nukleony, avšak tento rozdíl hmotností je natolik velký, že nemůže být způsoben jen rozdílem mezi hmotnostmi neutronu a protonu [1]. Vysvětlení tohoto deficitu poskytuje objev druhého ze zmíněných fyziků, konkrétně se jedná o ekvivalenci hmotnosti a energie. Pregnantně ji vyjadřuje následující vztah, ve kterém písmeno c zastupuje rychlost světla ve vakuu:

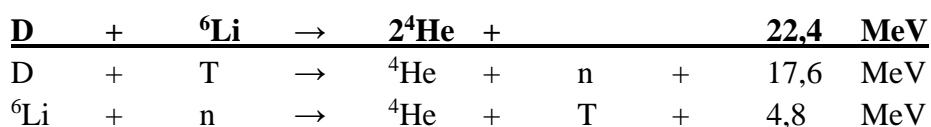
$$E = \Delta mc^2 \quad (1)$$

Ve zkratce je tedy možno říci, že při spojení (syntéze) několika prvků v prvek lehčí než železo 56 (^{56}Fe) dochází k uvolnění energie (E), jejíž množství je možné (podobně jako u štěpení) stanovit na základě rozdílu hmotností mezi částicemi do reakce vstupujícími a z ní vystoupivšími [2].

Problém představuje již samotný proces syntézy. Atomová jádra jsou kladně nabitá, a tudíž se v důsledku působení elektrických sil odpuzují. Působí na ně však také silná jaderná síla, která je naopak k sobě přitahuje. Ta je mnohem silnější než elektrická síla, avšak působí na nesrovnatelně nižší vzdálenost [3]. (Z výsledné síly pak vyplývá potenciální energie těchto dvou jader.) Úkolem tedy je dostat i přes působení elektrické síly jádra natolik k sobě, aby začalo převažovat působení sil jaderných, na což je nutné dodat jádrům dostatečné množství energie. Toto množství může být sníženo díky jevu kvantového tunelování, přesto zůstává nemalé.

Další problém představuje způsob, jak tuto energii jádrům dodat a jak zajistit, aby byla využita právě pro realizaci fúzní reakce. Ukazuje se, že nejvhodnější formou je tepelná energie; potřebné množství energie je však natolik velké, že za teplot z toho vyplývajících (v řádech stovek milionů stupňů) se látky vyskytují pouze ve formě plazmatu [4].

U prvních fúzních jaderných elektráren bude s největší pravděpodobností probíhat fúzní reakce mezi jádry deuteria (D) a tritia (T). To bude mít za následek vytvoření jádra helia (He) a neutronu (n). Celý proces jaderné reakce první generace fúzních jaderných elektráren tak lze souhrnně zapsat jako reakci D s Li za vzniku He, a to následujícím způsobem:



U druhé generace se počítá s tzv. D-D reakcí, která již nebude potřebovat lithium, neboť se budou slučovat pouze dvě jádra deuteria za vzniku dvou jader helia, dvou protonů a dvou neutronů. Tato reakce – v porovnání s předchozí mnohem obtížněji realizovatelná (viz Lawsonovo kritérium níže) – uvolňuje 43,2 MeV energie a lze ji popsat následujícím způsobem:

6D			→	2⁴He	+	2p	+	2n	+	43,2 MeV
D	+	D	→	³ He	+	n	+			3,3 MeV
D	+	D	→	T	+	p	+			4,0 MeV
D	+	³ He	→	⁴ He	+	p	+			18,3 MeV
D	+	T	→	⁴ He	+	n	+			17,6 MeV.

U dalších generací fúzních jaderných elektráren se počítá s využitím tzv. bezneutronové fúze. Ta již nebude způsobovat aktivaci reaktoru, neboť jejím produktem budou pouze elektricky nabitě částice, které jsou v reaktoru udržitelné magnetickým polem; její příklad je uveden níže [4]:



2.2. Lawsonovo kritérium

Primárním úkolem fúzních jaderných elektráren je bezesporu výroba (elektrické) energie, tudíž celková využitelná energie získaná z fúzní reakce musí být větší než celková energie vynaložená pro její uskutečnění (do čehož by také měly být započítány ztráty vzniklé při transformaci jednotlivých forem energie). Toto (krom jiného) popisuje tzv. Lawsonovo kritérium, pojmenované podle svého autora Johna D. Lawsons. Tento v něm praví, že „fúzní palivo musí na dostatečně dlouhou dobu dosáhnout takové hustoty a teploty, aby četnost fúzních jaderných reakcí zajistila celkový energetický zisk“, řečeno jiným způsobem: kritérium stanovuje podmínky, za kterých je možné jadernou fúzi využít pro výrobu užitečné energie [5]. Samotný Lawson pak dospěl k tomu, že nejnáze realizovatelnými reakcemi pro získávání energie z jaderné fúze jsou D-T a D-D reakce [6].

Podle energetické rovnováhy (tedy poměru mezi energií potřebnou pro uskutečnění dané reakce a energií reakcí získanou) daného reaktoru (či potažmo celé elektrárny) pak můžeme rozlišovat tři druhy (rovnice) Lawsonova kritéria:

- Vědecké vyrovnání (*scientific breakeven*): energie dodaná plazmatu (typicky pomocí ohřevu) se rovná (nebo je menší než) energii uvolněné fúzní reakcí. Toto kritérium se vztahuje pouze k samotné fúzní reakci.
- Zapálení (*ignition*): energetické ztráty plazmatu se rovnají nebo jsou menší než energie z fúzních reakcí zachycená plazmatem (což vlastně znamená, že plazma již nepotřebuje vnější dodávky energie, respektive že plazma si již dokáže samo udržet teplotu potřebnou pro realizaci dané fúzní reakce). Toto kritérium se taktéž vztahuje pouze k samotné fúzní reakci.
- Inženýrské vyrovnání (*engineering breakeven*): energie dodávaná plazmatu je menší (či rovna) než energie vyráběná danou elektrárnou jako celkem (po započítání vlastní spotřeby elektrárny). To vlastně znamená, že elektrárna je schopna vyrábět energii (neboli ji dodávat do elektrické rozvodné sítě). Toto kritérium se tak vztahuje na celou elektrárnu [7].

Jak vyplývá z odstavců výše, podmínky Lawsonova kritéria jsou v principu splnitelné dvěma způsoby, a to tak, že buď bude dosaženo opravdu vysoké hustoty jader po velmi omezenou dobu, nebo bude dosaženo o něco nižší hustoty jader, avšak po dobu znatelně delší. Minimální hodnota součinu hustoty jader (= počet iontů paliva v krychlovém metru [1]) a doby udržení (= míra rychlosti, kterou se z plazmatu ztrácí energie [1]) se pak různí podle jednotlivých reakcí a závisí také na teplotě, při které se daná reakce odehrává.

První způsob uskutečnění proběhl v praxi v termonukleárních zbraních. Tam se vhodných podmínek dosahuje pomocí výbuchu, a to chemického či jaderného (doposud pouze pomocí štěpné jaderné reakce čili výbuchu štěpné bomby). Na stejném principu se pak zakládá i myšlenka tzv. inerciálního udržení, podle které má být vhodných podmínek dosaženo pomocí laserů či případně jiných druhů záření.

S druhým způsobem uskutečnění pracuje tzv. magnetické udržení. Využívá toho, že - jak již bylo řečeno - při teplotách vhodných pro uskutečňování fúzní reakce se všechny látky nacházejí v plně ionizovaném plazmatickém skupenství, tudíž lze na jejich částice úspěšně působit magnetickým polem. Nejdále tento způsob doposud rozvinuly dva druhy zařízení: stellarátory a tokamaky; druhé z nich se v současné době dají považovat za nejpokročilejší zařízení pro uskutečňování jaderné fúze [5], [7]. Z tohoto důvodu je tento způsob realizace stěžejní pro tuto práci.

2.3. Tokamak

Tokamak je koncept reaktoru charakteristický „indukčně generovaným elektrickým proudem v plazmatu, který spoluvytváří magnetické pole a ohřívá plazma“ [7]. Samotná fúzní reakce probíhá ve vakuové nádobě (dále VN), jež má tvar prstence (toru). V něm je umístěno palivo. Z Lawsonova kritéria plyne, že pro reakci D-T, v současné době nejsnadněji uskutečnitelnou, bude muset teplota tohoto paliva dosahovat minimálně 160 000 000 °C. Takto horká látka se však nemůže dotýkat stěn VN a zabraňuje tomu šroubovicové (helikální) magnetické pole v této látce vytvářené. Vzniká jako součet dvou magnetických polí: slabšího poloidálního magnetického pole vzniklého jako důsledek vysokého elektrického pole, které je v nádobě indukováno pomocí transformátoru (v současnosti se užívají nejčastěji vzduchové s centrálním solenoidem jako primárním vinutím), na jehož jádru je VN umístěna; a silnějšího toroidálního magnetického pole tvořeného magnetickými cívkami navinutými kolem VN. Důsledkem tvorby těchto polí je také Joulovo teplo vyvolané indukovaným elektrickým proudem procházejícím plazmatem. Toto však vzniká pouze při změně proudu v primárním vinutí transformátoru, tudíž je jistá šance, že budoucí fúzní jaderné elektrárny budou pracovat v pulzním režimu. Tvar plazmatu může být upravován také dalšími skupinami cívek.

Ve fúzních reaktorech se energie z reakcí uvolňuje ve formě kinetických energií produktů reakcí. V případě bezneutronové fúze jsou nabitě, a tak podléhají vlivu magnetického pole čili zůstávají v plazmatu, také mu předávají svou energii a dále jej ohřívají. U prvních generací fúzních jaderných elektráren však budou uvolňovány i neutrony a podle zákona zachování hybnosti (ZZH) budou disponovat čtyřmi pětinaми uvolněné E (cca 14 MeV [7]). Následně budou absorbovány v komponentech reaktoru, což bude způsobovat jejich radiační poškození. Uvolněné neutrony musejí být absorbovány v blízkosti plazmatu, a to ještě před vnitřní stěnou VN.

Absorpce neutronů bude probíhat v tzv. jaderných komponentách nacházejících se uvnitř VN, mezi které patří především první stěna, blanket a divertor

Úkolem první stěny je chránit ostatní technologie před přímým kontaktem s plazmatem (pro případ jeho výtrysku mimo magnetické pole), tudíž je třeba, aby byla navržena pro vysoké plošné tepelné toky (pro ITER: nominální zatížení $0,5 \text{ MWm}^{-2}$, při přímé interakci i vyšší [7]).

Mezi první stěnou a stěnou VN se bude nacházet blanket, jenž musí absorbovat již zmíněné neutrony (v případě neutronové fúze), přeměňovat jejich kinetickou E na tepelnou a tuto odvádět z reaktoru (společně s tepelnou E přivedenou z první stěny). V případě první generace fúzních jaderných elektráren bude jeho úkolem též produkce tritia, a to pomocí absorpce neutronů v ${}^6\text{Li}$ (jak je popsáno výše). Blanket je podrobněji popsán v další části práce.

Poslední jadernou komponentou je divertor, jehož úkolem je odvod povrchové vrstvy plazmatu. Zaručí se tím odvedení nečistot a produktů fúzní reakce z reaktoru, neboť svou přítomností v plazmatu snižují jeho hustotu a tím znesnadňují fúzní reakci. Odvod bude realizován tak, že zmíněná svrchní vrstva bude v důsledku tvaru mag. pole narážet do terčů divertoru, kde bude absorbována – to s sebou nese poměrně vysoké plošné tepelné zatížení v řádu vyšších jednotek a nárazově i nižších desítek MWm^{-2} . Divertor bude s největší pravděpodobností lokalizován v dolní nebo horní části VN [5].

2.4. Pomocné technologie

Jak již bylo popsáno výše, plazma bude ohříváno pomocí Joulova tepla. Jeho množství však s rostoucí teplotou plazmatu klesá, a tak je vhodné do tohoto ohřevu zapojit i další technologie. Mezi ty patří například ohřev svazkem neutrálních atomů: do plazmatu jsou vstřikovány urychlené neutrální atomy deuteria, které díky své neutralitě pronikají magnetickým polem v tokamaku, vnikají do plazmatu, tam jsou ionizovány, a srážkami předávají svou energii ostatním atomům, čímž způsobují ohřev. Další metodou je radiofrekvenční ohřev: v jeho rámci jsou do plazmatu vysílány elektromagnetické vlny o specifických frekvencích odpovídajících harmonickým násobkům cyklotronových rezonančních frekvencí jeho elektronů a iontů a ty jsou jimi pohlcovány. Touto metodou lze též přispět ke stabilizaci plazmatu [4].

Fúze probíhá za vysokého vakua, což už částečně plyne ze samotného názvu VN. Toto vakuum zajišťují kryogenní vývěvy, které jsou součástí kryogenního systému. Jedna z možných variant fúzní jaderné elektrárny počítá pro magnetické cívky se supravodiči, jež pro svou činnost potřebují velmi nízké teploty. Ty by měly být zajištěny další částí zmíněného kryogenního systému.

Dalším nezbytným úkolem je diagnostika plazmatu. Je nutné znát jeho teplotu, tlak, složení a hustotu, a to včetně prostorového rozložení těchto vlastností. Dále je nutné rozeznávat různé nechtěné procesy, k nimž může v plazmatu docházet. To lze zajistit pomocí různých měření, avšak musejí probíhat v reálném čase. Provádění těchto měření je nicméně komplikováno vysokými teplotami panujícími v plazmatu a vylučuje užití kontaktních metod. Používané metody můžeme rozdělit na pasivní, v jejichž rámci se pouze zaznamenává záření vysílané plazmatem, a aktivní, kdy se analyzuje záření vzniklé v důsledku interakce plazmatu s částicemi do něj emitovanými v rámci měření [3].

Mezi další pomocné technologie se řadí řídicí systém, jeho popis však přesahuje rozsah této práce.

2.5. Výroba elektrické energie

Výroba elektrické energie v budoucích fúzních jaderných elektrárnách bude pravděpodobně probíhat podobně jako v současných jaderných elektrárnách (myšleny jsou především elektrárny s tlakovodním reaktorem). Zdrojem tepla budou jaderné komponenty a VN, ty budou chlazeny několika různými primárními okruhy, jež budou teoreticky pracovat s různými chladicími médii o různých parametrech, zvolených adekvátně k ochlazovaným komponentám. Sekundární okruh by pak měl odpovídat současným jaderným blokům (což nabízí vysokou míru standardizace a mnoho zkušeností z provozu) s tím rozdílem, že je možné místo Rankin-Clausiova cyklu užít cyklu Braytonova, a to v návaznosti na parametry jednotlivých primárních okruhů [5].

V případě bezneutronové fúze budou výslednými produkty fúzní reakce pouze nabitě částice, jež bude možné udržet pomocí magnetického pole. Jejich nenulový náboj však také umožňuje přeměnit jejich kinetickou energii za pomoci magnetického pole přímo na energii elektrickou bez toho, aby jako mezičlánek byla užívána energie tepelná či mechanická. To by mělo přinést zvýšení účinnosti elektrárny [8]. Tento způsob výroby elektřiny je nazýván magnetohydrodynamické generování.

2.6. Shrnutí

Tato kapitola objasňuje základy fungování jaderné fúzní reakce. Dále vysvětluje jednu z metod jejího dosažení v podmínkách panujících na Zemi, a to včetně jejího energetického využití. V neposlední řadě také představuje výčet jednotlivých komponent budoucích fúzních jaderných elektráren. Tyto informace poslouží v dalších kapitolách při popisu ekonomických a environmentálních aspektů palivových cyklů těchto budoucích zdrojů energie.

3. Současnost a budoucnost vývoje fúzních elektráren

Jak již bylo řečeno, tato práce se primárně zaměřuje na projekty fúzních jaderných elektráren spojených s tokamaky. Také je třeba dodat, že hlavní směr vývoje, který sleduje, vychází z projektu ITER (latinsky „cesta“, původně také *International thermonuclear experimental reactor* [9]) a na něj navazujícího projektu DEMO (*Demonstration fusion power plant*). Tento budoucí vývoj včetně termínů popisuje dokument [4] *European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy*. Skládá se z čtyř hlavních milníků; první dva tvoří právě ITER a DEMO, třetím je rozvoj vědy, technologií, inovací a průmyslové základny, který by měl dovolit přechod od demonstračních zařízení k velkým komerčním zařízením, čtvrtým je pak vysokokapacitní průmyslová produkce fúzních jaderných elektráren.

3.1. Před reaktorem ITER

Co se týče vývoje využití fúzní energie, před spuštěním projektu ITER bylo nutné vůbec dokázat, že je fúze „vědecky přípustná“ [4]. K tomu byla určena zejména následující tři zařízení:

- TFTR (*Tokamak fusion test reactor*) byl americký (USA) experimentální fúzní reaktor. Jeho provoz byl zahájen v roce 1986. Vybudován byl s cílem dosažení vědeckého vyrovnání. K jeho uzavření došlo v roce 2002 [10].
- JET (*Joint European Torus*) je spojený evropský experimentální fúzní reaktor, který zahájil provoz v roce 1984. Byl postaven s tímž cílem jako TFTR, od roku 2009 je také určen pro zkoušky technologií pro ITER [11]. JET rovněž používá podobné palivo.
- JT-60 (*Japan Torus-60*) je japonský experimentální fúzní reaktor, jenž zahájil svůj provoz v roce 1985. Jeho primární cíl byl původně stejný s výše uvedenými dvěma reaktory. Mezi léty 2013 a 2020 proběhl jeho upgrade na verzi JT-60SA (SA = *super advanced*). Ta pracuje s plazmatem o stejném tvaru jako bude pracovat ITER [12].

3.2. ITER

ITER je mezinárodní projekt, jehož cílem je realizace termojaderného experimentálního reaktoru o fúzním výkonu 500 MW. Jeho úkolem je především testovat technologie a zařízení pro budoucí fúzní jaderné elektrárny [7]. Původně měla stavba trvat cca 10 let a stát měla 6 miliard dolarů. Teoretické práce byly zahájeny v roce 1988 [1] a ITER měl být spuštěn v roce 2007.

Projekt však od začátku provázely problémy, a to především finanční. V roce 2001 došlo k přepracování celého projektu, kromě jiného byly sníženy rozměry reaktoru a požadavky na projekt celkově. V roce 2005 bylo rozhodnuto o umístění reaktoru poblíž francouzského výzkumného střediska Cadarache. Výstavba začala v roce 2007 a dle dokumentu [4] by měl být ITER spuštěn v roce 2025, přičemž dosažení plného fúzního výkonu je plánováno na rok 2033.

Dle [4] je ITER nejdůležitějším krokem na cestě k fúzní jaderné elektrárně a jeho fúzní výkon má dosahovat hodnot více než desetkrát vyšších než u předchozích zařízení. V prvním desetiletí provozu je jeho primárním úkolem dosáhnout maximálního výkonu, v druhém desetiletí mají být vyzkoušeny pokročilé režimy provozu fúzního reaktoru. V průběhu provozování reaktoru ITER se počítá s jeho postupným vylepšováním.

3.3. DEMO

Dalším stupněm ve vývoji je maximální využití možností reaktoru ITER a příprava konstrukce elektrárny DEMO. Začátek (zahájení zpracování projektové dokumentace) je plánován na rok 2029. V roce 2040 by mělo následovat oslabení využívání reaktoru ITER a začátek výstavby elektrárny DEMO, ta by měla i se zprovozněním trvat do roku 2040 [4].

DEMO má představovat jakýsi mezikrok mezi reaktorem ITER a komerčními fúzními jadernými elektrárnami, přičemž jeho hlavními cíli jsou:

- produkce elektrického proudu a jeho dodávání do sítě, přibližný výkon v řádu nižších stovek MW,
- výroba dostatečného množství tritia pro uzavření vlastního palivového cyklu a
- ukázka všech technologií potřebných pro výstavbu komerčních fúzních jaderných elektráren.

Pro dosažení těchto stanovených cílů pak [4] určuje několik výzev, kterým v současné době musí realizace fúzní energie čelit a které musí být vyřešeny:

- provozní stavy plazmatu,
- odvod tepla z reaktoru,
- materiály odolné zatížení vysokými neutronovými toky,
- tritiová soběstačnost,
- vnitřní (inherentní) bezpečnost,
- integrovaný design elektrárny a
- konkurenceschopná cena elektřiny.

Dokument také zmiňuje stellarátory jako možnou budoucí (v dlouhodobém výhledu) alternativu k tokamakům.

Celkově však není možné nazývat reaktorem DEMO jen jeden závod, neboť jde spíše o jakousi vývojovou fázi na cestě k funkční fúzní jaderné elektrárně. Je tedy možné, že se z něj vůbec nestane mezinárodní projekt (snad vyjma Euratomu) a každý z účastníků bude budovat vlastní národní verzi reaktoru DEMO. Podle evropských představ se pak samotná fáze DEMO bude skládat ze dvou částí, DEMO1 (blízká fáze) a DEMO2 (pokročilá fáze). DEMO1 bude využívat spíše realističtější a zaručenější řešení, kdežto ta pokročilá a méně jistá budou vyvíjena v rámci DEMO2.

3.4. Shrnutí

Tato kapitola shrnuje minulý, současný a budoucí vývoj fúzních jaderných elektráren, od předchůdců reaktoru ITER po první komerční prototyp. Také popisuje úkoly stanovené pro jednotlivé fáze vývoje, nastiňuje časové rozvržení těchto fází a zmiňuje některé nesnáze, do nichž se tento vývoj v průběhu času dostal. Stejně jako celá práce se zaměřuje na projekty spojené s tokamaky a primárně sleduje vývojovou linii ITER → DEMO. Tyto informace jsou nutné pro další kapitoly této práce, které se zaměřují na konečné části tohoto vývoje, konkrétně na environmentální a ekonomické aspekty jejich palivových cyklů.

4. Palivové cykly budoucích fúzních elektráren

Jak již bylo naznačeno, z fyzikálního hlediska jsou pro jadernou fúzi vhodná paliva z lehkých prvků. Příklady reakcí uvažovaných pro jednotlivé generace fúzních jaderných elektráren jsou uvedeny v kapitole 2. Z pohledu environmentálních dopadů jsou důležité vstupy a výstupy do a z něj, a to od vytěžení po likvidaci; pro ekonomický pohled je pak důležitá jejich cena. Hodnocení z hlediska environmentálního je možné odhadnout udržitelnost užití těchto druhů paliva. Pro tento odhad je nutno znát velikost zásob a zdrojů. Jaderná fúze se také řadí ke zdrojům energie pracujícím s ionizačním zářením, proto je též možné na jednotlivá paliva nahlížet z pohledu radiační ochrany. Také bude vyhodnocena toxicita a karcinogenita jednotlivých paliv.

Environmentální dopady

Pro stanovení environmentálních dopadů jednotlivých palivových cyklů budoucích fúzních jaderných elektráren je nejprve třeba definovat výraz „environmentální dopad“. Dle [13] se jedná o „jakékoli změny životního prostředí plynoucí z činnosti daného zařízení, přičemž se může jednat o změny jak příznivé, tak nepříznivé.“ Také se bude též možné tázat na „udržitelnost“ jednotlivých cyklů. Z pohledu ekologického, případně socioekonomického, se termín „udržitelný“ týká takového stavu společnosti, ve kterém je zajištěna většina potřeb jejich členů, zároveň tím však není ohroženo naplnění potřeb budoucích generací. Je možné definovat dva koncepty udržitelnosti, rozdělitelné dle obtížnosti jejich splnění. Předchozí definici udržitelnosti odpovídá spíše koncept druhý [14]:

- „Slabá“ udržitelnost, což je takový druh udržitelnosti, pro jehož splnění stačí, aby celkové množství přírodního a přetvořeného kapitálu zůstalo před zahájením činnosti a po jejím ukončení nezměněné. Z toho tedy plyne, že tato definice se zabývá primárně ekonomickou podstatou věci, ačkoli ta by v sobě skrze externality měla zahrnovat i další faktory.
- „Silná“ udržitelnost, což je takový druh udržitelnosti, který vyžaduje, aby stávající zásoba přírodního kapitálu byla udržována a rozšiřována, neboť přírodní a přetvořený kapitál jsou sice komplementární, nejsou však volně zaměnitelné. Tato definice se tedy zaobírá životním prostředím jako celkem a je často zastávána ekology a environmentalisty [15]. Vzhledem k praktické nemožnosti tohoto dosáhnout se autor práce spokojuje s tím, když bude dokázáno, že zásoby daného paliva jsou schopny postačit po dobu srovnatelnou s dobou existence rodu *Homo* (člověk), která činí přibližně 2,75–2,80 milionu let [16]. Tento časový úsek byl zvolen, neboť se autorovi nezdařilo nalézt spolehlivý odhad délky budoucí obyvatelnosti planety Země pro člověka a délka existence druhu *Homo sapiens*, která činí 315 000 let [16], je pro daný účel příliš krátká.

Zásoby a zdroje

zásoby a zdroje vychází z anglických termínů *reserves* (zásoby, rezervy) a *resources* (zdroje, zásoby) a jsou užívány jedním ze stěžejních pramenů této práce ([20]). Zásoby jsou definovány jako prokázaná ložiska, která mohou být v dané době těžena ekonomicky smysluplnou formou. Zdroje jsou takové koncentrace daného materiálu v takové formě a kvantitě, že jejich extrakce je teoreticky uskutečnitelná [14].

Radiační ochrana

Dle [18] se radiační ochranou myslí systém technických a organizačních opatření k omezení ozáření osob a životního prostředí a omezení následků nehod. V této práci hodnotí části zabývající se radiační ochranou především to, zdali zkoumaná látka může vůbec v ohrožující míře nějaké ozáření způsobovat.

Toxicita a karcinogenita

U každého paliva bude též vyhodnocena jeho toxicita a karcinogenita.

4.1. První generace fúzních elektráren

V případě první generace fúzních jaderných elektráren a potažmo reaktoru DEMO je z pohledu paliva nezbytné hovořit o třech izotopech: deuterium (^2H) a lithium (^6Li) na vstupu, helium (^4He) na výstupu. V případě reaktoru DEMO se počítá i s potřebou jistého množství tritia (^3H) pro spuštění elektrárny, více níže [19]. Jinak však bude tritium tvořeno v blanketech těchto zařízení. Kvůli jejich užití je proto nutné, aby tato kapitola pojednávala i o beryliu (^9Be) a olovu (^{208}Pb), neboť jeden z těchto prvků bude s největší pravděpodobností v blanketu obsažen.

4.1.1. Blanket

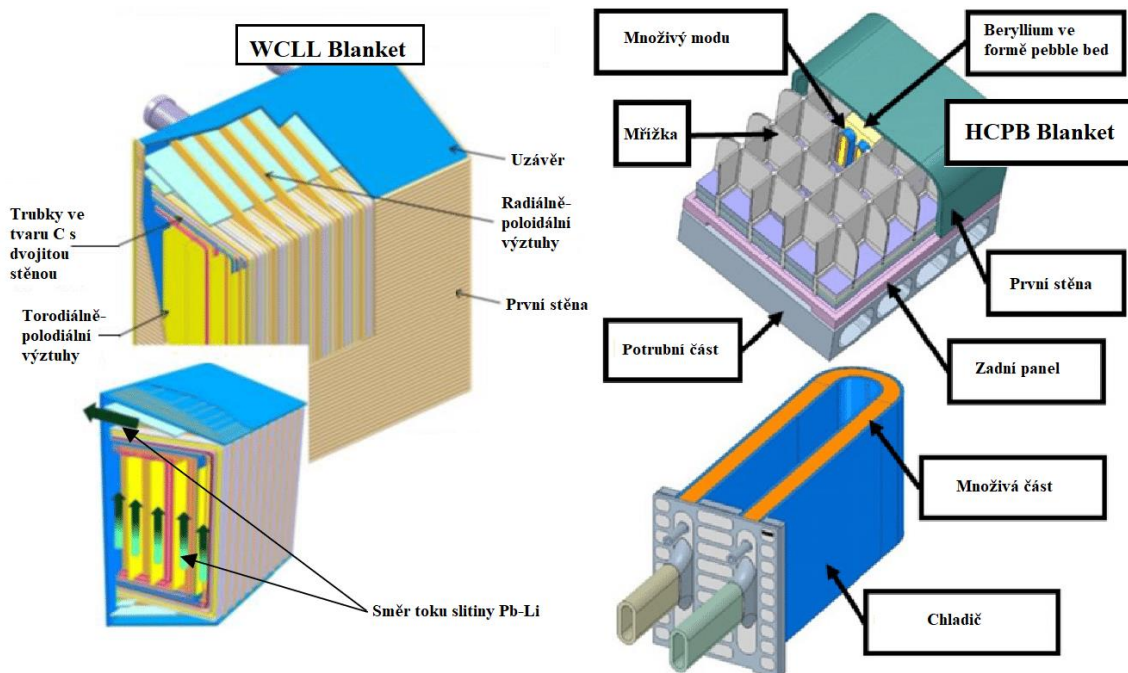
Blanket bude pro reaktor DEMO a první generaci fúzních jaderných elektráren klíčová součástí. Jak již bylo zmíněno, má řadu rolí:

- absorbování většiny (cca 80 %) energie uvolněné fúzní reakcí ve formě kinetické energie neutronů,
- výroba dostatečného množství tritia z lithia pomocí jeho reakce s neutrony,
- účast na stínění dalších komponent elektrárny před radiací z reaktoru a
- umožnění efektivní extrakce tritia z něj samotného [20].

Bylo zkoumáno několik možností realizace blanketu, které by měly dostát těmto požadavkům. V době spisování této práce však byly realizaci nejbližší dva koncepty: HCPB (*helium-cooled pebble bed* – heliem chlazený pebble bed) a WCLL (*water-cooled lithium lead* – vodou chlazené lithium olovo). Oba tyto koncepty navíc budou testovány v reaktoru ITER. Existuje i několik dalších konceptů blanketů, jejich studium však přesahuje rozsah této práce.

HCPB

Koncept HCPB je založen na použití sloučeniny lithia jako množivého materiálu, berylia jako násobiče neutronů a helia jako chladiwa. Helium by v případě reaktoru DEMO mělo být pod tlakem 8 MPa s teplotou na vstupu 300°C a na výstupu 500°C, lithium by mělo být v keramické formě a berylium ve formě pebble bed. Tritium by pak mělo být z blanketu vyplavováno heliem s malým přídatkem (cca 0,1 %) vodíku, což je úkolem systému TER (*Tritium extraction and removal* – extrakce a odstranění tritia) [20]. Nákres realizace takového blanketu je na obrázku 1.



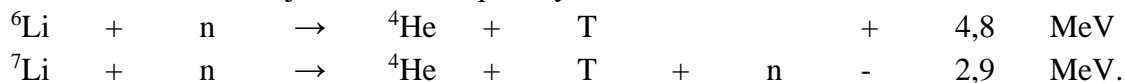
Obrázek 1: Schéma modulu blanketu koncepce WCLL a směr toku slitiny Pb-Li, schéma modulu blanketu konceptu HCPB a jeho množivý modul ve tvaru U, převzato ([21a], [21b])

WCLL

Tento koncept využívá slitinu lithia a olova jako množivého materiálu, násobiče a také pro odvod tritia z reaktoru. Blanket samotný je chlazen s podobnými vlastnostmi, jaké má voda používaná v primárním okruhu tlakovodních reaktorů, což je tlak 15,5 MPa, teplota na vstupu 295 °C a teplota na výstupu 328 °C. Tento způsob chlazení a potažmo tato koncepce blanketu se tak alespoň pro první fúzní jaderné elektrárny zdá jako levnější a jednodušeji realizovatelná varianta, neboť s vodou o těchto parametrech má lidstvo již mnohé zkušenosti. Slitina PbLi se bude nacházet v tekuté formě. Náskres realizace takového blanketu je na obrázku 1.

4.1.2. Lithium (${}^6\text{Li}$)

V první generaci fúzních jaderných elektráren bude lithium sloužit jako zdroj tritia (T). Toto může vzniknout následujícími dvěma způsoby:



Izotop ${}^7\text{Li}$ se v přírodě vyskytuje častěji, přesněji 92,4 % přírodního lithia je ${}^7\text{Li}$, zatímco ${}^6\text{Li}$ je pouze 7,6 % [22], reakce neutronu s tímto izotopem má však značně nižší míru pravděpodobnosti a je endotermická [23]. Původně byly uvažovány varianty blanketů jak s přírodním, tak s obohaceným ${}^6\text{Li}$, dnešní návrhy počítají typicky jen s lithiem obohaceným [24].

Zdroje

Lithium je možné na Zemi získávat ze tří základních zdrojů: z minerálů, solných roztoků a mořské vody. K roku 2021 se největší lithiové doly nacházely v Severní Americe a Austrálii [17]. Výroba lithia tímto způsobem se dá dělit na dvě fáze, v první je ruda zpracovávána mechanicky, v druhé chemicky. Má se za to, že kromě několika australských nalezišť již větší ekonomicky smysluplná ložiska lithiových rud neexistují.

V solných roztocích se lithium vyskytuje v koncentraci maximálně 1500 ppm [14] a nejvýznamnější závody pro produkci lithia z tohoto zdroje se k roku 2021 nacházely v Jižní Americe. V roce 2021 bylo známo 23 různých metod, jak extrahovat lithium ze solných roztoků, konkrétní metoda je volena na základě složení daného roztoku. V podstatě se ale vždy jedná o jeho postupné odpařování vody díky slunečnímu záření, přičemž krom lithia jsou získávány i další produkty, např. chlorid sodný, draslík, sulfáty či bor.

Průměrná koncentrace lithia v mořské vodě je 0,17 ppm, tato metoda získávání lithia je však značně nákladná. V roce 2021 byla extrakce lithia z vod (zde jsou započítávány i slaná jezera a geotermální prameny) prováděna na poloprůmyslové a průmyslové úrovni pouze v USA, Japonsku a Izraeli, použitelné metody byly též zkoumány v Rusku, Německu, Bulharsku a Jižní Koreji, maximální roční výtěžky se však pohybují v nižších desítkách tun. Získávání lithia je předmětem intenzivního vědeckého výzkumu (primárně metody získávání z kapalin), přičemž je postupně snižována energetická náročnost těchto procesů a důraz je také kladen na zvyšování kvality výsledných produktů, což by mělo vést ke snížení relativní spotřeby lithia [25].

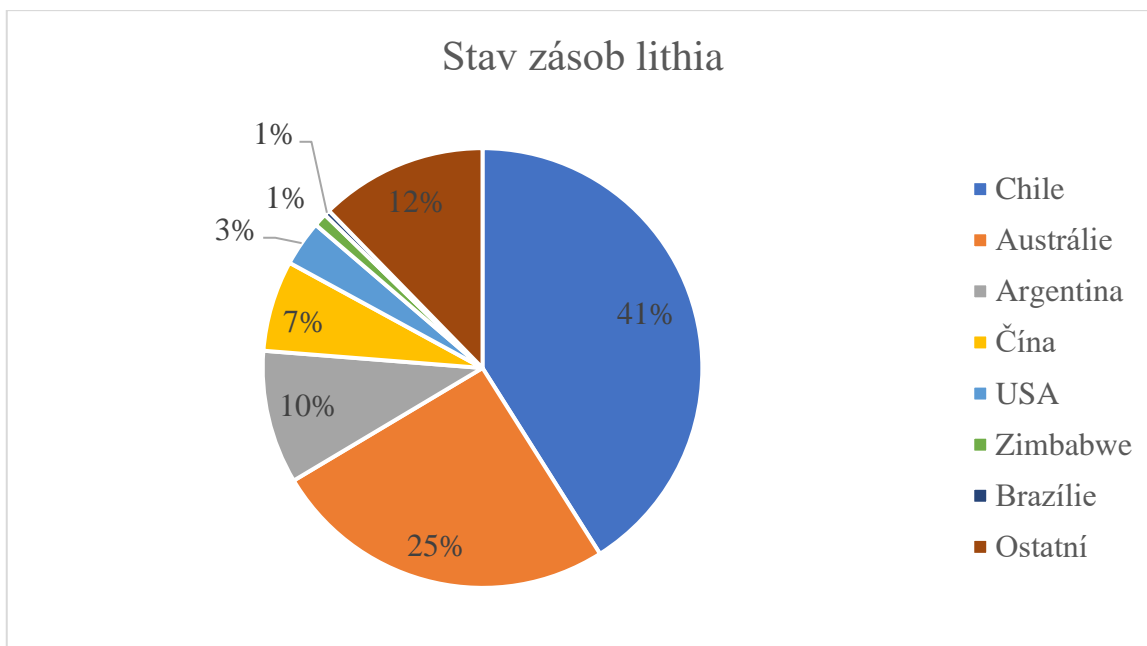
Produkce a zásoby

V celku byla největším producentem lithia v roce 2021 Austrálie, následována Chile a Čínou, celkem bylo vyprodukováno 100 kt. Dle [26a] by produkce měla v budoucnosti růst, v roce 2030 by již celosvětově měla dosahovat 1 466 kt. Tento trend je patrný i z dat z minulých let, neboť od roku 2010 vzrostla světová produkce lithia na téměř čtyřnásobek.

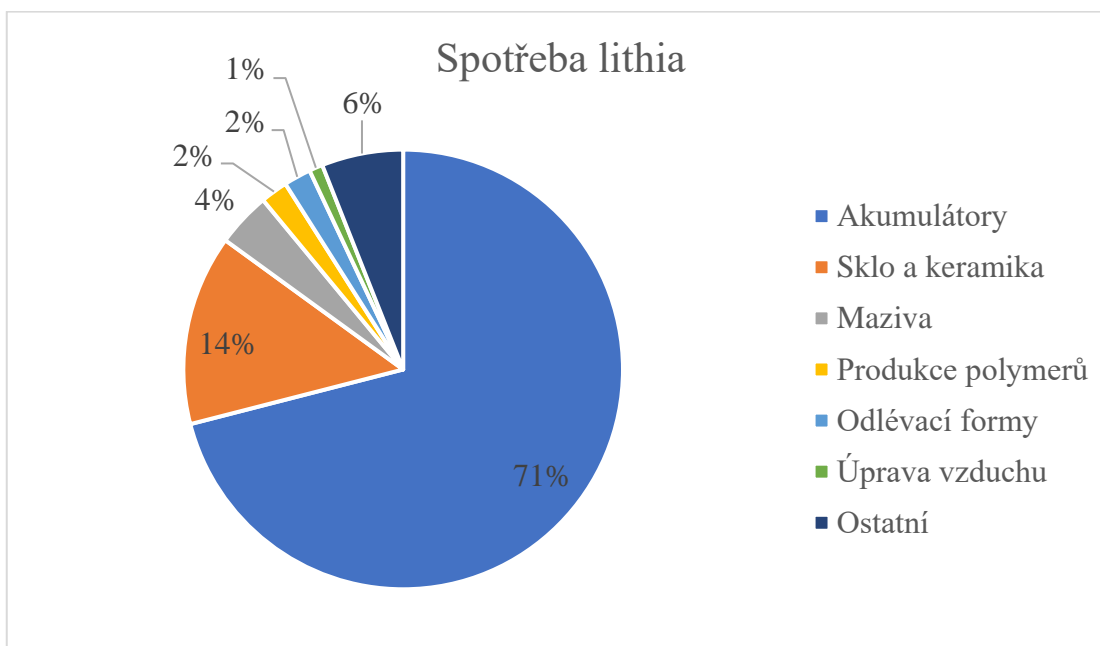
Největšími zásobami disponuje Chile, následována Austrálií a Argentinou. Zásoby dalších států jsou oproti těmto hodnotám již marginální. Celkově jsou pozemské světové zásoby lithia dle [17] odhadovány na 21 Mt (což představuje 1,3 Mt ${}^6\text{Li}$) a pozemské světové zdroje na 89 Mt (což představuje 5,5 Mt ${}^6\text{Li}$). V kategorii zdrojů stojí na první příčce Bolívie, za ní je Argentina a Chile. Zdroje v mořské vodě je na základě průměrné koncentrace lithia možné odhadnout na 226 Gt (17,2 Gt ${}^6\text{Li}$). Rozložení zásob ve vztahu k jednotlivým zemím je zobrazeno na obrázku 2 [17].

Graf rozložení spotřeby lithia pro jednotlivé průmyslové obory v roce 2020 je znázorněn na obrázku 3 [26b], Předpokládá se, že v roce 2030 spotřebují akumulátory až 93 % světové produkce lithia. V době sepsání této práce probíhala v jisté omezené míře recyklace kovového lithia a lithiových akumulátorů a očekávalo se, že míra recyklace bude v dalších letech stoupat. V oblasti akumulátorů, keramik, maziv a skel je možné nahradit lithium i jinými prvky. Mezi ně patří vápník, hořčík, rtuť a zinek pro akumulátory, vápník a hliník pro maziva a dále sodík a draslík pro skla a keramiky [26b].

Cena lithia se pohybuje kolem 17 \$/kg ačkoli je očekáván jeho růst, a to především z důvodu nárůstu poptávky, ale také například kvůli rostoucím nákladům na těžbu [17].



Obrázek 2: Podíl jednotlivých zemí na celkových zásobách lithia, převzato ([17])



Obrázek 3: Rozdělení spotřeby lithia jednotlivými průmyslovými odvětvími v roce 2020 převzato ([26b])

Obohacování

Metody obohacování lithia byly vyvinuty ve 40. a 50. letech 20. století v rámci vývoje termojaderných bomb. V USA obohacování probíhalo typicky na 40%, 60% či 95,5 %, odpadem zůstávalo ochuzené lithium s obsahem ${}^6\text{Li}$ mezi 1 a 4 %; hlavní středisko bylo v Oak Ridge. Procesy obohacování využívaly velké množství rtuti a v rámci výroby 442 t obohaceného Li bylo do životního prostředí vypuštěno 330 t Hg, celkově bylo užito 11 000 t Hg. V době vzniku této práce pocházela většina na trhu dostupného obohaceného lithia právě z přebytků z Oak Ridge, v roce 2016 byla cena Li obohaceného na 95 % 68 000 \$/kg při převedení na dnešní hodnotu dolaru [27].

V roce 1982 však bylo odhadnuto, že výrobní cena 95% ${}^6\text{Li}$ je 3 200 \$/kg při převedení na dnešní hodnotu [27], tento rozdíl v cenách je způsoben pravděpodobně značnou disproporcí mezi nabídkou a poptávkou.

Metody obohacování lithia lze rozdělit do čtyř skupin: chemické, elektrochemické, chromatografické a laserové. Dle [28] splňuje nejlépe výše kladené požadavky proces ICOMAX (*Improved column-based mercury amalgam exchange*) – chemická metoda založená na lithiovém amalgámu. Většina obohaceného lithia v Oak Ridge byla vyrobena podobnou metodou. Její primární výhodou je možnost zpracovávat velké množství materiálu, jednoduchost a osvědčenost. Rtuť je navíc relativně dostupný materiál. O dosavadním používání této metody je však známo jen omezené množství informací, jelikož většina z nich stále podléhá utajení. V době vzniku této práce již v omezené míře probíhal výzkum tohoto procesu, např. v Laboratoři KIT v HgLab Karlsruhe, omezovaly se však stále na laboratorní užití.

Pokud by měl reaktor DEMO začít pracovat v 50. letech 21. století, je nutné tento proces na průmyslové úrovni zvládnout do konce 30. let [28]. Vzhledem k stavu výzkumu této technologie v době vzniku této práce však není známa její energetická náročnost či dopady na životní prostředí.

Jak již bylo řečeno, při obohacování lithia vzniká jako vedlejší produkt ochuzené lithium. Toto má dle [14] stejné chemické vlastnosti jako přírodní lithium, tudíž je pro nefúzní aplikace stejně vhodné.

Shrnutí

Tato část práce poskytuje náhled na procesy spojené s lithiem od jeho těžby po využití ve fúzní jaderné elektrárně, včetně jejich environmentálních dopadů. Některé aspekty a procesy, jako je získávání lithia z moře či jeho obohacování, však ještě nejsou plně prozkoumány, tudíž nelze přesně stanovit konkrétní hodnoty. Uvedené environmentální následky těžby by v budoucnu mohly být sníženy [29].

Z krátkodobého hlediska může být fúzní energetika ohrožena nedostatkem lithia z těchto důvodů:

- využití pozemských zásob lithia pro nefúzní aplikace, především pro výrobu akumulátorů, společně s pozdním zvládnutím získávání lithia z moře či případné navýšení ceny lithia nad mez rozumnou pro použití ve fúzní energetice spojené právě s těmito důvody,
- nenalezení vhodné metody pro získávání lithia z moře, a to jak z energetického, tak z environmentálního hlediska,
- pozdní zvládnutí obohacování lithia nebo jeho vysoká energetická, finanční či environmentální náročnost.

Při porovnávání ceny obohaceného a přírodního lithia je patrné, že majoritu ceny obohaceného lithia tvoří náklady na surovinu jako takovou. Proto je otázkou, jak by do ceny obohaceného lithia promluvila změna cen energií, lepší zvládnutí obohacování, ale také případný masivní nárůst ceny základní suroviny z důvodu velkého zvýšení poptávky.

Z pohledu radiační ochrany je lithium téměř bezproblémovým palivem, neboť o jeho radioaktivitě se dá hovořit až po jeho vložení do fúzního reaktoru. Otázkou je případné přepracovávání lithia již ve fúzní energetice použitého. Lithium způsobuje těžké poleptání kůže a poškození očí [22].

Určení slabé udržitelnosti lithia jako zdroje energie závisí na jeho budoucí ceně a na tom, zda v ní budou započítány i veškeré externality. Silná udržitelnost závisí na době, po kterou jsou zásoby a zdroje lithia schopny vystačit. Toto bude vyhodnoceno v další části této práce.

4.1.3. Tritium (T)

V době vzniku této práce byly známy tři izotopy vodíku: ^1H , jenž je též zvaný protium, D, jež je též zvaný deuterium, a T, jež je též zván tritium. O všech třech pojednává tato práce, izotopy D a T jsou popsány již v části o první generaci budoucích fúzních jaderných elektráren, neboť jsou součástí D-T cyklu. Deuterium je nicméně součástí i reakcí druhé generace, mezi jinými hlavně D-D cyklu. ^1H je pak zvažován pro třetí generaci, primárně pro cyklus $^{11}\text{B}-^1\text{H}$. Přírodní vodík se skládá z 99,9885 % z protia, zbytek je pak tvořen deuteriem. Oba tyto izotopy jsou stabilní. Tritium je izotopem umělým a rozpadá se s poločasem rozpadu 12,32 let β^- rozpadem na ^3He [30].

V první generaci fúzních jaderných elektráren bude tritium vznikat z lithia (^6Li). Pro uskutečnění tohoto děje je však nutný funkční fúzní reaktor, který však ke své funkci tritium nutně potřebuje. Proto je vhodné uvažovat jistou iniciační dávku tritia. Dle [19] by tato dávka neměla převyšovat 100 g na reaktor o fúzním výkonu 3 260 MW. Po zahájení provozu by elektrárna měla být tritiově naprosto samostatná, ba co více, měla by vykazovat i jisté přebytky. Toto platí i pro reaktor DEMO. O tritiovém hospodářství fúzních jaderných elektráren se zmiňuje dokument [7], který krom jiného řeší také bezpečnost takového provozu.

V případě reaktoru ITER by prvotní dávka tritia měla činit 20 kg a spotřeba by měla činit 0,8 až 1,2 kg/rok. Pro aplikaci ve fúzní energetice jsou v současné době jako zdroj T zvažovány primárně reaktory CANDU. Tyto a další zdroje jsou dále popsány v kapitole Získávání. Tritium z reaktorů CANDU je v současnosti používáno pro komerční aplikace, a to v množství 0,2 kg/rok. Pokud bude současná spotřeba a produkce zachována a pokud se zohlední ztráty, po ukončení provozu reaktoru ITER by se mělo ve skladech nacházet 14 až 28 kg T. V případě reaktoru DEMO by dle zvolené varianty blanketu měla prvotní dávka tritia činit až 18,1 kg. Je tudíž možné, že jeho zásoby nebudou postačující [19].

Získávání

V současné přírodě existují tři hlavní zdroje tritia. Prvním je voda vypouštěná do vodotečí lehkovodními a těžkovodními jadernými elektrárnami, v nichž původně sloužila jako moderátor neutronů. Tento zdroj lze označit za umělé. Další dva zdroje jsou molekuly N_2 a O_2 , respektive jejich reakce s neutrony. Celkové roční množství takto vyprodukovaného tritia je však malé až zanedbatelné. Proto je pro ITER, DEMO a nejméně první generaci budoucích fúzních jaderných zařízení nutno volit jeho jiné, rovněž umělé zdroje.

Mezi umělé zdroje tritia patří již zmiňované reaktory CANDU (*Canada deuterium uranium* – Kanada deuterium uran). Dále je možno zvažovat produkci tritia pomocí urychlovačů, tato varianta bývá označována APT (*Accelerator production of tritium* – produkce tritia pomocí urychlovačů); klasických komerčních lehkovodních reaktorů, tato varianta bývá označována CLRW (*Commercial light water reactor* – komerční lehkovodní reaktor); a urychlovačem řízených podkritických souborů, tato varianta bývá označována ADS (*Accelerator driven subcritical system* – akcelerátorem řízený podkritický systém).

V reaktorech CANDU je tritium produktem reakce deuteria s neutronem. Vzhledem k průměrnému obsahu moderátoru v těchto reaktorech, jeho přirozeným ztrátám, poločasu rozpadu tritia, účinnému průřezu D₂O pro danou reakci a průměrné hustotě neutronového toku je průměrná roční produkce tritia jednoho takového reaktoru 103 g. Při celkovém počtu 31 reaktorů CANDU v provozu tedy produkce činí 3,914 kg/rok. Ve světě existují pouze dva závody schopné extrahovat T z těžké vody, oba se nacházejí v Kanadě. Jejich celková kapacita činí 3,27 kg/rok při účinnosti 97 %. Cena takto získaného tritia je 38 000 \$/g.

Koncept APT vychází z projektu Armády Spojených Států Amerických. Design počítal s urychlením protonů na energii 1,7 GeV, přičemž na jeden neutron mělo být díky terči ze směsi olova a wolframu vyzářeno 47 neutronů. Tyto měly být moderovány těžkou vodou a následně absorbovány v lithiu či ³He. Celkově měla produkce T činit 7,4 kg/rok a cena závodu měla v přepočtu činit 12,9 miliardy \$ [34] při životnosti 40 let. Projekt byl však opuštěn v roce 1998. Odhadovaná cena tritia z takového zdroje pak činí 203 000 \$/g.

Koncept CLWR spočívá v aplikaci tritium produkujících vyhořívajících regulačních tyčí. Tyto byly aplikovány v reaktoru Watts Bar I. Cílem projektu je produkce 1,5 kg/rok při ročním zisku tritia z jedné tyče činícím 0,75 g. S cenou celého projektu činící při přepočtu 3,44 miliardy \$ [27] při trvání 40 let je tento způsob výroby T levnější než APT, tento způsob však produkuje i radioaktivní odpad. Cena takto získaného tritia by měla být 105 000 až 163 000 \$/g.

Koncept ADS se skládá ze podkritického souboru, terče z tekutého těžkého kovu a urychlovače protonů. Na základě konkrétního provedení je pak produkce tritia odhadovaná na 0,153 až 8,467 kg/rok. Při vzniku této práce se však autorovi nepodařilo dohledat jakékoliv zmínky o ceně.

Jednotlivá řešení jsou srovnána v tabulce 1 [31]. Jak již bylo popsáno, po reaktoru DEMO je vyžadována tritiová soběstačnost. Pokud ho tedy bude dostatek pro iniciační dávku, mělo by teoreticky být dostatečné množství produkováno v jeho blanketu, a to by pak mělo stačit i pro iniciaci fúzních reaktorů první generace.

Zdroj	Produkce [kg/(rok*závod)]	Cena [1000 \$/kg]
CANDU	0,103	38 000
APT	7,4	203 000
CLWR	1,5	105 000 – 163 000
ADS	0,153 – 8,467	-

Tabulka 1: Srovnání jednotlivých variant produkce tritia

Z environmentálního pohledu je možné zařadit výrobu tritia mezi dobře probádané oblasti, neboť se jedná o práci s jadernými reaktory či s jiným využitím radioaktivity, ionizujícího záření apod. V případě využívání některé z variant pracujících s urychlovači je nutné také zvažovat původ energie využitě pro jejich pohon.

Skladování

V budoucích fúzních jaderných elektrárnách využívajících D-T reakci bude tritium skladováno v tritiovém kontejnmentu a v množství v řádech jednotek kg. Jak již bylo zmíněno, tritium je velmi slabý β zářič, tudíž k odstínění produktů jeho rozpadu stačí 6 mm vzduchu či 1 μm kovu. Proto je možné tvrdit, že představuje zdravotní riziko pouze v případě požření či vdechnutí – je tedy nezbytné zabránit jeho únikům. To je však znesnadněno jeho vysokou permeabilitou, únikům nicméně může být zabráněno pomocí použití vícestěnných zásobníků. Dojde-li k jeho úniku mimo kontejnment, mělo by díky své nízké hustotě rychle stoupat do vyšších vrstev atmosféry, kde by se mělo rozptýlit.

Stejně jako v případě jiných provozů představuje i pro budoucí fúzní jaderné elektrárny ohrožení seismicita. Tento problém by však měla řešit pasivní a aktivní antiseismická opatření. V případě reaktoru ITER představuje pasivní opatření seismická izolace, aktivním opatřením je monitorovací systém a systém včasného varování [7].

Likvidace

V teoretickém případě existence přebytků tritia z provozu budoucích fúzních jaderných elektráren je lze prodávat pro další použití. Stejně tak je možné je využít jako prvotní dávku pro další fúzní reaktory. Jak již bylo zmíněno, T se rozpadá na ^3He , které je stabilní a má své teoretické využití jako palivo v budoucích fúzních jaderných elektrárnách.

Shrnutí

Tato část práce poskytuje náhled na procesy spojené s tritiem od jeho výroby po využití ve fúzní jaderné elektrárně či likvidace jeho přebytků, včetně jejich environmentálních dopadů. Možnosti a následky úniků tritia byly také popsány.

Fúzní energetika může být ohrožena nedostatkem tritia z těchto důvodů:

- využití zásob tritia pro reaktor ITER a komerční aplikace spojené s jeho nedostatkem pro reaktor DEMO a následující,
- odstavní reaktorů CANDU, zastavení jejich výstavby či nedostatečné zvládnutí produkce tritia jinými zmiňovanými metodami, a to především z pohledu ekonomického,
- nedostatečná produkce tritia reaktorech DEMO a následujících vedoucí k neexistenci jeho přebytků pro iniciaci dalších fúzních reaktorů, či nedostatek prvků, z nichž by mělo být produkováno.

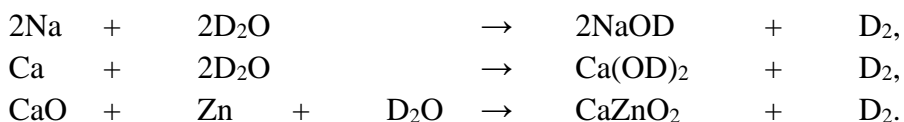
Z pohledu radiační ochrany je tritium jediným ze zde zmiňovaných paliv palivem radioaktivním. Také jeho výroba je spojena s aplikací ionizujícího záření. Pokud ovšem pomineme jeho výrobu, neboť jadernou bezpečnost takovýchto provozů řeší jiné publikace, bylo poukázáno, že veškeré další manipulace s ním by měly být uspokojivě vyřešeny již v případě reaktoru ITER. Tritium je nebezpečné jak při ingesci, tak při inhalaci. Primárně je však toto nebezpečí způsobeno jeho radioaktivitou, nebezpečí plynoucí z jeho chemických vlastností je naopak díky ní sníženo [22].

Určení slabé udržitelnosti tritia jako zdroje energie závisí na jeho budoucí ceně, respektive na ceně prvků, z nichž by mělo být vyráběno, a na tom, zdali v ní budou započítány i veškeré externality. Silná udržitelnost závisí na době, po kterou jsou zásoby a zdroje prvků, z nichž bude vyráběno, schopny vystačit.

4.1.4. Deuterium (D)

Deuterium je jedno z nejdůležitějších paliv pro budoucí fúzní jadernou energetiku. Je uvažováno pro první, jakožto i pro druhou generaci fúzních jaderných elektráren.

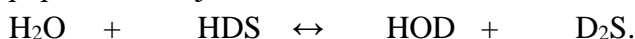
Primární formou deuteria je jeho plynná verze – D₂. Je získávána z těžké vody (D₂O), typicky její reakcí se sodíkem, vápníkem či směsí zinku a oxidu vápenatého:



Dále je možné deuterium z těžké vody získávat pomocí organických sloučenin. Další variantou je i elektrolyza [32]. Způsob získávání deuteria z těžké vody byl již popsán, a proto se zbytek této kapitoly bude primárně zabývat těžkou vodou.

Zdroje

Zdrojem těžké vody je přírodní voda. V ní se také nacházejí atomy polotěžké vody (HDO). Existuje široká škála metod, jak z ní těžkou vodu extrahovat, typicky využívají rozdílů v jejich fyzikálních vlastnostech. Popisuje je tabulka 2 [32]; vlastnosti polotěžké vody se nacházejí mezi lehkou a těžkou. První továrna produkující těžkou vodu byla postavena v Rjukanu v Norsku již v roce 1934 a využívala elektrolyzu vody. V průběhu druhé světové války byly stavěny továrny v USA, využívající destilaci, a v Kanadě, které využívaly kombinaci elektrolyzy a vodíkovo-vodní výměny. Později byly vyvinuty další metody. Mezi nejjednodušší patří zmíněná destilace, neboť rozdíl mezi body varů je 1,7 °C při atmosférickém tlaku. Nevýhodou je vysoká cena zařízení. Elektrolyza je nevhodná pro svou vysokou energetickou náročnost. Z pohledu ekonomie a efektivity se jako nejlepší jeví chemické metody, nejvíce zavedenou je tzv. GS proces (*Girdler sulfide process* – Gilderův sulfidový proces), využívaný například pro získávání D₂O pro těžkovodní reaktory. Lze jej popsat následující rovnicí:



Koncentrace vzniklého D₂O závisí na teplotě, při které se proces odehrává. Pro maximální účinnost je typicky rozdělen do několika stupňů, přičemž každý pracuje s jinou teplotou. Každý stupeň se skládá z teplé a studené věže, tyto však mohou být v případě prvních stupňů spojeny do jednoho celku. Příklad zapojení jednotlivých stupňů je na obrázku 16. Pomocí GS procesu je možno získat maximální koncentraci D₂O cca 20 %. Pro získání potřebné koncentrace, jež 99,75 %, je tak nutné za GS proces zařadit dokončovací sekci, ve které je koncentrace dále zvyšována, typicky pomocí destilace.

Vzhledem k nutnosti ohřívat a ochlazovat jednotlivá média až o 100°C a nutnosti užít i destilace či jiného podobného procesu je také považován GS proces za poměrně energeticky náročný, v celku je však považován za nejlevnější metodu produkce těžké vody [32], [33].

Z výše popsaných důvodů je zkoumáno několik nových metod, jak z přírodní vody získávat D₂O pomocí obnovitelných zdrojů energie. Nejslibnější se dle [33] jeví metoda KQS (*Kinetic quantum sieving* – kinetické kvantové síto). Tato metoda využívá rozdílů ve vlnových délkách de Broglieových vln protia deuteria. Nejprve je však nutné rozložit atomy vody, k tomuto účelu navrhuje dokument využít procesu fotolýzy. Pokud budou dané procesy zvládnuty, bude díky nim možné získat levný a ekologický zdroj deuteria.

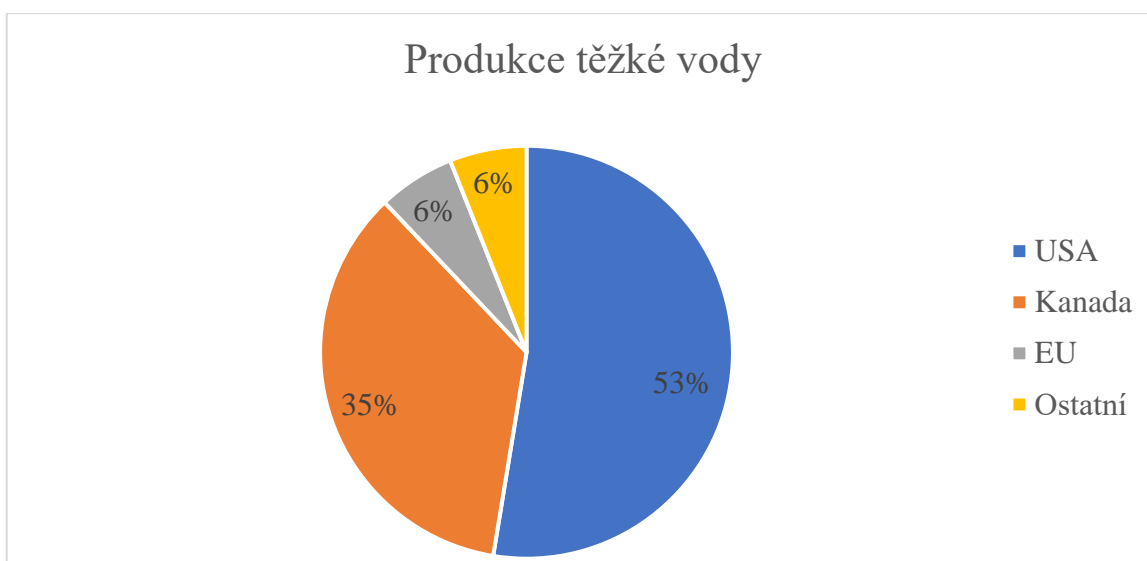
Vlastnost	D ₂ O	H ₂ O
Molární hmotnost [g/mol]	20,03	18,02
Bod varu [°C]	101,72	100
Bod tuhnutí [°C]	3,82	0
Hustota při 20°C [kg/m ³]	1,1056	0,9982
Teplota maximální hustoty [°C]	11,6	4
Molární objem při 20°C [l/mol]	18,2	18,05
Dynamická viskozita při 20°C [Pa s]	1,25	1,005

Tabulka 2: Srovnání některých fyzikálních vlastností D₂O a H₂O

Produkce a zásoby

V přírodní vodě je obsaženo 156 atomů deuteria na 10⁶ atomů protia. Dle [7] by se tedy ve světových oceánech mělo nacházet přibližně 47 600 Gt deuteria, z toho je nepoměrně nižší část obsažena v těžké vodě, přibližně asi 0,02 %, což znamená 9,52 Gt D v molekulách těžké vody. Proto je třeba uvažovat i se získáváním deuteria z polotěžké vody – tento proces se dle dostupných materiálů však nejeví autorovy jako dostatečně zmapovaný.

Největším producentem těžké vody bylo v roce 2019 USA, následované Kanadou a EU. Celkově bylo vyprodukováno 348 t této látky. Graf rozložení produkce mezi jednotlivými zeměmi se nachází na obrázku 4 [34].



Obrázek 4: Rozložení produkce těžké vody mezi zeměmi v roce 2019, převzato ([34])

Deuterium jako takové je využíváno například ve vodíkové a deuteriové spektroskopii NMR (*Nuclear magnetic resonance* – nukleární magnetické rezonance), dále jako tracer, pro výrobu jaderných zbraní, či v medicíně. Těžká voda je využívána v těžkovodních reaktorech jako moderátor a případně chladivo, ve spektroskopii, pro detektory neutronů či, jak už bylo zmíněno, pro produkci tritia. Pokud je však uváženo množství deuteria/těžké vody potřebné pro dané aplikace, je možno říci, že valnou většinu spotřebují těžkovodní reaktory a případně zbraně hromadného ničení [33].

Cena

Dle [35] je cena 99,9% těžké vody 1 320 \$/kg. Tato částka je však stanovena při odběru menších množství pro použití především ve vědecké praxi. V případě 99,8% deuteria by se pak cena měla pohybovat dle [36] kolem 1 600 až 3 940 \$/kg.

Shrnutí

Tato část práce poskytuje náhled na procesy spojené s deuteriem od jeho těžby, po vyžití ve fúzní jaderné elektrárně včetně jejich environmentálních dopadů. Některé aspekty a procesy, jako je získávání deuteria pomocí některých nových metod, jako je například KQS, však nejsou zcela prozkoumány, tudíž nelze přesně stanovit konkrétní hodnoty. Environmentální následky spojené s vysokou energetickou náročností by tak do budoucna mohly být sníženy.

Fúzní energetika může být ohrožena nedostatkem deuteria z těchto důvodů:

- nerealizování vhodné metody jeho získávání, a to jak z energetického, tak z environmentálního hlediska,
- nedostatek energie pro jeho výrobu či její přílišná finanční náročnost,
- nezvládnutí získávání deuteria z polotěžké vody.

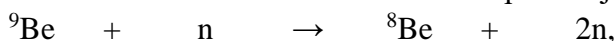
Z pohledu radiační ochrany je deuterium bezproblémovým palivem, neboť radioaktivním se stává až po vložení do fúzního reaktoru. Deuterium je považováno za netoxické [22].

Určení slabé udržitelnosti deuteria jako zdroje energie závisí na jeho budoucí ceně a na tom, zdali v ní budou započítány i veškeré externality. Silná udržitelnost závisí na době, po kterou jsou zásoby a zdroje deuteria schopny vystačit. Toto bude vyhodnoceno v další části této práce.

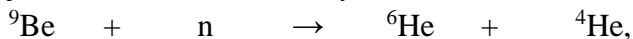
4.1.5. Berylium (^9Be)

Jak již bylo zmíněno, koncept blanketu HCPB by měl jako násobič neutronů využívat berylia, konkrétně izotopu ^9Be . Ten tvoří téměř 100 % přírodního berylia. V přírodě lze nalézt stopová množství izotopů ^7Be a ^{10}Be . Z tohoto důvodu, pokud není řečeno jinak, je v celé této kapitole předpokládáno, že výrazy ^9Be a berylium mají totožný význam, jímž je čisté ^9Be .

Celá reakce násobení neutronů probíhající v blanketu HCPB se dá shrnout takto:



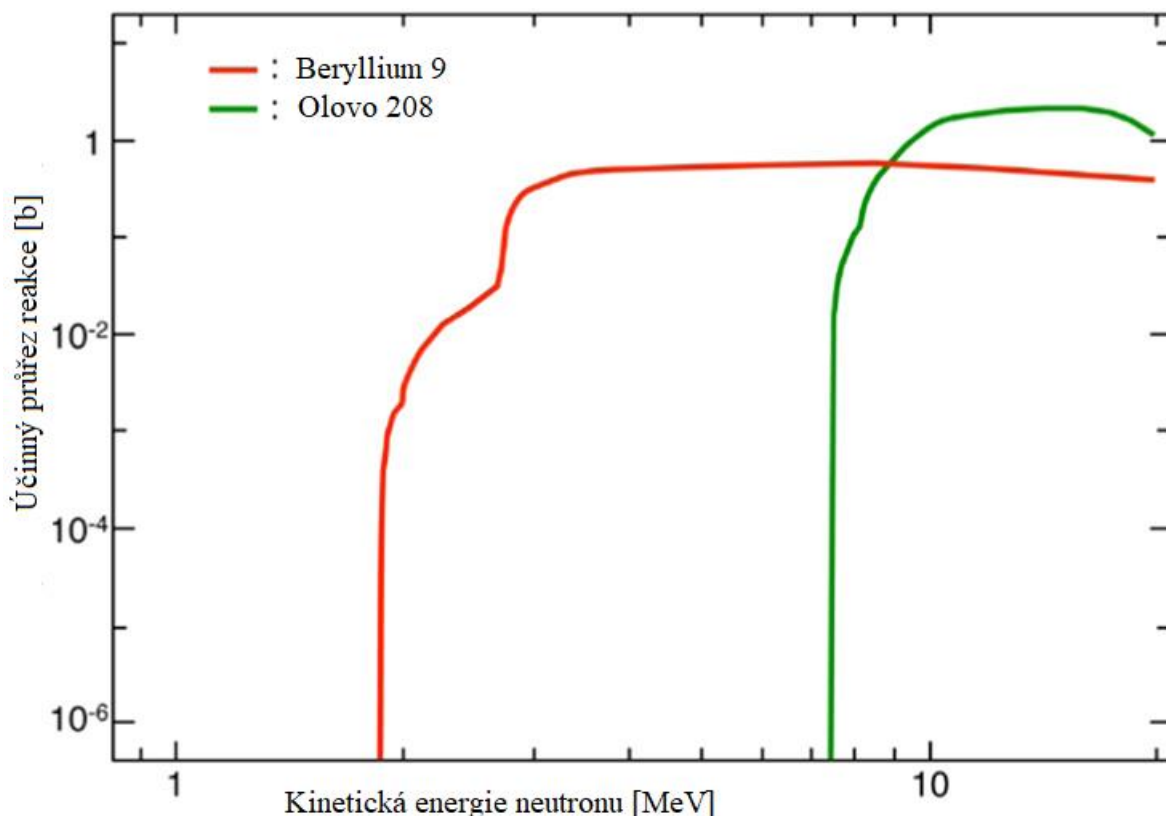
přičemž, kromě dvou neutronů, je produktem reakce také ^8Be , které se s poločasem rozpadu 0,067 fs rozpadá α rozpadem na dvě ^4He . Dále existuje i nenulová pravděpodobnost jiné reakce neutronu s beryliem, tu lze shrnout následujícím způsobem:



přičemž ^6He se s poločasem rozpadu 0,808 s rozpadá β^- rozpadem na ^6Li , které může reagovat dále s neutrony. Tato reakce již byla popsána v části o lithiu.

Z toho plyne, že pokud je berylium umístěno do pole neutronů, generuje v jisté míře tritium a zároveň násobí neutrony. Jako násobič neutronů lze využít i olovo, avšak berylium má ve srovnání s ním několik výhod. Mezi ně patří:

- 3,7 krát vyšší atomová hustota ($1,2 \text{ cm}^{-3}$) berylia, což znamená, že v daném objemu se nachází 3,7 krát více jader vhodných pro danou reakci,
- nižší prahová energie pro (n, 2n) reakci, tato činí jen 1,9 MeV, což je o 7,4 MeV méně než pro olovo [37], viz. obrázek 5.



Obrázek 5: Účinný průřez $(n, 2n)$ reakce pro izotopy ^9Be a ^{208}Pb , převzato ([37])

Oproti olovu však berylium při teplotách nad 600°C trpí zvýšeným napucháním. Tento problém se však týká pouze zde nezmiňovaných konceptů blanketů, neboť u konceptu HCPB řeší problém napuchání právě použití pebble bedu. Dále, především za teplot nad 600°C, berylium reaguje s vodní párou za vzniku vodíku a BeO, který je toxický. Toto však ohrožuje pouze koncepty blanketu, které využívají berylia jako násobiče neutronů a vody jako chladiva, což ovšem opět není případem ani jednoho ze zde studovaných konceptů blanketů [37].

Zdroje

Největší část světových ložisek berylia se nachází v USA a v Číně, ve srovnání s těmito státy jsou ostatní zanedbatelné. V současné době je tedy berylium těženo především v těchto státech, dále pak v Ugandě, Brazílii, Mosambiku, Nigérii, Madagaskaru a Rwandě [17].

Rudy berylia jsou nejčastěji těženy v povrchových dolech. Pro obě zmíněné hlavní rudy je proces extrakce berylia stejný. Ruda je nejprve drcena, poté dochází k reakci drti s kyselinou sírovou. V té se veškeré kovy obsažené v rudě rozpouštějí a vznikají jejich sírany, až na síran berylnatý rozpustné ve vodě. Jejich směs je následně přečerpána do nádrže se směsí hydrofobních organických sloučenin a sorbentu, na který se síran berylnatý váže. Sorbent je následně vystaven vysokým teplotám a uhličitanu amonnému, díky čemuž se z něj uvolňuje hydroxid berylnatý. Ten již může být využit pro další aplikace, například pro produkci slitin berylia s mědí či beryliových keramik. V opačném případě je při vysokých teplotách hydroxid vystaven reakci s hydrogenfluoridem amonným a vzniká tekutý fluorid berylnatý. Ten je míchán s tekutým hořčíkem a z této směsi je pak možné separovat 97% berylium. Pokud se navíc zahřeje ve vakuové peci, výsledkem bude 99,99% Be [38].

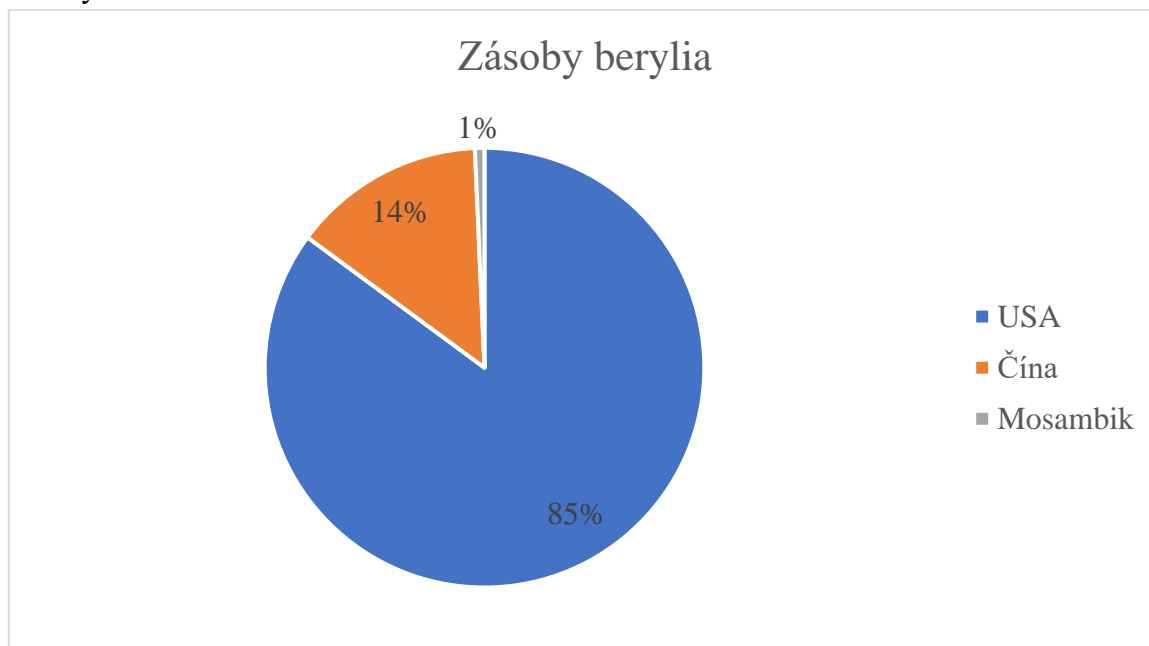
V mořské vodě se Be nachází v koncentraci 0,006 ppb, zatímco ve sladké vodě v koncentraci 0,1 ppb. Některé kyselější řeky či termální prameny jej však obsahují dokonce v řádově vyšších koncentracích. Dále je ve vyšší míře obsaženo i v některých odpadních vodách. Vzhledem k takto nízkým koncentracím jsou metody pro jeho extrakci z vod stále vyvíjeny, jako nejperspektivnější se ukazuje metoda anglicky nazývaná *cloud point extraction*. Zatím se však, stejně jako další možné metody extrakce berylia z vod, jeví jako příliš technicky náročná a nákladná, takže hydrosféru nelze v současnosti uvažovat ani jako potenciální zdroj tohoto prvku [39].

Teoretické zvýšení zásob berylia může přinést jeho recyklace, ačkoli již v současné době představuje například v USA až 25 % ročního přísunu Be. Výhodou recyklace je fakt, že z energetického pohledu je o 80 % méně náročná než těžba. Dle [17] lze pomocí recyklace získat až 40 % berylia obsaženého v daném odpadu.

Produkce a zásoby

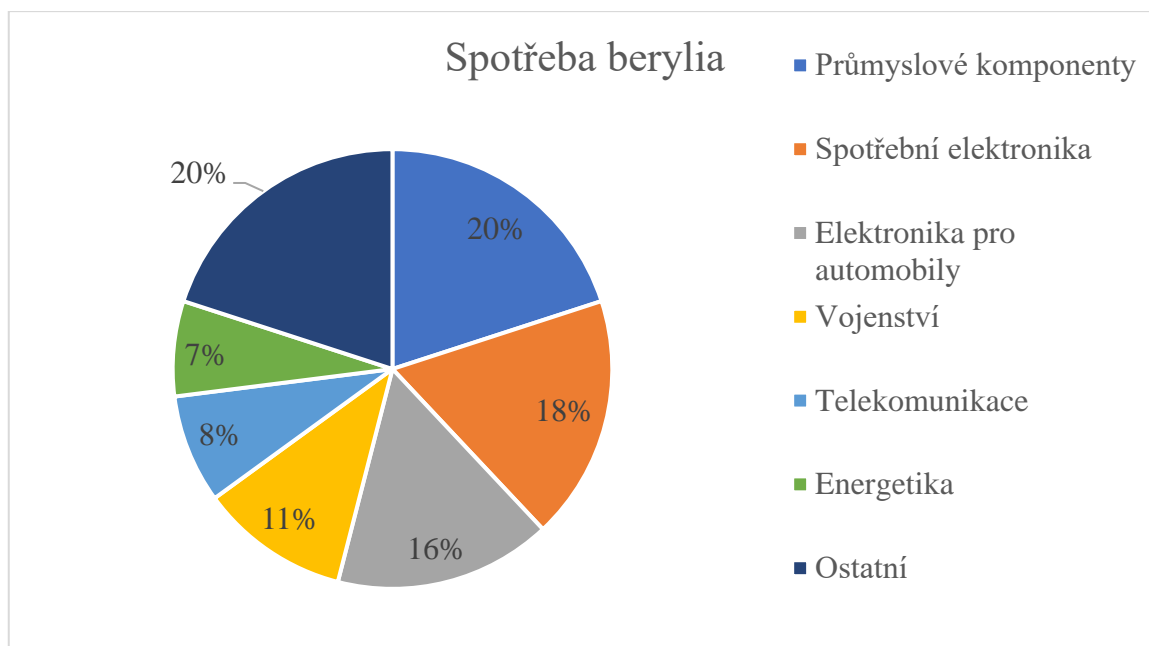
Největším světovým producentem berylia byly v roce 2021 USA, na druhém stupni stála Čína, produkce dalších států byla zanedbatelná. Celosvětová roční produkce berylia činila 260 t. Od roku 2017 (210 t) roste, za poslední desetiletí však maxima dosáhla v roce 2014 (337 t). Z toho lze usuzovat, že těžba berylia nenabývá žádných výraznějších trendů [26c].

Z pohledu zásob jsou na špici USA následovány Čínou a Mosambikem. Celkově jsou světové zásoby tvořeny přibližně 40 kt Be. Jejich rozložení v závislosti na zemi je znázorněno na obrázku 6 [17]. Zdroje pak činí něco málo přes 100 kt [17]. V mořské vodě by se mělo nacházet 7 Mt tohoto prvku, ve vodě sladké pak 3,4 Mt. Je zajímavé, že oproti jiným prvkům je celkové množství Be obsažené ve slané vodě řádově srovnatelné s množstvím obsaženým ve vodě sladké. Je to dáno tím, že koncentrace berylia je ve sladké vodě oproti slané asi o dva řády vyšší. Ve srovnání s olovem, jež je popsáno níže, jsou tedy zásoby tohoto násobiče neutronů téměř tisíckrát nižší.



Obrázek 6: Podíl jednotlivých zemí na světových zásobách berylia, převzato ([17])

Graf rozložení spotřeby berylia pro jednotlivé obory v roce 2020 je znázorněn na obrázku 7 [26d]. Dokument [40] předpovídá růst spotřeby Be (průměrně o 10 % ročně) především z důvodu nárůstu fyzických rozměrů berylium obsahujících komponent. Tento trend je sice částečně vyvažován zlepšováním technologií, i tak však v budoucnu hrozí nedostatek tohoto kovu. V některých oblastech je možné berylium nahradit organickými sloučeninami, hliníkem, grafitem, karbidy, ocelí či titanem, případně některými slitinami mědi. Teoreticky je možné užít i nitridů hliníku či boru, nicméně pro většinu aplikací je berylium naprosto krucální a nenahraditelné [17].



Obrázek 7: Rozdělení spotřeby berylia jednotlivými odvětvími v roce 2020, převzato ([26d])

Obohacování

Jak již bylo zmíněno, v podstatě veškeré na Zemi se nacházející berylium je tvořeno izotopem ^9Be , takže jeho obohacování není nutné.

Cena

Cena berylia se v roce 2020 pohybovala dle [41] kolem 857 \$/kg, dle [17] okolo 1 700 \$/kg. Aktuálnější cenu se autorovi při vypracování práce nepodařilo nalézt.

Shrnutí

Tato část práce poskytuje náhled na procesy spojené s beryliem od jeho těžby po vyžití ve fúzní jaderné elektrárně, včetně jejich environmentálních dopadů. Některé aspekty a procesy, jako je získávání berylia z vody či fabrikace, však ještě nejsou plně prozkoumány, tudíž nelze přesně stanovit konkrétní hodnoty. Samozřejmě existuje možnost vzniku ekologických havárií při manipulaci s beryliem, jejich pravděpodobnost by však neměla být vyšší než při jiných aplikacích.

Z krátkodobého hlediska může být fúzní energetika ohrožena nedostatkem berylia z těchto důvodů:

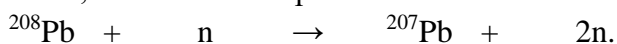
- navýšení ceny berylia nad mez rozumnou pro použití ve fúzní energetice spojené s jeho užitím v ostatních oblastech,
- využití pozemských zásob berylia pro nefúzní aplikace, společně s pozdním zvládnutím získávání berylia z vod,
- nenalezení vhodné metody pro získávání berylia z vod, a to jak z energetického, tak z environmentálního hlediska.

Z pohledu radiační ochrany je berylium bezproblémovým prvkem, neboť veškeré produkty reakcí, ke kterým s ním bude v prostoru blanketu docházet, mají krátký poločas rozpadu. Otázkou je případné přepracovávání berylia ve fúzní energetice již použitého. Berylium je toxické při požití, dráždí kůži, může vyvolat alergickou kožní reakci, způsobuje vážné poranění očí, při vdechování může způsobit smrt, může vyvolat rakovinu a způsobuje poškození orgánů při prodloužené nebo opakované expozici [22].

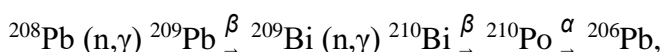
Určení slabé udržitelnosti berylia jako násobiče neutronů závisí na jeho budoucí ceně a na tom, zdali v ní budou započítány i veškeré externality. Silná udržitelnost závisí na době, po kterou jsou zásoby a zdroje berylia schopny vystačit. Toto bude vyhodnoceno v další části této práce.

4.1.6. Olovo (^{208}Pb)

Jak již bylo zmíněno, koncept blanketu WCLL by měl jako násobiče neutronů využívat olova, konkrétně izotopu ^{208}Pb . Násobící reakci s tímto izotopem je možno zapsat takto:



Kromě této reakce dochází na ^{208}Pb i k (n,γ) reakci. Jejím produktem je ^{209}Pb , na kterém může také dojít k (n,γ) reakci. Celý proces včetně následných rozpadů je možno shrnout takto:



přičemž ^{209}Pb se rozpadá s poločasem rozpadu 3 hodiny, ^{210}Bi 5 dní a ^{210}Po 138 dní. Porovnání účinných průřezů olova a berylia pro $(n,2n)$ reakci již bylo znázorněno výše [42].

Kromě ^{208}Pb se přírodní olovo skládá z několika dalších pozorovatelně stabilních izotopů: ^{204}Pb tvořícího 1,4 % přírodního olova, ^{206}Pb tvořícího 24,1 % přírodního olova a ^{207}Pb tvořícího 22,1 % přírodního olova. Z toho plyne, že ^{208}Pb tvoří 52,4 % přírodního olova (jejich vzájemný poměr se může lokálně měnit, neboť kromě izotopu jsou každý produktem nějaké rozpadové řady, takže například v thoriových rudách může podíl ^{208}Pb dosahovat až 90 % [51]). I tyto izotopy mohou reagovat s neutrony způsobem, jenž vede k násobení neutronů.

Pro zúžení spektra možných násobících reakcí je třeba uvažovat jen neutrony blízké energii odpovídající D-T reakci, jež činí 14,1 MeV, neboť další fúzní paliva již neutronové násobiče nejspíše potřebovat nebudou. Teoreticky by do tohoto výčtu bylo možno zahrnout i reakce s neutrony o energiích odpovídajících původu v násobících reakcích, to by však přesahovalo rozsah této práce. Možné reakce tedy jsou: $^{204}\text{Pb}(n,2n)^{203}\text{Pb}$, $^{204}\text{Pb}(n,2n)^{203}\text{Pb}^{\text{m1}}$, $^{204}\text{Pb}(n,3n)^{202}\text{Pb}^{\text{m}}$ a $^{206}\text{Pb}(n,3n)^{204}\text{Pb}^{\text{m}}$. Produkty těchto reakcí a jejich vlastnosti lze pro přehlednění shrnout následujícím způsobem:

- $^{202}\text{Pb}^m$ s $T_{1/2}$ 3,54 h, tento se rozpadá převážně na ^{202}Pb s $T_{1/2}$ $5,25 \cdot 10^4$ r, který se rozpadá na ^{202}Tl s $T_{1/2}$ 12,23 d, tento se rozpadá na ^{202}Hg , což je stabilní izotop,
- ^{203}Pb s $T_{1/2}$ 51,92 h, tento se rozpadá na ^{203}Tl , který je stabilní,
- $^{203}\text{Pb}^{m1}$ s $T_{1/2}$ 6,21 s, tento se rozpadá na ^{203}Pb , který je popsán výše, a
- $^{204}\text{Pb}^m$ s $T_{1/2}$ 67,2 min, tento se rozpadá na ^{204}Pb , který je stabilní.

Jak je vidno, produkty těchto reakcí a produkty na ně navazujících událostí mají poločasy rozpadu dlouhé až v řádu desítek tisíc let, typicky však maximálně v řádu dní. Zmíněné primární reakce mají pro danou energii neutronu účinné průřezy v rámci maximálně jednotek b, což znamená, že některé z nich mají dokonce vyšší účinný průřez pro násobení neutronů než ^{208}Pb , a také jsou schopny produkovat až tři neutrony [52]. Vzhledem k poměrům mezi účinnými průřezy pro násobící reakce a účinnými průřezy pro parazitické reakce těchto izotopů však koncept WCLL počítá pouze s obohaceným ^{208}Pb . To je společné jak pro všechny koncepty blanketů využívající olovo jako násobiče neutronů, tak pro klasické jaderné reaktory využívající Pb jako chladiwa a reflektoru neutronů, neboť i při uvážení (n,3n) reakcí vyprodukuje na jeden absorbovaný neutron ^{208}Pb výrazně více neutronů než ostatní izotopy olova [51]. Další výhodou ^{208}Pb je to, že produkt jeho násobící reakce není radioaktivní.

Zdroje

Rudy olova jsou těženy hlubinně. Po vytěžení je prvním cílem získání surového olova. Toho je nejčastěji dosahováno pomocí oxidace rudy v konektoru, kdy vzniká PbO a následně je v šachtové peci redukováno oxidem uhelnatým. Struska z pece bývá často dále zpracovávána, jelikož obsahuje například arsen, kobalt, nikl, měď a další kovy. V šachtové peci získané surové olovo dosahuje čistoty pouze 92–98 %, tudíž musí být dále rafinováno. V prvním stupni rafinace, zvaném harisování, jsou odstraněny pomocí NaNO_3 , NaOH a NaCl příměsi arsenu, antimonu a cínu, v druhém stupni, zvaném parkesování, jsou pomocí Zn odstraněny hlavně vzácné kovy. Dle obsahu bismutu je pak volen další krok: tím může být přidání Mg či Na nebo elektrolytická rafinace. Výsledkem je pak 99,99% Pb.

Získávání olova je spojeno s několika environmentálními důsledky. Prvním z nich je únik částic olova do vzduchu při většině procesů. Dále, struska vzniklá při jeho zpracování je zpravidla kontaminována olovem. K tomuto dochází i při jeho recyklaci například ze starých akumulátorů. Další následky jsou pak spojeny s energetickou náročností většiny ze zmíněných procesů. což platí i pro obohacování, toto je popsáno níže [45].

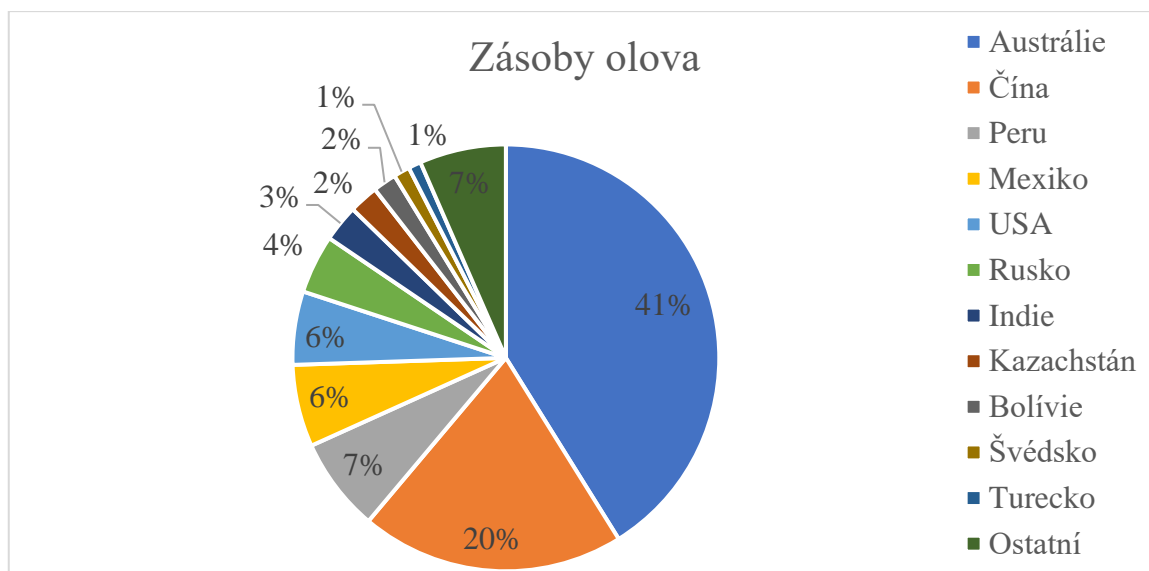
Extrakce olova z vody již byla zkoumána, a to hned několika metodami. Hlavním cílem však vždy bylo vyčištění vody od těžkých kovů a ne jejich získání, tudíž i hodnocení úspěšnosti takovýchto experimentů záviselo na kvalitě získané vody a ne na formě či koncentraci odstraněného olova. Proto se autorovi nepodařilo při vypracování této práce nalézt vhodná data.

Produkce a zásoby

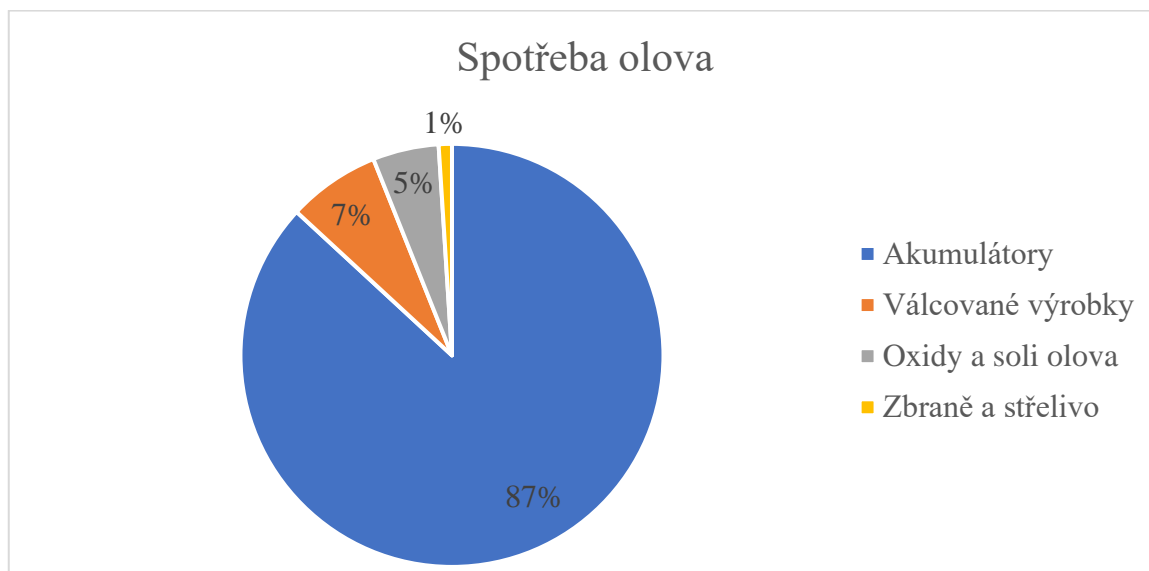
V roce 2021 byla suverénně největším světovým producentem olova Čína, následovaná Austrálií, USA a Peru. Světová roční produkce olova se pohybuje okolo 4,3 Mt [17]. Mezi lety 2013–2021 byla maximální změna ve vytěženém množství okolo 0,5 Mt, v tomto období však není pozorovatelný výraznější trend v těžbě tohoto kovu.

Největšími rezervami olova disponuje Austrálie, následovaná Čínou, Peru a Mexikem. Celkově by se světové zásoby olova měly pohybovat okolo 90 Mt. Podrobněji jsou znázorněny níže v grafu na obrázku 8 [17]. Světové zásoby ^{208}Pb jsou pak cca 40 Mt. Celkové pozemské zdroje pak tvoří 2 Gt olova, což představuje 890 Mt ^{208}Pb [17].

Průměrný obsah olova ve vodě (jak mořské, tak sladké) je 5 $\mu\text{g/l}$. Z objemu světových vod tak lze vypočítat, že ve světových mořích a oceánech se nachází přibližně 6,7 Gt olova a ve sladké vodě přibližně 0,2 Gt olova (což znamená 3,5 Gt a 0,1 Gt ^{208}Pb) [46a].



Obrázek 8: Podíl jednotlivých zemí na světových zásobách olova, převzato ([17])



Obrázek 9: Rozdělení spotřeby olova jednotlivými odvětvími v roce 2019, převzato ([26e])

Graf spotřeby olova mezi odvětvími je na obrázku 9 [26e]. Je možné zde spatřovat jistou paralelu s lithiem, neboť v případě olova i lithia je majorita jejich produkce určena pro výrobu akumulátorů. Cena olova se v současné době pohybuje kolem 2,45 $\$/\text{kg}$ [26f]. Z mnoha oblastí použití již bylo olovo vytlačeno, především plasty a zinkem. Ty mohou být využity i v dalších odvětvích, alternativy olova v odvětví akumulátorů jsou předmětem intenzivního vývoje. V roce 2022 bylo 62 % světového olova získáno pomocí recyklace [17].

Obohacování

V současné době jsou známy tři způsoby, jak obohacovat olovo: pomocí odstředivek, laserovou separací a pomocí cyklotronů; pouze obohacování pomocí odstředivek je však zvládáno na průmyslové úrovni. V případě cyklotronů se obohacování olova nachází na úrovni teoretických výpočtů a v případě laserové separace proběhly pouze laboratorní experimenty. Dokument [43] stanovuje, že cena za jeden kilogram 99% ^{208}Pb se při převedení na dnešní hodnotu dolaru [27] pohybuje od 5620 do 5730 \$, a její výše závisí na výši obohacení a některých dalších kvalitách prvotního materiálu. Tato cena se vztahuje k olovu získaného obohacováním v odstředivkách. Pokud by byla využita jiná ze zmíněných metod, byla by jeho cena pravděpodobně řádově vyšší [43].

Shrnutí

Tato část práce poskytuje náhled na procesy spojené s olovem od jeho těžby po vyžití ve fúzní jaderné elektrárně, včetně jejich environmentálních dopadů. Některé aspekty a procesy, jako například získávání olova z vody či některé metody obohacování, však ještě nejsou plně prozkoumány, a nelze tudíž přesně stanovit konkrétní hodnoty.

Z krátkodobého hlediska může být fúzní energetika ohrožena nedostatkem olova z těchto důvodů:

- využití pozemských zásob olova pro nefúzní aplikace, především pak pro výrobu akumulátorů společně s pozdním zvládnutím získávání olova z vod
- navýšení ceny olova nad mez rozumnou pro použití ve fúzní energetice spojené s důvody výše,
- nenalezení vhodné metody získávání olova z vod, a to jak z energetického, tak z environmentálního hlediska.

Při porovnávání ceny obohaceného a přírodního olova je patrné, že majoritu ceny obohaceného olova tvoří náklady na surovinu jako takovou. Proto je otázkou, jak by do ceny obohaceného olova promluvila změna cen energií, lepší zvládnutí obohacování, ale konečně také případný masivní nárůst ceny základní suroviny z důvodu velkého zvýšení poptávky.

Z pohledu radiační ochrany je olovo téměř bezproblémovým prvkem, neboť veškeré produkty reakcí, ke kterým s ním bude v prostoru blanketu docházet, mají krátký poločas rozpadu. Výjimku tvoří pouze ^{210}Po vzniklé jako důsledek (n,γ) reakce, jež má poločas rozpadu v řádu stovek dnů. Produkty těchto reakcí pak jsou ^{206}Pb a ^{207}Pb . Toto tvrzení ovšem pozbývá na platnosti v případě, že se blanket bude skládat z jiného olova než vysoce obohaceného ^{208}Pb . Otázkou je případné přepracovávání olova ve fúzní energetice již použitého.

Olovo může poškodit reprodukční schopnost nebo plod v těle matky, může poškodit kojence prostřednictvím mateřského mléka a je vysoce toxické pro vodní organismy, a to i s dlouhodobými účinky [22].

Určení slabé udržitelnosti olova jako násobiče neutronů závisí na jeho budoucí ceně a na tom, zdali v ní budou započítány i veškeré externality. Silná udržitelnost závisí na době, po kterou jsou zásoby a zdroje olova schopny vystačit. Toto bude vyhodnoceno v další části této práce.

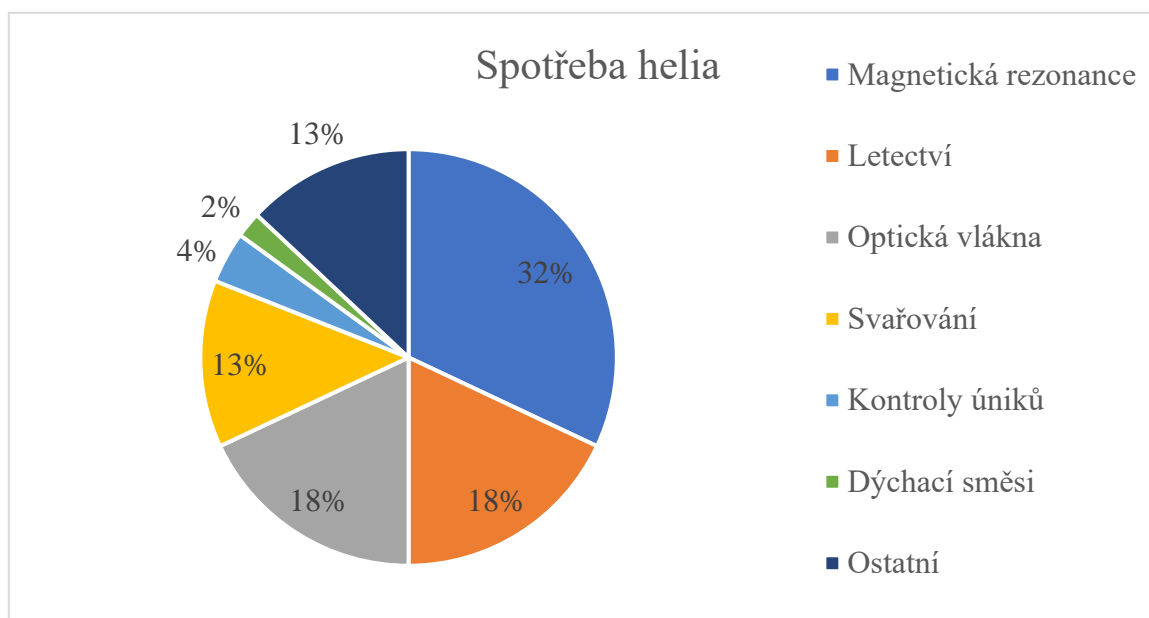
4.1.7. Helium (^4He)

Jedním z hlavních produktů zde zvažovaných fúzních jaderných reakcí je ^4He . Toto kromě dříve popsanych reakcí signifikantních pro jednotlivé generace fúzních zařízení, vzniká také při produkci T z Li, dále při některých reakcích ^9Be v blanketu a při fúzních reakcích s ^3He . V této práci je zkoumáno proto, že bude důležitou součástí palivového cyklu budoucích fúzních jaderných elektráren, a tudíž je nutné projednat vliv jeho produkce na environmentální a ekonomické aspekty těchto cyklů.

Vzhledem k tomu, že přírodní helium je z 99,999 9 % tvořeno ^4He , jsou v této kapitole výrazy ^4He a helium považovány za synonyma [47]. Problematika ^3He je rozebírána níže. Na rozdíl od většiny chemických prvků, o kterých se v této práci podrobněji pojednává, je množství helia většinou uvedených zdrojů popisováno pomocí objemu. Je typicky udáván pro tlak 101,3 kPa a teplotu 15 °C. Dle [48] odpovídá těmto parametrům hustota 0,1662 kg m⁻³.

Produkce

Největším producentem helia jsou USA, po nich následuje Katar. Produkce dalších států je zanedbatelná. Celkově bylo v roce 2021 vytěženo přes 26,5 kt tohoto plynu [17].



Obrázek 10: Rozdělení spotřeby helia jednotlivými odvětvími v roce 2021, převzato ([26g])

Graf rozložení spotřeby helia v roce 2021 je na obrázku 10 [26g]. Recyklace helia je poměrně běžná, především při velkoobjemových aplikacích. V aplikacích pracujících s teplotami pod -256 °C hraje helium nezastupitelnou roli. V oblasti svařování je možné jej nahradit argonem a v některých dalších aplikacích, kde nehrozí riziko výbuchu, což jsou například dýchací směsi, může být nahrazeno vodíkem [17].

Cena

Za léta 2020 a 2021 vzrostla cena helia o 135 %, a to především kvůli růstu poptávky ze strany subjektů operujících v oblasti zdravotnictví, supravodičů a kosmonautiky, především pak NASA a SpaceX. V roce 2021 byla cena helia 280 \$/Mcf, což je v přepočtu přibližně 58 \$/kg.

Shrnutí

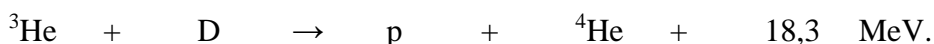
Tato část práce poskytuje náhled na možnosti využití helia, jež bude hlavním produktem reakcí odehrávajících se v budoucích fúzních jaderných elektrárnách. Jak bylo ukázáno poptávka po heliu roste, čemuž odpovídá i růst jeho ceny. Množství vytěženého helia je oproti tomu dlouhodobě neměnné. Možnost výroby vlastního helia tedy může z pohledu ekonomického do jisté míry zlepšit situaci budoucích fúzních elektráren.

Z pohledu radiační ochrany je helium bezproblémovým prvkem, neboť je stabilní. O případné toxicitě helia je jen velmi málo důkazů [22]. Protože je helium pouze produktem zmíněných reakcí a pravděpodobně bude dále zužitkováno, respektive by nemělo docházet k jeho prostému vypouštění do atmosféry, je možné říci, že určování jeho udržitelnosti je v tomto případě bezpředmětné.

4.2. Druhá generace fúzních elektráren

4.2.1. Helium (^3He)

Helium-3 je uvažováno jako jedno z možných paliv pro druhou generaci fúzních elektráren. Pro tuto práci a pravděpodobně i pro budoucí fúzní energetiku je stěžejní jeho reakce s deuteriem:



Tato reakce s sebou na první pohled nepřináší žádné uvolňování neutronů, tudíž nehrozí aktivace reaktoru, také při ní nevznikají žádné radioaktivní izotopy. Bohužel však při její realizaci hrozí výskyt parazitické D-D reakce, která je popsána výše a která produkuje neutrony a radioaktivní tritium. Tritium může dále reagovat s deuteriem (D-T) reakcí, ta produkuje neutrony ještě ve větší míře než předchozí. Dle dokumentu [49] však volba optimální teploty plazmatu nebezpečí výskytu těchto reakcí významně redukuje, a to do té míry, že by 99 % veškeré uvolněné energie ve fúzním reaktoru založeném na D- ^3He bylo ve formě energie nabitých částic.

Helium-3 dále může sloužit jako vhodný izotop pro produkci tritia využitelného v D-T reakci popsané výše. To z něj dělá jednoho z teoretických kandidátů pro množivý materiál. K produkci tritia z ^3He dochází při této reakci:



Zmiňovaný izotop helia je v blízké době možné získávat na dvou místech. Jedním z nich je Země a druhým Měsíc. Na Měsíci se ^3He vyskytuje daleko hojněji, těžba zde má však nejen očividné nevýhody.

Země

Pozemské ^3He lze rozdělit dle původu. Jisté množství bylo na Zemi přítomno již od jejího zformování, většina ho však skrz zemskou atmosféru unikla do vesmíru. Dalším zdrojem ^3He je rozpad radioaktivního tritia s poločasem 12,3 roku, tento lze zapsat následujícím způsobem ($\bar{\nu}_e$ značí antineutrino):



Největší množství ^3He se nachází v zemské atmosféře, jeho pravděpodobně nejvhodnějším pozemským zdrojem je však zemní plyn, a to díky vyšší koncentraci ^3He . Celkové množství a koncentrace pozemského ^3He je však natolik nízké, že možnost jeho energetického využití je zanedbatelná a tudíž nebude v této práci dále řešeno.

Měsíc

Na Měsíci dochází taktéž k úniku ^3He z jeho povrchu, je však kompenzován díky příspěvkům ^3He ze slunečního větru. Celkový obsah ^3He v dané měsíční lokaci je tak dán poměrem mezi jeho přísunem, který určuje zeměpisná délka a šířka, a jeho únikem, jenž závisí na teplotě povrchu a úrovni nasycení lokálního regolitu. Regolit je svrchní vrstva Měsíce a v současné době je valná většina ^3He obsažena v něm, neboť ionty helia ve slunečním větru mají typicky kinetickou energii postačující k proniknutí právě jen do regolitu. Helium tvoří cca 4 % slunečního větru a obsah zde studovaného izotopu v něm je cca 480 ppm, ročně pak na Měsíc dopadne cca 63 kg ^3He [49].

Data o obsahu ^3He v regolitu pochází primárně ze vzorků odeslaných zpět na Zem sondami, jako byly ty z programu Luna, či doručených přímo v rámci pilotovaných misí, jejichž jediným zástupcem je v současné době program Apollo. Průměrný naměřený obsah se pak liší podle lokality získání vzorku a koreluje s průměrným obsahem oxidu titaničitého (TiO_2) v něm, neboť ten je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících úroveň nasycení. Měsíční horniny je tak možné rozdělit do čtyř kategorií právě na základě obsahu ^3He , potažmo na základě obsahu TiO_2 . Jsou popsány v tabulce 3 [49]. Ze všech získaných vzorků vykazoval rekordní obsah vzorek z Moře moskevského – dosahoval až 17 ppb a byl získán v rámci programu Luna [50].

Z tabulky 3 je patrné, že na ^3He bohaté horniny zabírají nejmenší plochu Měsíce a jsou také nejméně mocné. To ovšem znamená také menší maximální hloubku těžby a z toho logicky vyplývá, že tyto horniny rovněž obsahují nejmenší část měsíčních zásob ^3He . Celkově by se na Měsíci mělo nacházet 2,5 Mt ^3He [51]; toto množství v současné době nelze rozdělit na zásoby a zdroje. Zintenzivnění solárního větru by nemělo přinést zvýšení koncentrace ^3He na Měsíci ani by se s časem neměla měnit v důsledku měsíčních geologických procesů, neboť, jak už bylo řečeno, závisí primárně na úrovni nasycení regolitu [50].

Těžba ^3He na Měsíci by teoreticky neměla být příliš náročná. Vzhledem k průměrným tloušťkám vrstev obsahujících zkoumaný izotop není problémem vytěžit samotnou horninu a další práci s ní pak z energetického hlediska ulehčuje měsíční tíhová síla, která je oproti zemské pouze šestinová.

Kategorie	Průměrný obsah ^3He [ppb]	Celková plocha [km^2]	Průměrná tloušťka vrstvy [m]	Celkové množství ^3He [kt]	Část celkové zásoby ^3He [%]
1	15,1	487 114	4,4	61,5	2
2	8,0	1 518 587	4,8	110,8	4
3	5,7	1 586 312	8,1	146,5	6
4	3,1	34 340 315	10,1	2 150,4	88
Součet	-	37 932 328	-	2 469,2	100

Tabulka 3: Vlastnosti jednotlivých kategorií měsíčních hornin

Zkoumaný izotop se společně s dalšími plyny z horniny začíná uvolňovat při teplotě 200 °C. Dle dokumentu [49] by tento ohřev měl být realizovaný pomocí slunečního záření, tedy pouze za měsíčního dne, případně by mohlo být využito i exotičtějších zdrojů tepla, jako jsou například jaderné reakce a podobně. Při zmíněných teplotách se z hornin uvolňuje i vodík, ^4He , sloučeniny uhlíku a dusík.

Uvolněné plyny by následně měly být izolovány od měsíčního povrchu a vystaveny teplotě vnějšího vesmíru za měsíční noci, která je méně než 5 K. Za těchto teplot je možné použít metodu kryogenické destilace využívající toho, že teplota varu ^4He je 4,22 K, zatímco teplota varu ^3He je 3,2 K. Touto druhou metodou by mělo být dosaženo až 99,1% koncentrace ^3He . Na jednu tunu ^3He by na Měsíci mělo být získáno 3300 t ^4He , 500 t N, 3000 t směsi CO a CO₂ a 6100 t H₂. Vytěžený vodík pak může sloužit jako palivo pro rakety, v případě teoretické měsíční základny pak mají využití i ostatní takto získané plyny [49].

Cena ^3He těženého na Měsíci převedená na dnešní hodnotu dolaru [27] je odhadována na 2,5 milionu \$/kg [49]. Jsou v ní zahrnuty náklady na dopravu a těžbu. Citovaný zdroj nicméně pochází z roku 1988 a autorovi této práce se nepodařilo najít zdroj aktuálnější. Je tedy otázkou, jaký by na tuto cenu měl vliv pokrok v raketové vědě. Tuto cenu také může změnit započítání zisků spojených s extrakcí dalších plynů při těžbě. Další vliv může mít započítání externalit spojených s jeho dopravou, tyto jsou popsány níže.

Environmentální následky těžby ^3He na Měsíci jsou spojeny především s jeho dopravou a s dopravou těžebních zařízení a jiných nezbytností na Měsíc a zpět. Prvním z následků jsou emise, odvozené od použitého raketového paliva. Mezi hlavní v současné době patří: H₂O, CO_x, NO_x, Al₂O₃, H₂, OH, N₂ a saze. Dle [52] existuje možnost, že do budoucna dojde k legislativnímu omezení používání nejvíce znečišťujících paliv, a rovněž je možné, že do doby, kdy by mělo docházet k těžbě ^3He , budou nalezeny či zrealizovány další, k přírodě šetrnější paliva či alternativní způsoby dopravy na Měsíc a zpět.

Dalšími dopady spojenými s dopravou na současné úrovni jsou: hluk, světelný smog, tepelné, chemické a mechanické znečištění a vznik požárů. Mnoho z důsledků je kromě jiného také způsobeno dopady prvních, pomocných a dalších stupňů raket. Tyto závisí na typu použité rakety, a tudíž i na použitém palivu. Existuje možnost omezení těchto následků, kromě již zmíněných možností, užitím znovupoužitelných raketových stupňů [53].

Shrnutí

Tato část práce poskytuje náhled na procesy spojené s ^3He od jeho těžby po využití v budoucí fúzní elektrárně, včetně jejich environmentálních dopadů. Hlavní environmentální následky spojené s využitím ^3He jsou způsobeny dopravou na Měsíc a zpět spojenou s jeho těžbou.

Fúzní energetika může být ohrožena nedostatkem ^3He z těchto důvodů:

- přesahování ceny ^3He meze rozumné pro jeho užití ve fúzní energetice,
- nenalezení vhodné metody dopravy na Měsíc a zpět spojené s jeho těžbou.

Z pohledu radiační ochrany je jedinou kritickou fází palivového cyklu ^3He fúzní jaderný reaktor. Dále je jistá pravděpodobnost, že by mohlo dojít k užití pohonů pracujících s ionizujícím zářením pro dopravu na Měsíc a zpět spojenou s těžbou ^3He . Toxicita ^3He by měla být stejná jako u ^4He [22].

Určení slabé udržitelnosti ${}^3\text{He}$ jako zdroje energie závisí na jeho budoucí ceně a na tom, zdali v ní budou započítány i veškeré externality. Silná udržitelnost závisí na době, po kterou jsou zásoby a zdroje ${}^3\text{He}$ schopny vystačit. Toto bude vyhodnoceno v další části této práce.

4.3. Třetí generace fúzních elektráren

4.3.1. Bor (${}^{11}\text{B}$)

Dalším z paliv vhodných pro třetí generaci fúzních jaderných elektráren je bor, konkrétně jeho izotop ${}^{11}\text{B}$. Reakce s vodíkem (${}^1\text{H}$) je popsána v předcházejících kapitolách. Stěžejní izotop ${}^{11}\text{B}$ pak tvoří 80,1 % všeho pozemského boru. Zbytek je tvořen ${}^{10}\text{B}$, ostatní jeho izotopy jsou připravovány uměle a mají velmi krátký poločas rozpadu [54]. Bor-10 je krom jiného využíván jako absorbátor neutronů v klasických jaderných reaktorech [55], neboť jeho účinný průřez pro absorpci tepelných neutronů je 3850 b. Účinný průřez ${}^{11}\text{B}$ je pro tuto reakci a danou energii neutronů pouze 0,1 b, proto je pro tento účel naopak nevhodný.

Zdroje

Nejvýznamnější ložiska boru se nacházejí v Turecku, v Číně, v Rusku, v Jihoafrické republice a USA [17]. Je také obsažen jak v sladké vodě s průměrnou koncentrací 0,1 ppm, tak v mořské vodě s průměrnou koncentrací 4,6 ppm.

Majorita rud boru je těžena v povrchových dolech pomocí těžké mechanizace podobnými metodami jako například hnědé uhlí. Menší ložiska pochopitelně používají menší strojní vybavení. Některé povrchové doly se pak dokonce stále spoléhají na ruční práci či práci zvířat. Minorita boru je těžena v hlubinných dolech a taktéž byla testována těžba méně bohatých ložisek pomocí loužení. Způsob úpravy vytěžené rudy pak záleží na jejím druhu stejně jako na způsobu jejího vytěžení.

Rudy boru jsou typicky nejprve drceny a následně rozpouštěny v horké vodě, tato je zahušťována v odparkách a filtrována. Výsledný produkt je vystaven vakuu, tam krystalizuje a vzniklé krystaly jsou následně odstředovány a sušeny. Výsledkem operace je nějaká forma boritanu sodného, například hydrát či bezvodá forma, a ta je pak přeměněna na kyselinu boritou. Pokud je bor obsažen v solných roztocích, jsou tyto většinou vysoušeny a přeměněny na kyselinu boritou. Obecně lze tedy říci, že hlavním produktem těžby boru je kyselina boritá, současně s tím je však třeba dodat, že pro její vytvoření z vytěžených sloučenin boru je třeba kyseliny sírové.

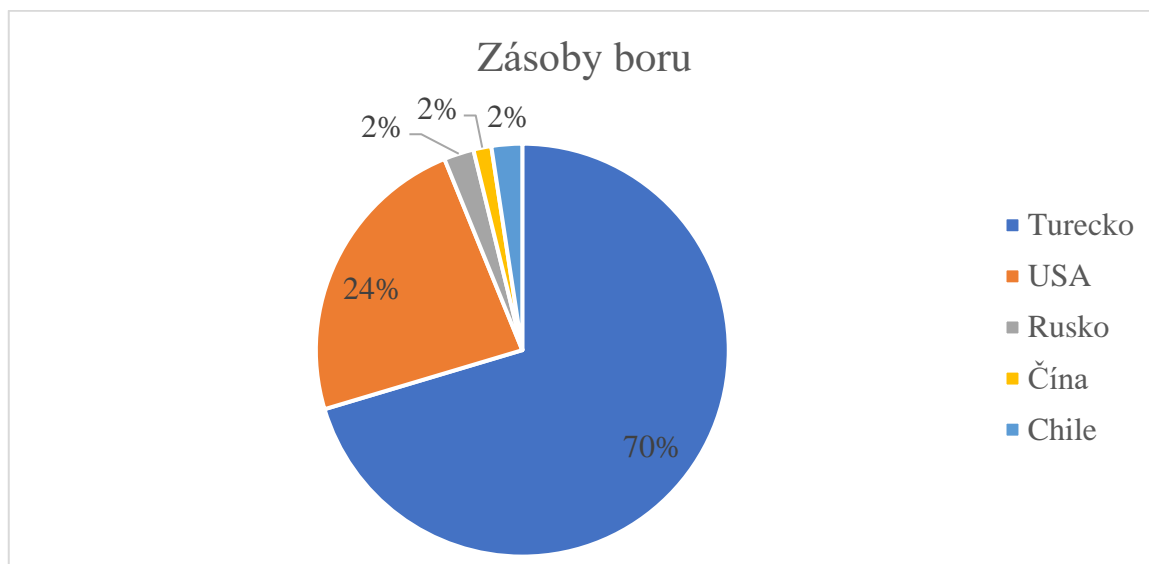
Z vody je možno bor uvolňovat pomocí několika metod, mezi tyto patří adsorpční metoda, metoda pracující s membránami a hybridní metoda, tyto jsou však velmi nákladné a nebyly doposud použity ve větším měřítku. Nejnadějnějšími se do budoucna zdají metody hybridní, jejich využití na poloprůmyslové, či dokonce průmyslové úrovni vyžaduje další výzkum, zejména v oblasti sorbentů. V současné době nicméně ještě není jisté, které konkrétní metody budou využity či jak přesně bude extrakce probíhat. Nutno podotknout, že hlavní motivací těchto výzkumů není těžba boru, nýbrž snížení jeho koncentrace ve vodách, a to kvůli zdravotním rizikům s ním spojeným [54].

Produkce a zásoby

V roce 2020 bylo největším producentem boru Turecko následované Chile, Čínou a Bolívií. Oproti těmto číslům je roční produkce dalších států v podstatě zanedbatelná [17]. Celková světová produkce boru byla 3 400 kt [17].

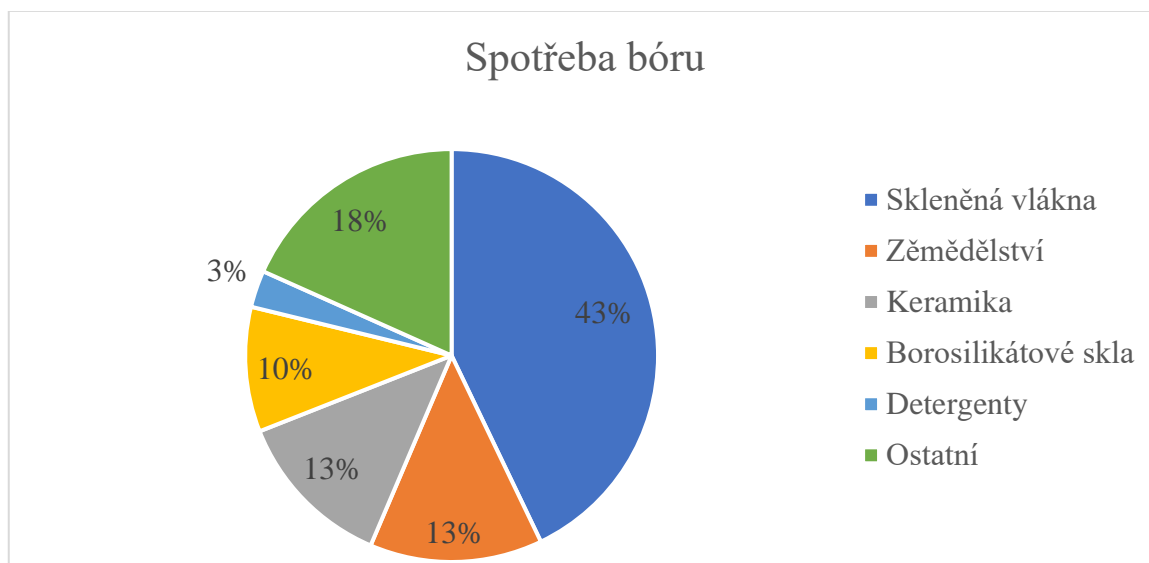
Z pohledu zásob boru je na špici Turecko, následované Ruskem a USA. Zásoby dalších států jsou již marginální. Celkem jsou světové zásoby tvořeny 1,3 Gt boru [17] (1,0 Gt ^{11}B), světové zdroje sice nejsou známy, avšak odhaduje se, že většina se jich nachází v Turecku [17].

Z průměrné koncentrace boru v hydrosféře lze odhadovat, že obsahuje cca 6 118 Gt boru (4 890 Gt ^{11}B) [46b]. Rozložení zásob ve vztahu k jednotlivým zemím je zobrazeno na obrázku 11 [17].



Obrázek 11: Podíl jednotlivých zemí na světových zásobách boru, převzato ([46b])

Graf rozložení spotřeby boru pro jednotlivé obory v roce 2020 je znázorněn na obrázku 12 [26h]. V současnosti trh s borem roste (posledních 10 let o přibližně 8 % ročně) a například do roku 2027 by měl narůst o přibližně 30 %. Do budoucna pak dle [17] jeho nedostatek nehrozí. K recyklaci boru v současnosti dochází pouze v míře zanedbatelné. V oblasti detergentů a některých dalších lze bor nahradit sloučeninami sodíku, draslíku či mastnými kyselinami. V oblasti skel může být nahrazen fosfáty. V oblasti jako substituent poslouží například celulóza či minerální vlny.



Obrázek 12: Rozdělení spotřeby boru jednotlivými odvětvími v roce 2015, převzato ([26h])

Kromě problémů se spotřebou energie dochází dále při těžbě boru k jeho únikům do životního prostředí, kde má při vyšších koncentracích toxické účinky. Další problémy jsou spojeny s užitím kyseliny sírové. Konečně těžba v povrchových dolech má nezanedbatelné dopady, a to bez ohledu na těženou surovinu.

Obohacování

Jak již bylo poznamenáno, ^{10}B je využíván v jaderné energetice pro svůj vysoký účinný průřez pro absorpci neutronů. Za účelem dosažení maximální účinnosti zařízení obsahujících bor a majících absorbovat neutrony je potřeba, aby byl použitý bor obohacen až na 99 % obsahu tohoto izotopu. Z tohoto důvodu je obohacování boru již vcelku dobře zvládnutým procesem a nemělo by představovat překážku při případném využívání ^{11}B ve fúzní energetice [55]. Obohacování je uskutečňováno několika způsoby: destilací, kryogennou destilací a iontovou výměnou, nicméně pouze první z metod byla doposud prováděna na průmyslové úrovni.

Je možné, že aby šlo usnadnit udržení fúzní reakce, bude nutné bor obohacovat, neboť pro vytvoření plazmatu se musí ionizovat i atomy ^{10}B . Ty však fúzní reakci nepodléhají, a navíc hrozí nebezpečí postupného růstu jejich koncentrace v plazmatu. Konkrétnější data k případnému obohacování boru pro budoucí fúzní jaderné reaktory se však autorovi nepodařily dohledat.

Cena

V roce 2022 byla cena za jednu tunu přírodního boru 748 \$. Cena se dlouhodobě zvyšuje, přibližně o 13 \$ ročně [26i]. Při vypracovávání této práce se autorovi nezdařilo najít hodnotu obohaceného ^{11}B , avšak hodnota ^{10}B obohaceného na 96 % je dle [55] 37 000 \$/kg, přičemž 55 % z ceny představuje cena elektřiny, cena boru jako takového tvoří pouze 10 %. Cena ^{11}B by mohla být nižší, neboť v přírodním boru tvoří majoritu. Dokument [55] dále připouští další pokles ceny v případě lepšího zvládnutí některých ze zmíněných metod. Na struktuře ceny se projevuje fakt, že se jedná o energeticky velmi náročné procesy.

Shrnutí

Tato část práce poskytuje náhled na procesy spojené s borem od jeho těžby po vyžití ve fúzní jaderné elektrárně, včetně jejich environmentálních dopadů. Některé aspekty a procesy však ještě nejsou plně prozkoumány, mezi ně patří například: získávání boru z vody, ať už slané či sladké, obohacování B^{11} nebo recyklace. Lze tedy předpokládat, že v budoucnu budou zde uvedené ceny značně odlišné. Představené environmentální následky těžby by v budoucnu mohly být sníženy. Vliv na to bude mít zejména to, zda se podaří najít metody, jak zabránit únikům boru, a také zdroje využívaných energií, zejména energie elektrické. Otázkou jsou pak aspekty zmíněných, doposud ne plně prozkoumaných procesů.

Fúzní energetika může být ohrožena nedostatkem boru z těchto důvodů:

- využití pozemských zásob boru pro nefúzní aplikace (spíše nehrozí),
- pozdní zvládnutím či nezvládnutím získávání boru z vod, či případné navýšení ceny boru nad mez rozumnou pro použití ve fúzní energetice,
- pozdní zvládnutí obohacování ^{11}B nebo jeho vysoká energetická, finanční či environmentální náročnost.

Při vypracovávání práce se nepodařilo najít data o ceně obohaceného ^{11}B .

Z pohledu radiační ochrany je bor až do svého vložení do fúzního reaktoru bezproblémovým palivem. Další výhodou z tohoto pohledu je, že v jeho případě se jedná o bezneutronovu fúzi, tudíž nedochází (nebo jen ve velmi malé míře) k aktivaci součástí reaktoru. Bor je zdraví škodlivý při požití [22].

Určení slabé udržitelnosti boru jako zdroje energie závisí na jeho budoucí ceně a na tom, zda-li v ní budou započítány i veškeré externality. Silná udržitelnost závisí na době, po kterou jsou zásoby a zdroje boru schopny vystačit. Toto bude vyhodnoceno v další části této práce.

4.3.2. Vodík (^1H)

Posledním ze zde řešených paliv je ^1H . Je možné, že v budoucnu dojde na použití i jiných, například ^{15}N a podobně, vzhledem k obtížnosti realizace takovýchto reakcí by však pojednávání o nich přesahovalo cíle této práce. Ostatní pro fúzní jadernou energetiku uvažované izotopy vodíku již byly popsány výše.

Zdroje

Na světě se nenacházejí žádná větší přirozená ložiska čistého vodíku, většina se ho nachází ve sloučeninách, a to především ve vodě. Většina vodíku, konkrétně 95 % [56], byla v roce 2022 získávána tzv. šedou cestou. Tato spočívá v extrakci vodíku z fosilních paliv, především ze zemního plynu a uhlí. Jejich využívání je spojeno se značnými emisemi, hlavně CO_2 v případě uhlí, (na 1 kg vodíku ho připadá 18 – 20 kg), a methanu v případě zemního plynu, (na 1 kg vodíku ho připadá 9 – 11 kg převedeno na ekvivalent v CO_2).

Prvním z kandidátů na náhradu šedé cesty je tzv. zelená cesta. Tato využívá elektrolýzu vody. Jde o energeticky velmi náročný proces, a proto je třeba volit vhodný zdroj energie. Jednou z podmínek zelené cesty současně je, aby tato energie pocházela z obnovitelných zdrojů. V roce 2022 byla tímto způsobem vyrobena naprosto zanedbatelná část světové produkce vodíku, to by se však do budoucna mělo změnit [56]. Její výhodou oproti ostatním metodám jsou teoreticky nulové emise a obrovské množství vstupní suroviny volně k dispozici, konkrétní čísla jsou představena v další části.

V rámci tzv. modré cesty je vodík produkován rovněž z fosilních paliv, avšak s tím rozdílem, že se počítá se zachytem uvolněného CO_2 . Tuto technologii je teoreticky možné aplikovat i na stávající šedé závody. Emise by se poté měly pohybovat od 0,4 do 4,5 kg ekvivalentu CO_2 , konkrétní hodnota závisí na množství zachyceného CO_2 a uniklého methanu. Nevýhodou modré cesty (stejně jako šedé) při srovnání se zelenou cestou je fakt, že její vstupní suroviny jsou dostupné pouze v omezeném množství. Také je nutné počítat se spotřebou energie při zachytu CO_2 .

Vzhledem k odhadovanému času nástupu třetí generace fúzních jaderných elektráren, rozdílu mezi množstvím fosilních paliv a vody a požadavkům na udržitelnost energetiky se bude tato práce nadále zabývat pouze extrakcí vodíku z vody pomocí zelené cesty.

V současnosti existuje několik metod, jak elektrolýzu vody provádět. Shrnuje je tabulka 4. Metoda PEM (*proton exchange membrane*) značí technologii s polymerní membránou, SOEC (*solid oxide electrolyser cells*) značí elektrolyzér s pevným oxidem a AEM (*anion exchange membrane*) značí aniontovou výměnu přes membránu.

Metoda	Stav	Vlastnosti
Alkalická	široce rozšířená	<ul style="list-style-type: none"> ○ jednoduchý design ○ ověřená, s fungujícími dodavatelskými řetězci ○ méně flexibilní, obtížně kombinovatelná s OZE
PEM	průmyslový provoz, rychlý růst	<ul style="list-style-type: none"> ○ potřebuje platinu a iridium ○ flexibilní ○ schopnost práce při nestabilních dodávkách energie
SOEC	poloprůmyslový provoz	<ul style="list-style-type: none"> ○ vhodná pro konstantní produkci vodíku ○ potřeba stabilních dodávek energie
AEM	laboratorní zkoušky	<ul style="list-style-type: none"> ○ nevyužívá žádných vzácných kovů ○ používá levnější membránu než PEM

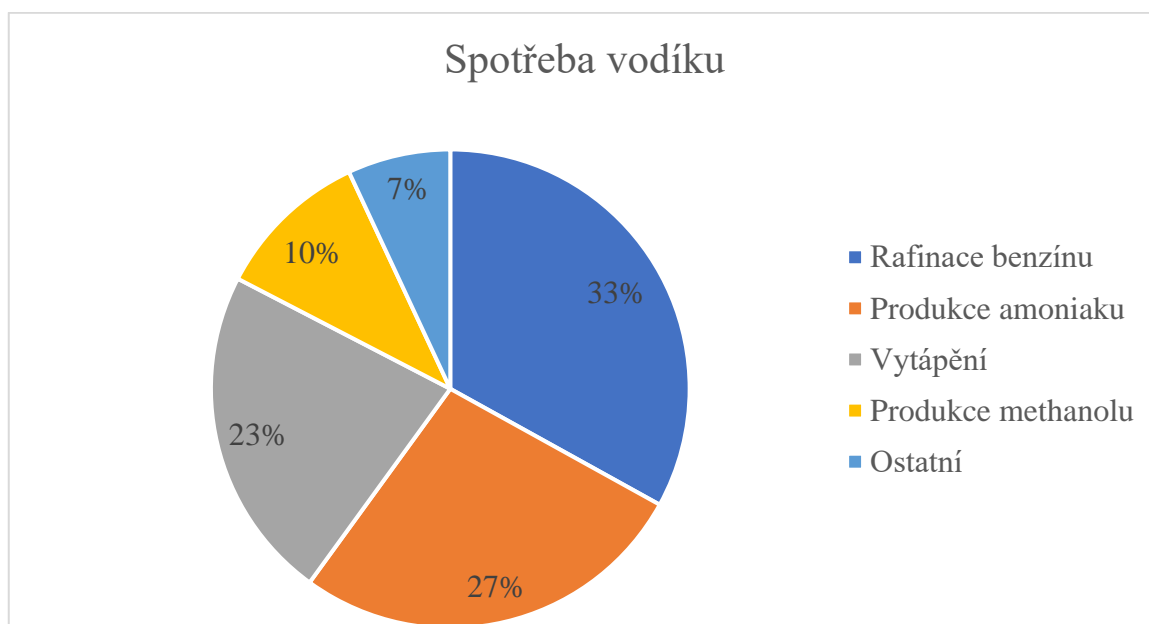
Tabulka 4: Shrnutí jednotlivých metod elektrolýzy vody

Produkce a zásoby

Vzhledem k omezenému využívání vodíkových technologií se tato práce nezabývá rozložením jeho produkce mezi jednotlivými zeměmi. Dle [56] bylo v roce 2018 zelenou cestou vyrobeno 1,2 Mt vodíku. Toto množství by pak v roce 2050 mělo být 25 až 160 Mt, a to dle scénáře vývoje. Pro zajímavost je vhodné uvést, že modrou cestou bylo v roce 2018 vyrobeno 0,6 Mt vodíku a pro rok 2050 je odhadována výroba 40 – 80 Mt.

Jelikož je uvažována produkce pouze z moře, je bezpředmětné zde řešit rozložení zásob vodíku mezi jednotlivými zeměmi. Vzhledem k celkovému množství vody na Zemi by se v ní mělo nacházet přibližně $5 \cdot 10^{19}$ t neboli 50 Et vodíku, většina se ho nachází ve světových oceánech [56].

Vodík je využíván především pro produkci amoniaku, při rafinaci benzínu, pro vytápění a při produkci methanolu. Dále je využíván například při výrobě skla, pro pohon vesmírných nosičů, sváření, chlazení generátorů atd [26j]. Graf rozložení spotřeby vodíku mezi jednotlivými odvětvími je na obrázku 13 [26j].



Obrázek 13: Graf rozložení spotřeby vodíku mezi jednotlivými odvětvími, převzato ([26j])

Cena

V roce 2020 se cena „zeleného“ vodíku pohybovala při přepočtu [27] mezi 2,78 a 7,55 \$/kg. Pro srovnání cena „modrého“ byla 1,56 až 2,67 \$/kg a „šedého“ 1,11 až 2,00 \$/kg. Hodnota „zeleného“ vodíku s pokračujícím vývojem technologií může i relativně klesnout, to samé se však nedá s jistotou říci o ostatních [56].

Shrnutí

Tato část práce poskytuje náhled na procesy spojené s protiem od jeho získávání, po využití ve fúzní jaderné elektrárně včetně jejich environmentálních dopadů. Některé aspekty a procesy, jako jsou nové metody elektrolýzy, však nejsou zcela prozkoumány, tudíž nelze přesně stanovit konkrétní hodnoty. U metod používaných v současnosti však byly stanoveny tyto následky poměrně přesně.

Fúzní energetika může být ohrožena nedostatkem vodíku z těchto důvodů:

- nerealizování vhodné metody, a to jak z energetického, tak z environmentálního hlediska, pro jeho získávání,
- využití veškerého produkovaného vodíku v jiných oblastech.

Z pohledu radiční ochrany je vodík až do svého vložení do fúzního reaktoru. Vodík není toxický či karcinogenní [22].

Určení slabé udržitelnosti vodíku jako zdroje energie závisí na jeho budoucí ceně a na tom, zdali v ní budou započítány i veškeré externality. Silná udržitelnost závisí na době, po kterou jsou zásoby a zdroje vodíku schopny vystačit. Toto bude vyhodnoceno v další části této práce.

4.4. Srovnání

Pro další použití nejen v této práci je vhodné shrnout poznatky zaznamenané v této kapitole do přehledné formy. Toto by měla poskytnout tabulka 5. Nejdůležitější jsou přitom zásoby a zdroje daných paliv, jejich současná a případně predikovaná spotřeba (ta však nezohledňuje zastoupení jednotlivých izotopů v přírodní surovině) a současná cena.. Tabulka 6 pak porovnává z podobných hledisek i izotopy vhodné jako násobiče neutronů. Pro přehlednost některé z hodnot vyobrazují grafy na obrázcích 14 a 15. Vzhledem k nutnosti kontextu při hlubším porovnávání jednotlivých dat bude data porovnána až v následujících kapitolách, kde bude také tento stanoven.

Izotop	⁶ Li	T	D	³ He	¹¹ B	¹ H
Zásoby [t]	1,3*10 ⁶	- ^b	9,5*10 ^{9e}	6,2*10 ^{4g}	1,0*10 ⁹	- ^j
Zdroje [t]	5,5*10 ⁶	- ^b	9,5*10 ^{9e}	1,7*10 ^{5h}	1,0*10 ¹⁰ⁱ	- ^j
Voda [t]	1,72*10 ¹⁰	- ^b	4,8*10 ^{13f}	2,5*10 ^{6a}	4,9*10 ¹²	5,0*10 ¹⁹
Současná spotřeba [t/rok]	1*10 ⁵	0,2*10 ⁻³	3,5*10 ²	0	2,6*10 ⁶	1,2*10 ⁶
Predikovaná spotřeba [t/rok]	1,5*10 ⁶	0,2*10 ⁻³	3,5*10 ²	0	3,4*10 ⁶	2,5*10 ⁷ – 16,0*10 ^{7d}
Cena [\$/kg]	6,8*10 ⁴	3,8*10 ⁷ – 16,3*10 ^{7d}	1,6*10 ³ – 3,9*10 ^{3d}	2,5*10 ⁶	3,7*10 ⁴	2,8 – 7,6

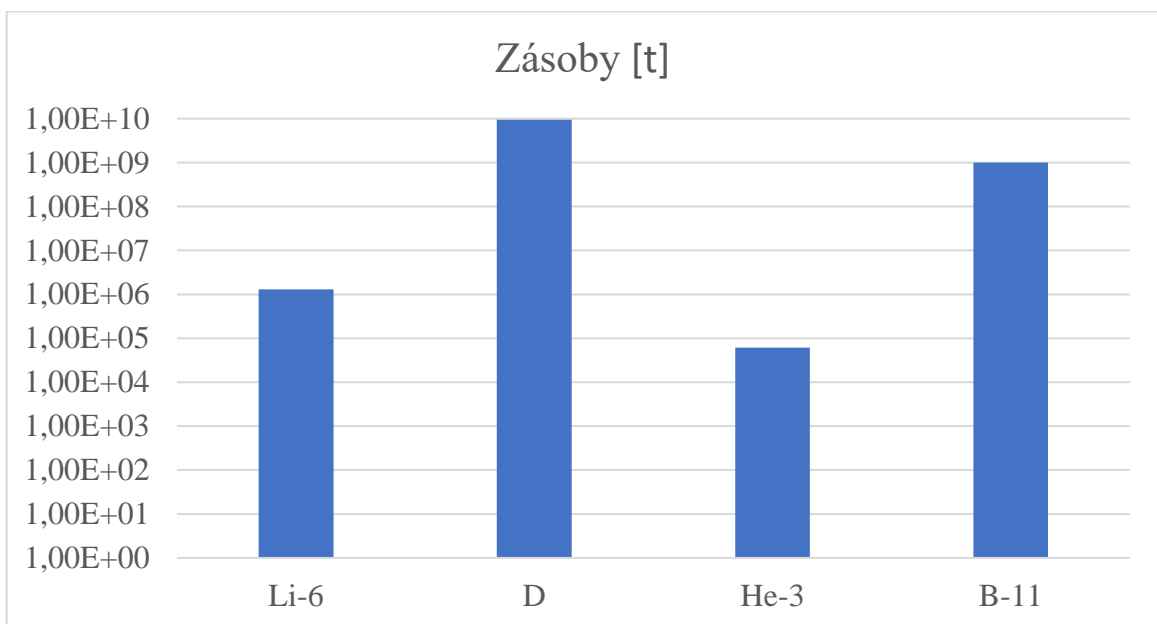
Tabulka 5: Porovnání jednotlivých izotopů vhodných jako paliva budoucích fúzních elektráren

Poznámky k tabulce 5:

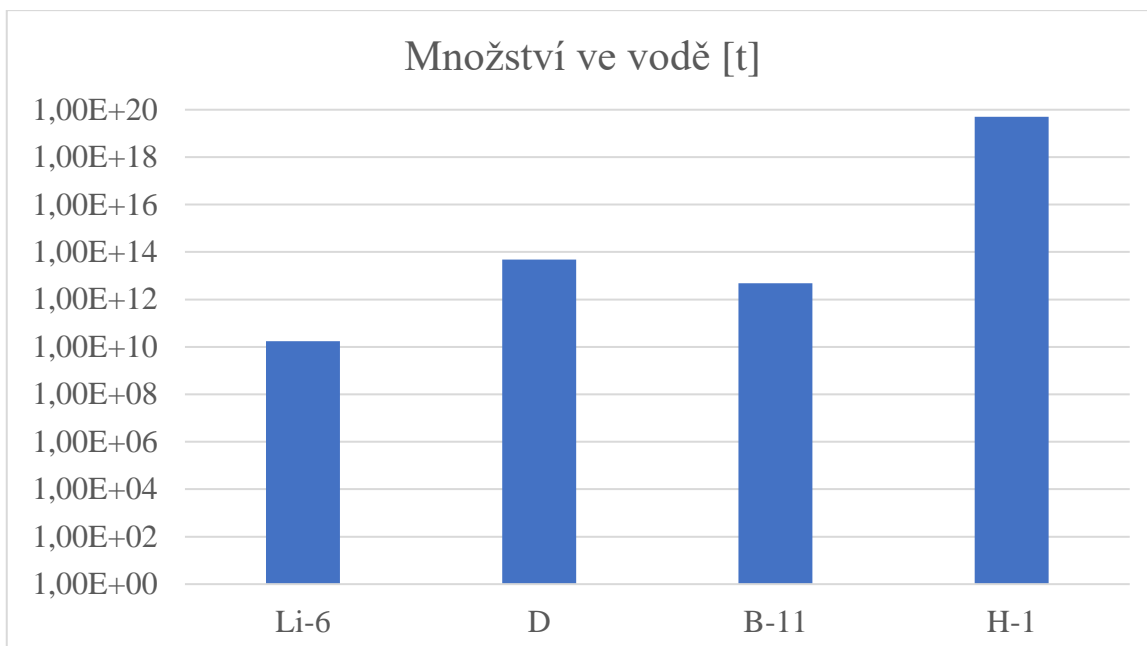
- ^a Celý měsíc
- ^b Nestabilní prvek
- ^c Nepodařilo se nalézt data
- ^d Závisí na zdroji
- ^e Deuterium ve formě těžké vody
- ^f Veškeré deuterium obsažené v hydrosféře
- ^g Množství obsažené v horninách kategorie 1
- ^h Množství obsažené v horninách kategorií 1 a 2
- ⁱ Odhad
- ^j Signifikantnější množství pouze v hydrosféře

Izotop	⁹ Be	²⁰⁸ Pb
Zásoby [t]	4,0*10 ⁴	4,0*10 ⁷
Zdroje [t]	1,0*10 ⁵	8,9*10 ⁸
Voda [t]	1,0*10 ⁷	3,6*10 ⁹
Současná spotřeba [t/rok]	2,6*10 ²	4,3*10 ⁶
Predikovaná spotřeba [t/rok]	3,4*10 ²	4,3*10 ⁶
Cena [\$/kg]	857 – 1700	5620 - 5730

Tabulka 6: Porovnání jednotlivých uvažovaných izotopů vhodných jako násobiče neutronů budoucích fúzních elektráren



Obrázek 14: Porovnání zásob jednotlivých izotopů



Obrázek 15: Porovnání množství jednotlivých izotopů v hydrosféře

4.5. Shrnutí

Tato kapitola objasňuje způsoby a metody získávání jednotlivých paliv a množivých materiálů určených pro základní reakce jednotlivých generací fúzních jaderných reaktorů. Také se zabývá jejich zdroji, zásobami, cenou a environmentálními následky zmíněných procesů. Pokud to povaha daného izotopu vyžaduje, jsou řešeny i jiné problematiky. V neposlední řadě také řeší zadní část palivového cyklu a odhaduje, které faktory ohrožují možné využití daných paliv. Na konci pak srovnává nejdůležitější vlastnosti jednotlivých izotopů. Tyto informace poslouží v dalších kapitolách při stanovování ekonomických a ekologických faktorů jednotlivých palivových cyklů, a to včetně jejich udržitelnosti.

5. Výpočty některých ekonomických a environmentálních aspektů vybraných palivových cyklů budoucích fúzních elektráren

Předchozí kapitoly této práce poskytují data, na jejichž základě lze stanovit některé ekonomické a environmentální aspekty jednotlivých palivových cyklů budoucích fúzních jaderných elektráren. V této kapitole by tak měla být vypočítána spotřeba, doba, po kterou jsou schopny vystačit zásoby, vliv ceny a některé další faktory jednotlivých palivových cyklů.

Referenční model

Pro referenční model elektrárny byl vybrán ten, jenž je obsažen v dokumentu [57]. Jeho parametry shrnuje tabulka 7. Konkrétně se jedná o evropský referenční model reaktoru DEMO 2, který byl sestaven ve Středisku pro fúzní energetiku CCFE v britském Culhamu. Dle [7] poskytuje jeden z nejpřesnějších odhadů nákladů na výstavbu a provoz fúzních elektráren. Navíc také využívá údaje ze současných velkých projektů, jako je například ITER. Přesto jsou výsledky této kapitoly typicky do určité míry zatíženy nejistotou. Model ovšem popisuje elektrárnu DEMO 2 a to by neměl být typický zástupce první generace fúzních jaderných elektráren. Zůstává tedy otázkou, zda je podle něj možné předpovídat vlastnosti dalších generací. Předpokládané časové horizonty ve fúzní energetice popisuje kapitola 3 a teprve až výstavba a provoz budoucích jaderných elektráren dokážou správnost či chybnost těchto výsledků.

V základu je vymodelován pro D-T reakci, v rámci této práce však byla provedena extrapolace tohoto modelu i pro jiné reakce. Ta spočívá primárně v odpovídající změně parametrů magnetických systémů, ale i některých dalších, popsanych blíže v příslušných kapitolách. Model pochází z roku 2015, veškeré zde uvedené ceny byly pomocí [27] převedeny na hodnotu amerického dolaru v roce 2022.

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
Tepelný výkon [MW]	4149,0	Cena elektřiny [\$/MWh]	155,4
Čistý elektrický výkon [MW]	953,1	Cena elektrárny [M\$]	9 379,7
Čistá účinnost elektrárny [%]	29,3	Kapitálové náklady [M\$]	10 786,6

Tabulka 7: Parametry použitého modelu elektrárny

Síla magnetického pole

Tlak magnetického pole ve fúzním jaderném reaktoru odpovídá tlaku plazmatu, který odpovídá druhé mocnině magnetické indukce v reaktoru. Magnetické indukce potřebná pro jednotlivé reakce jsou zanesena v tabulce 8. Tabulka také obsahuje jejich srovnání s D-T reakcí, neboť tato informace bude důležitá pro některé další výpočty.

Reakce	Magnetická indukce [T]	Poměrná velikost k D-T [-]
D-T	5,3	1
D-D	38,0	7,2
D- ³ He	30,0	5,7
H- ¹¹ B	92,0	17,3

Tabulka 8: Potřebné velikosti magnetické indukce a jejich srovnání

Teplota plazmatu

Stejně jako v případě magnetické indukce je nutné pro některé následující výpočty znát optimální teplotu plazmatu. Její hodnota je pro jednotlivé reakce zanesena v tabulce 9. Tabulka také obsahuje porovnání pro D-T a ostatní reakce [58].

Reakce	Teplota plazmatu [K]	Poměrná velikost k D-T [-]
D-T	$4,0 \cdot 10^7$	1,0
D-D	$4,0 \cdot 10^8$	10,0
D- ³ He	$3,4 \cdot 10^8$	8,5
H- ¹¹ B	$3,4 \cdot 10^9$	85,0

Tabulka 9: Optimální teploty plazmatu nutné pro splnění Lawsonova kritéria a jejich porovnání

5.1. Denní spotřeba paliv

Tato kapitola se zabývá denní spotřebou daných izotopů paliva v budoucích fúzních jaderných elektrárnách. Uvedeny budou pouze reakce s již dříve popsány izotopy, a to pouze ty základní, respektive ty, které byly popsány v předcházejících kapitolách. Popis dalších by nejen přesahoval rozsah této práce, ale navíc se k nim autorovi podařilo nalézt pouze nepoměrně nižší množství informací a to by mohlo vést k nepřesnostem. Konečně, pravděpodobnost realizace těchto nepopisovaných cyklů je i s přihlédnutím k obtížnosti jejich uskutečnění daleko nižší než u těch popsanych.

Metodologie

Pro každou z uvedených reakcí, respektive pro každou souhrnnou reakci, což je minimální souhrn všech reakcí, které musí proběhnout, aby se ze vstupů daného palivového cyklu staly výstupy, již bylo v této práci uvedeno množství uvolněné energie a množství spotřebovaných atomů. Dále je možné použít data ze zmiňovaného modelu, jako je účinnost, vlastní spotřeba apod. Konečně, pro získání atomových hmotností byl použit dokument [47].

Model [57] poskytuje údaj o celkové účinnosti elektrárny η_{tot} , tuto je možno vyjádřit vztahem (2), kde P_{fuz} značí fúzní výkon elektrárny, neboli souhrnný výkon reakcí daného palivového cyklu, a P_{ec} značí čistý elektrický výkon elektrárny, což je výkon, který elektrárna dodává do elektrické sítě. Celková účinnost a čistý elektrický výkon elektrárny jsou obsaženy v tabulce 7.

System úpravy tritia má příkon 15 MW_e. O jeho výkon vydělený hrubou účinností, která činí 40,01 %, je třeba snížit potřebný fúzní výkon elektrárny s H-¹¹B cyklem, neboť zde nehrozí výskyt tritia ani z parazitických reakcí. Ze známého fúzního výkonu a energie jedné souhrnné reakce E_r (viz. výše) je pak možné pomocí (3) spočítat frekvenci souhrnné reakce f_r, která značí, jak často musí proběhnout v reaktoru souhrnná reakce, aby bylo dosaženo požadovaného výkonu. Malé písmeno i v indexech zastupuje daný izotop, malé r pak souhrnnou reakci. Z frekvence, z množství atomů daného izotopu použitého či vznikuvšího v dané souhrn reakci N_{ir} (viz. výše) a hmotnosti atomu daného izotopu m_i [47] je pak dle (4) možné určit jeho spotřebu či produkci za čas M_{ir} pro daný cyklus. V celku je pak možné denní spotřebu/produkci shrnout vztahem (5), kde M_{dir} značí denní spotřebu/produkci daného izotopu v případě užití daného cyklu.

$$P_{fuz} = \frac{P_{ec}}{\eta_{tot}} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{P_{fuz}}{E_r} \quad (3)$$

$$M_{ir} = f_i * N_{ir} * m_i \quad (4)$$

$$M_{dir} = \frac{P_{fuz} * N_{ir} * m_i * 86\,400}{E_r} \quad (5)$$

Výpočet

Čistý elektrický výkon elektrárny P_{ec} je 953,1 MW. Pokud je tento vydělen čistou účinností 0,293, je získán fúzní výkon P_{fuz} = 3255,12 MW. Jednou souhrnnou reakcí D-T cyklu je získáno 3,59*10⁻¹² J energie (E_{D-T}), pokud je tedy tímto číslem vydělen P_{fuz} ve watttech, je získána frekvence reakce f_{D-T} = 9,06*10²⁰ s⁻¹, což značí, že každou sekundu musí dojít k 9,07*10²⁰ souhrnným D-T reakcím. Pro výpočet hmotnostní spotřeby lithia za jednotku času fúzní elektrárnou z D-T cyklem je pak nutno tuto frekvenci vynásobit počtem atomů spotřebovaných na souhrnnou reakci N_{LiD-T} = 1 a hmotností jednoho atomu lithia m_{Li} = 1⁻²⁶ kg. Tak je možno zjistit, že M_{LiD-T} = 9,06*10⁻⁶, neboli že daná elektrárna spotřebuje za 1 s 9,06 mg ⁶Li. Pokud je toto číslo vynásobeno počtem sekund v jednom dni, což je 84 400, je možno zjistit, že M_{dLiD-T} = 0,78 kg, neboli že fúzní elektrárna o čistém elektrickém výkonu 953,1 MW spotřebuje denně přibližně 780 g ⁶Li.

Výsledky

Denní spotřebu jednotlivých izotopů pro jednotlivé reakce udává tabulka 10. Pro H-¹¹B elektrárnu platí, že díky absenci systému úpravy tritia je při zachování P_{ec} její P_{fuz} o 37,49 MW nižší.

Cyklus	Izotop	M _{dir} [kg/den]	Cyklus	Izotop	M _{dir} [kg/den]
D-T	D	0,261	D- ³ He	D	0,321
	⁶ Li	0,783		³ He	0,481
D-D	D	0,816	H- ¹¹ B	H	0,334
				¹¹ B	3,675

Tabulka 10: Denní spotřeba jednotlivých izotopů pro jednotlivé palivové cykly fúzní elektrárnou o čistém el. výkonu 953,1 MW

Diskuse

Předem diskuse je nutno poznamenat, že při výpočtu nebyla zohledněna možnost zlepšení technologií mezi jednotlivými generacemi fúzních jaderných zařízení, takže bylo předpokládáno, že kromě toho, že odpadla potřeba systému úpravy tritia pro $H-^{11}B$ reakci nedošlo u dalších systémů k žádné jiné změně, a to především z pohledu spotřeby elektrické energie.

Jak je patrné, největší spotřebu paliva má $H-^{11}B$ cyklus. Toto je vysvětlitelné pomocí závislosti vazebné energie jednoho nukleonu na atomovém čísle, neboť k nejprudším změnám v něm dochází právě v oblasti velmi nízkých nukleonových čísel, do které již ^{11}B nespadá. Na vysokou spotřebu boru má dále vliv vysoká hmotnost jeho atomů. Dále je patrné, že nejmenší množství paliva spotřebuje při stejném výkonu $D-^3He$ cyklus.

Pakliže by byl u dalších generací fúzních jaderných elektráren uvažován vývoj technologií, je možno očekávat, že by došlo ke zvýšení jejich účinnosti, což vede ke snížení spotřeby paliva. Vzhledem k příslušnosti $H-^{11}B$ cyklu k třetí generaci zařízení je možno maximální nárůst účinnosti očekávat právě u něj.

Při výpočtu reakcí pro druhou a třetí generaci fúzních zařízení nebylo zohledněno teoretické snížení celkové účinnosti elektrárny kvůli zvýšení spotřeby elektrické energie ohřevy plazmatu v důsledku jeho vyšší teploty a zvýšení energetických ztrát v magnetických systémech v důsledku potřeby větší síly magnetického pole. Lze totiž předpokládat, že při uvážení technologického pokroku je celková změna celkové účinnosti kladná, tudíž toto zjednodušení by neměla způsobovat výraznější nárůst chybnosti výsledků. Další ztráty by mohly být spojeny s ionizační energií jednotlivých izotopů, tato je však alespoň řádově pro izotopy vodíku a helia srovnatelná. Tento faktor tak svědčí primárně v neprospěch boru. Další ztráty by mohly být způsobeny nižším než 100% obohacením některých izotopů, tímto je ohrožen primárně bor, dále pak například deuterium, pakliže bylo extrahováno z polotěžké vody, či lithium, u něj je však produkce tritia v omezené míře možná i z izotopu 7Li .

Dále je možno očekávat ztráty v důsledku parazitických fúzních reakcí. Jak již však bylo ukázáno, pravděpodobnost výskytu těchto reakcí je malá, a to natolik, že lze očekávat maximálně 1% zvýšení spotřeby paliv, což představuje zvýšení v rámci jednotek gramů. Vzhledem k povaze návrhů budoucích fúzních zařízení autor neočekává žádné další důvody pro nárůst spotřeby paliv.

Jak bylo naznačeno, reaktory první generace budou pro začátek svého fungování potřebovat jistou dávku tritia. Tato by měla dle [59] být maximálně 5,78 kg. Teoreticky by měla být vypočtena i prvotní dávka ostatních paliv. Jelikož, jak už bylo popsáno, podléhají parazitickým reakcím jen v míře malé či žádné, mělo by se množství prvotní dávky rovnat množství paliva zbylého v reaktoru po jeho odstavení. I kdyby tomu tak nebylo, je možno očekávat velikost prvotní dávky maximálně v řádu jednotek kilogramů, a to je množství zanedbatelné i ve srovnání s množstvím paliva spotřebovaných za pouhý jeden rok.

Závěr

Byla vypočtena spotřeba jednotlivých izotopů pro jednotlivé vybrané palivové cykly budoucích fúzních jaderných elektráren. Dále byly vyjmenovány jednotlivé důvody teoreticky vedoucí k navýšení této spotřeby, následně bylo dokázáno, že by tato spotřeba mohla být naopak nižší. Získaná data budou použita pro výpočty dalších faktorů. Při porovnání dat získaných v této kapitole lze pozorovat, že tato svědčí v neprospěch H-¹¹B cyklu, neboť spotřeba boru je v tomto cyklu vysoká a je spojen s dalšími ztrátami, ať už v důsledku potřeby ohřevu na vysoké teploty, kvůli potřebné síle magnetického pole, kvůli nutnosti obohacování nebo kvůli relativně vysoké ionizační energii. Z tohoto srovnání naopak vyplívá jako nejnvýhodnější D-³He reakce.

5.2. Denní spotřeba násobičů neutronů

Jak již bylo poznamenáno, pro první generaci fúzních jaderných zařízení bude pravděpodobně nutno užít násobičů neutronů. Popsány zde budou pouze dva a to ⁹Be a ²⁰⁸Pb. Z pohledu násobení neutronů mají nejlepší parametry a navíc jsou jako jediné zvažovány i pro použití v reaktoru ITER, konkrétně se jedná o koncepty blanketů HCPB a WCLL. Je možné uvažovat i o jiných násobičích, jejich popis by však převyšoval parametry této práce. Originální model elektrárny je uvažován s beryliovým násobičem.

Metodologie

Pro výpočet poslouží stejné výrazy jako v předchozí kapitole, tudíž (2), (4), (4) a (5). Výraz (5) je však nutné vynásobit koeficientem ztráty neutronu k_{zn} , jenž je možné získat z výrazu (6). Zde TBR značí tzv. Tritium Breeding Ratio (poměr množení tritia). Tento koeficient je konstantou, jež byla získána v dokumentu [3], přičemž značí, kolik atomů tritia musí být vyprodukováno na jeden atom tritia využitý. Jeho hodnota je v tomto případě 1,05. Pokud je od tohoto odečtena 1, je možno získat číslo udávající, kolik neutronů navíc je nutno získat násobením neutronů v blanketu pro udržení tritiové samostatnosti. Pro získání atomových hmotností byl použit dokument [47], původ dalších veličin je stejný jako v předchozí kapitole.

$$k_{zn} = TBR - 1 \quad (6)$$

$$M_{dir} = \frac{P_{fuz} * N_{ir} * m_i * 86\,400}{*E_r} * k_{zn} \quad (7)$$

Výpočet

Výpočet proběhl obdobným způsobem jako u denní spotřeby paliv.

Výsledky

Denní spotřebu jednotlivých izotopů pro násobiče neutronů udává tabulka 11.

Izotop	M _{dir} [kg/den]
⁹ Be	0,059
²⁰⁸ Pb	1,354

Tabulka 11: Denní spotřeba jednotlivých izotopů pro násobiče neutronů

Diskuse

Na základě výsledků je možno pozorovat více než dvacetinásobnou spotřebu olova oproti beryliu. Tato je primárně způsobena jeho více než dvacetinásobnou atomovou hmotností. Je nutno poznamenat, že koeficient k_z byl zvolen na základě literatury přibližně 0,05 [5], což je konzervativní volba. Z toho tak plyne, že vypočítané hodnoty mohou být v praxi o něco nižší. Násobič neutronů bude procházet přepracováním. Toto je nutné z toho důvodu, aby byl zachována dostatečná míra pravděpodobnosti násobící reakce v násobiči, bude to mít však také za následek jisté, dle nálezů autora této práce v literatuře doposud ne zcela určené ztráty. Ve světle tohoto poznatku je tak možné považovat konzervativní přístup za správný. Pro konzervativní přístup svědčí i fakt, že na obou izotopech dochází k parazitickým reakcím, u berylia k absorpci neutronů či částic alfa, u olova pouze k absorpci neutronů. Míra pravděpodobnosti těchto reakcí u daných izotopů však patří mezi ty nejnižší. U olova mohou být další ztráty způsobeny nedosažením 100% obohacení, což není případ berylia, neboť toto je v přírodě téměř ze 100 % tvořeno izotopem ^9Be , na druhou stranu může násobení neutronů do jisté míry probíhat i na jeho ostatních přírodních izotopech. Tyto faktory tak svědčí spíše ve prospěch berylia jako násobiče neutronů.

Závěr

Byla vypočtena spotřeba jednotlivých izotopů násobičů neutronů pro první generaci budoucích fúzních jaderných elektráren. Dále byly vyjmenovány důvody, proč by se vypočtené údaje mohly odlišovat od reality, a bylo provedeno srovnání, které poukazuje na výhodnost berylia a nevýhodnost olova, alespoň z pohledu této kapitoly.

5.3. Vydatnost jednotlivých paliv a násobičů

Tato kapitola řeší, po jako dobu jsou lidstvu schopny vystačit daná paliva, a současně s tím rozlišuje, zda pojednává o zásobách, zdrojích či množstvích nalézající se v hydrosféře. V kapitole jsou počítány délky časových úseků, po které je dané množství suroviny schopno uspokojovat poptávku ze strany fúzních aplikací při využívání daného palivového cyklu a při daném scénáři vývoje energetiky a zastoupení fúzní energie v primárních energetických zdrojích. Výpočty primárně nezohledňují mimofúzní spotřebu, neb tuto je možno pouze odhadovat a je ovlivněna mnoha okolnostmi. Nicméně, v diskuzi jsou některé problematiky spojené s mimofúzní spotřebou zmíněny.

Metodologie

Jedním z důležitých faktorů při vyhodnocování vydatnosti paliva pro nějaký zdroj energie je to, kolik energie by jím mělo být vyráběno. Vzhledem k předpokládanému začátku fungování fúzní jaderné energetiky, jenž leží v ne příliš blízké budoucnosti, není možno použít současné údaje o spotřebě energií, je tak nutné najít spolehlivou predikci budoucího vývoje spotřeby. Tuto dle autora této práce a dle práce [7] poskytuje dokument [60]. Ten jako stěžejní bod volí rok 2100, kdy by světová roční spotřeba energie měla dosáhnout maxima. Zároveň zpracovává několik scénářů vývoje energetiky, podle nichž by roční spotřeba primárních energetických zdrojů (PEZ) měla být od 750 EJ do 900 EJ, a to v závislosti na stupni technologického vývoje a rychlosti růstu populace.

Co se týká zastoupení jaderné fúze v primárních zdrojích, navrhuje autor této práce tři scénáře. Ve shodě s dokumentem [7] je to 100% a 50% procentní zastoupení v primárních zdrojích, jako třetí pak navrhuje scénář, kdy by zastoupení jaderné fúze bylo 4,9 %, což bylo v roce 2019 zastoupení klasické jaderné energetiky [61]. V celku tak vzniká 6 možných scénářů vývoje: A – 900 EJ a 100 %, B – 900 EJ a 50 %, C – 900 EJ a 4,9 %, D – 750 EJ a 100 %, E – 750 EJ a 50 % a F – 750 EJ a 4,9 %.

Pro výpočet budou využity údaje získané v předchozích kapitolách a dále model elektrárny z dokumentu [57]. Nejprve je třeba určit požadovaný celkový průměrný elektrický výkon fúzních elektráren P_c , a to pomocí vztahu (8), kde E_{PEZ} značí roční energii primárních energetických zdrojů a k_z zastoupení jaderné fúze ve světové energetice, tyto jsou obsaženy o odstavec výše. Z tohoto údaje je pak možno pomocí vztahu (9) určit průměrný počet provozovaných fúzních jaderných elektráren N_e , které by svým výkonem měly odpovídat elektrárně modelové (jejíž čistý elektrický výkon je zanesen v tabulce 7). Z tohoto údaje lze pomocí výrazu (10) získat celkovou roční spotřebu daného izotopu pro fúzní energii M_{fir} , kde M_{dir} pochází z tabulek 10b a 11b.

Pomocí těchto vztahů pak lze díky (11) získat údaj o vydatnosti zásob/zdrojů atd. daných fúzních paliv pro jednotlivé palivové cykly podle daných scénářů T_{si} , kde m_{si} značí množství konkrétního paliva v zásobách atd. a index s je v případě zásob nahrazen indexem z , v případě zdrojů indexem d a v případě hydrosféry indexem h . Tyto údaje se rovněž nachází v tabulkách 5 a 6. Celý výpočet je pak shrnut vztahem (12).

$$P_c = \frac{E_{PEZ} * k_z}{31\ 557\ 600} \quad (8)$$

$$N_e = \frac{P_c}{P_{ec}} \quad (9)$$

$$M_{fir} = N_e * M_{dir} * 365,25 \quad (10)$$

$$T_{si} = \frac{m_s}{M_{fir}} \quad (11)$$

$$T_{si} = \frac{m_{si}}{365,25 * M_{dir} * \frac{E_{PEZ} * k_z}{P_{ec} * 31\ 557\ 600}} \quad (12)$$

Výpočet

Pro scénář A je jej možno získat vynásobením roční energie PEZ (E_{PEZ}), která pro daný scénář činí 900 EJ, zastoupením fúzních elektráren v PEZ (k_z), které pro daný scénář činí 1. Takto je možno zjistit, že v případě scénáře A musí všechny fúzní elektrárny vyrobit ročně 900 EJ energie. Pokud je tato hodnota vydělena průměrným počtem sekund v roce (31 557 600), lze získat celkový průměrný výkon všech fúzních zdrojů P_c , pro scénář A to je $2,85 * 10^{13}$ W. Jestliže je toto číslo vyděleno čistým elektrickým výkonem jedné fúzní elektrárny (P_{ec}), který činí $953,1 * 10^6$ W, lze získat požadovaný počet fúzních elektráren v provozu N_e , tento pro scénář A činí přibližně 29 923. Pokud je toto číslo vynásobeno již vypočtenou denní spotřebou lithia elektrárnou s D-T cyklem $M_{dLiD-T} = 0,78$ kg a průměrným počtem dní v roce, lze zjistit že $M_{LiD-T} = 8,52 * 10^6$ kg, neboli že celková roční spotřeba lithia všemi jadernými elektrárnami při scénáři A a výhradním použití D-T elektráren je 8,52 kt. Pokud je touto hodnotou vyděleno množství lithia v zásobách, lze zjistit, že $T_{zLi} = 1,42 * 10^1$, neboli, že pokud by veškerá pozemská energetická poptávka (900 EJ/rok) měla být uspokojena energií z D-T fúzních elektráren a pokud by se měl vyplnit predikovaný scénář mimofúzní spotřeby, postačí zásoby lithia na cca 2 000 let.

Výsledky

Výpočty byly provedeny pro každé z paliv a každý z palivových cyklů, jakožto i pro oba násobiče neutronů. V případě ^3He neznačí index malé h hydrosféru ale celkové měsíční zásoby a zdroje; tyto dva pojmy v případě Měsíce nelze v současné době rozlišit. Index z pak značí množství obsažené v horninách kategorie 1, neb tyto jsou nejsnáze těžitelné, index d pak značí množství v horninách kategorie 1 a 2. V případě D, jenž se nachází jen ve vodě, je rozdělení následující: indexy z a d značí jeho množství v těžké vodě a index h veškeré deuterium v hydrosféře. Zdroje ^{11}B byly na základě studia rozložení zásob a zdrojů u jiných podobných surovin odhadnuty na desetinásobek zásob [17]. Konečně, ^1H se nachází téměř výhradně v hydrosféře a v podstatě pouze ve formě lehké vody.

V každé tabulce (kromě výše zmíněných výjimek) značí T_{zi} vydatnost při použití izotopu i pouze ze zásob, T_{di} vydatnost při použití izotopu i ze zdrojů a zásob a T_{hi} vydatnost při použití izotopu i z hydrosféry.

Scénář A – vyšší predikovaná spotřeba (900 EJ), 100 % PEZ z fúzních zařízení

Byly provedeny výpočty pro scénář A pro každý z navrhovaných palivových cyklů; výsledky pro D-T cyklus jsou v tabulce 12, pro D-D cyklus v tabulce 13, pro D- ^3He cyklus v tabulce 14 a pro H- ^{11}B cyklus v tabulce 15.

D-T	D	^6Li	^9Be	^{208}Pb
T_{zi} [let]	$3,3 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^2$	$6,2 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^3$
T_{di} [let]	$3,3 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^2$	$6,0 \cdot 10^4$
T_{hi} [let]	$1,7 \cdot 10^{10}$	$2,0 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^5$

Tabulka 12: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři A

D-D	D
T_{zi} [let]	$1,1 \cdot 10^6$
T_{di} [let]	$1,1 \cdot 10^6$
T_{hi} [let]	$5,4 \cdot 10^9$

Tabulka 13: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři A

D- ^3He	^3He	D
T_{zi} [let]	$1,2 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^6$
T_{di} [let]	$3,3 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^6$
T_{hi} [let]	$4,8 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^{10}$

Tabulka 14: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D- ^3He cyklus při scénáři A

H- ^{11}B	H	^{11}B
T_{zi} [let]	$1,4 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^4$
T_{di} [let]	$1,4 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^5$
T_{hi} [let]	$1,4 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^8$

Tabulka 15: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H- ^{11}B cyklus při scénáři A

Scénář B – vyšší predikovaná spotřeba (900 Ej), 50 % PEZ z fúzních zařízení

Byly provedeny výpočty pro scénář B pro každý z navrhovaných palivových cyklů; výsledky pro D-T cyklus jsou v tabulce 16, pro D-D cyklus v tabulce 17, pro D-³He cyklus v tabulce 18 a pro H-¹¹B cyklus v tabulce 19.

D-T	D	⁶ Li	⁹ Be	²⁰⁸ Pb
T _{zi} [let]	6,6*10 ⁶	3,0*10 ²	1,2*10 ²	5,4*10 ³
T _{di} [let]	6,6*10 ⁶	1,3*10 ³	3,1*10 ²	1,2*10 ⁵
T _{hi} [let]	3,4*10 ¹⁰	4,0*10 ⁶	3,1*10 ⁴	4,9*10 ⁵

Tabulka 16: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři B

D-D	D
T _{zi} [let]	2,1*10 ⁶
T _{di} [let]	2,1*10 ⁶
T _{hi} [let]	1,1*10 ¹⁰

Tabulka 17: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři B

D- ³ He	³ He	D
T _{zi} [let]	2,3*10 ¹	5,4*10 ⁶
T _{di} [let]	6,6*10 ¹	5,4*10 ⁶
T _{hi} [let]	9,5*10 ²	2,7*10 ¹⁰

Tabulka 18: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-³He cyklus při scénáři B

H- ¹¹ B	H	¹¹ B
T _{zi} [let]	2,7*10 ¹⁶	5,0*10 ⁴
T _{di} [let]	2,7*10 ¹⁶	5,0*10 ⁵
T _{hi} [let]	2,7*10 ¹⁶	2,4*10 ⁸

Tabulka 19: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H-¹¹B cyklus při scénáři B

Scénář C – vyšší predikovaná spotřeba (900 Ej), 4,9 % PEZ z fúzních zařízení

Byly provedeny výpočty pro scénář C pro každý z navrhovaných palivových cyklů; výsledky pro D-T cyklus jsou v tabulce 20, pro D-D cyklus v tabulce 21, pro D-³He cyklus v tabulce 22 a pro H-¹¹B cyklus v tabulce 23.

D-T	D	⁶ Li	⁹ Be	²⁰⁸ Pb
T _{zi} [let]	6,8*10 ⁷	3,1*10 ³	1,3*10 ³	5,5*10 ⁴
T _{di} [let]	6,8*10 ⁷	1,3*10 ⁴	3,2*10 ³	1,2*10 ⁶
T _{hi} [let]	3,4*10 ¹¹	4,1*10 ⁷	3,2*10 ⁵	5,0*10 ⁶

Tabulka 20: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři C

D-D	D
T _{zi} [let]	2,2*10 ⁷
T _{di} [let]	2,2*10 ⁷
T _{hi} [let]	1,1*10 ¹¹

Tabulka 21: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři C

D- ³ He	³ He	D
T _{zi} [let]	2,4*10 ²	5,5*10 ⁷
T _{di} [let]	6,7*10 ²	5,5*10 ⁷
T _{hi} [let]	9,7*10 ³	2,8*10 ¹¹

Tabulka 22: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-³He cyklus při scénáři C

H- ¹¹ B	H	¹¹ B
T _{zi} [let]	2,8*10 ¹⁷	5,1*10 ⁵
T _{di} [let]	2,8*10 ¹⁷	5,1*10 ⁶
T _{hi} [let]	2,8*10 ¹⁷	2,5*10 ⁹

Tabulka 23: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H-¹¹B cyklus při scénáři C

Scénář D – nižší predikovaná spotřeba (700 Ej), 100 % PEZ z fúzních zařízení

Byly provedeny výpočty pro scénář D; výsledky pro D-T cyklus jsou v tabulce 24, pro D-D cyklus v tabulce 25, pro D-³He cyklus v tabulce 26 a pro H-¹¹B cyklus v tabulce 27.

D-T	D	⁶ Li	⁹ Be	²⁰⁸ Pb
T _{zi} [let]	4,0*10 ⁶	1,8*10 ²	7,5*10 ¹	3,2*10 ³
T _{di} [let]	4,0*10 ⁶	7,7*10 ²	1,9*10 ²	7,2*10 ⁴
T _{hi} [let]	2,0*10 ¹⁰	2,4*10 ⁶	1,9*10 ⁴	2,9*10 ⁵

Tabulka 24: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři D

D-D	D
T _{zi} [let]	1,3*10 ⁶
T _{di} [let]	1,3*10 ⁶
T _{hi} [let]	6,5*10 ⁹

Tabulka 25: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři D

D- ³ He	³ He	D
T _{zi} [let]	1,4*10 ¹	3,3*10 ⁶
T _{di} [let]	3,9*10 ¹	3,3*10 ⁶
T _{hi} [let]	5,7*10 ²	1,6*10 ¹⁰

Tabulka 26: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-³He cyklus při scénáři D

H- ¹¹ B	H	¹¹ B
T _{zi} [let]	1,6*10 ¹⁶	3,0*10 ⁴
T _{di} [let]	1,6*10 ¹⁶	3,0*10 ⁵
T _{hi} [let]	1,6*10 ¹⁶	1,5*10 ⁸

Tabulka 27: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H-¹¹B cyklus při scénáři D

Scénář E – nižší predikovaná spotřeba (700 Ej), 50 % PEZ z fúzních zařízení

Byly provedeny výpočty pro scénář E pro každý z navrhovaných palivových cyklů; výsledky pro D-T cyklus jsou v tabulce 28, pro D-D cyklus v tabulce 29, pro D-³He cyklus v tabulce 30 a pro H-¹¹B cyklus v tabulce 31.

D-T	D	⁶ Li	⁹ Be	²⁰⁸ Pb
T _{zi} [let]	8,0*10 ⁶	3,6*10 ²	1,5*10 ²	6,5*10 ³
T _{di} [let]	8,0*10 ⁶	1,5*10 ³	3,7*10 ²	1,4*10 ⁵
T _{hi} [let]	4,0*10 ¹⁰	4,8*10 ⁶	3,7*10 ⁴	5,8*10 ⁵

Tabulka 28: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři E

D-D	D
T _{zi} [let]	2,6*10 ⁶
T _{di} [let]	2,6*10 ⁶
T _{hi} [let]	1,3*10 ¹⁰

Tabulka 29: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři E

D- ³ He	³ He	D
T _{zi} [let]	2,8*10 ¹	6,5*10 ⁶
T _{di} [let]	7,9*10 ¹	6,5*10 ⁶
T _{hi} [let]	1,1*10 ³	3,3*10 ¹⁰

Tabulka 30: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-³He cyklus při scénáři E

H- ¹¹ B	H	¹¹ B
T _{zi} [let]	3,3*10 ¹⁶	6,0*10 ⁴
T _{di} [let]	3,3*10 ¹⁶	6,0*10 ⁵
T _{hi} [let]	3,3*10 ¹⁶	2,9*10 ⁸

Tabulka 31: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H-¹¹B cyklus při scénáři E

Scénář F – nižší predikovaná spotřeba (700 EJ), 4,9 % PEZ z fúzních zařízení

Byly provedeny výpočty pro scénář F pro každý z navrhovaných palivových cyklů; výsledky pro D-T cyklus jsou v tabulce 32, pro D-D cyklus v tabulce 33, pro D-³He cyklus v tabulce 34 a pro H-¹¹B cyklus v tabulce 35.

D-T	D	⁶ Li	⁹ Be	²⁰⁸ Pb
T _{zi} [let]	8,1*10 ⁷	3,7*10 ³	1,5*10 ³	6,6*10 ⁴
T _{di} [let]	8,1*10 ⁷	1,6*10 ⁴	3,8*10 ³	1,5*10 ⁶
T _{hi} [let]	4,1*10 ¹¹	4,9*10 ⁷	3,8*10 ⁵	6,0*10 ⁶

Tabulka 32: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-T cyklus při scénáři F

D-D	D
T _{zi} [let]	2,6*10 ⁷
T _{di} [let]	2,6*10 ⁷
T _{hi} [let]	1,3*10 ¹¹

Tabulka 33: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-D cyklus při scénáři F

D- ³ He	³ He	D
T _{zi} [let]	2,9*10 ²	6,6*10 ⁷
T _{di} [let]	8,3*10 ²	6,6*10 ⁷
T _{hi} [let]	1,2*10 ⁴	3,4*10 ¹¹

Tabulka 34: Vydatnost jednotlivých izotopů pro D-³He cyklus při scénáři F

H- ¹¹ B	H	¹¹ B
T _{zi} [let]	3,4*10 ¹⁷	6,1*10 ⁵
T _{di} [let]	3,4*10 ¹⁷	6,1*10 ⁶
T _{hi} [let]	3,4*10 ¹⁷	3,0*10 ⁹

Tabulka 35: Vydatnost jednotlivých izotopů pro H-¹¹B cyklus při scénáři F

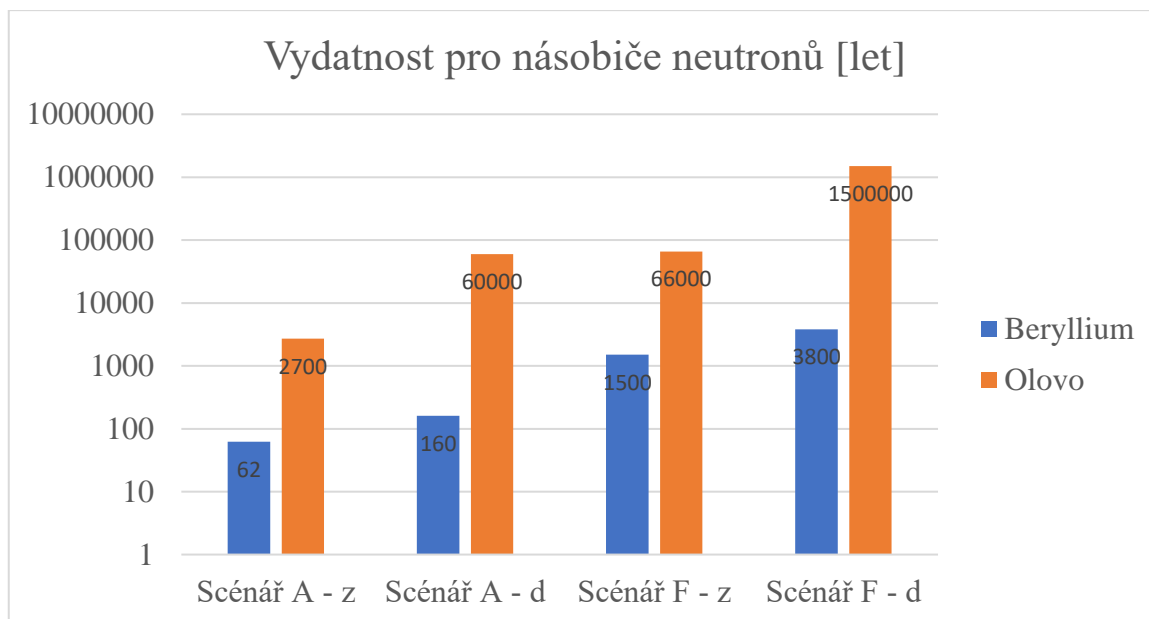
Diskuse - Násobiče neutronů

Jak je patrné z grafu na obrázku 16, z hlediska vydatnosti dosahuje vyšších hodnot vždy olovo. Dané scénáře nebyly zobrazeny pro případ vody, a to především kvůli dříve zmíněné anomálii ve výskytu berylia ve vodě a počátečnímu stadiu výzkumu získávání těchto prvků z vody. Pakliže by byl zvažován vliv mimofúzní spotřeby, velkou výhodou olova je možnost ho nahradit pro většinu mimofúzních aplikací jinými prvky, což v případě berylia možno není.

Další výhodou olova je to, že kromě zde řešeného izotopu 208 obsahuje v přírodním stavu i další izotopy, konkrétně jich obsahuje 47,6 %. Pokud by tedy pro nefúzní aplikace byly využívány přednostně ostatní izotopy olova, přineslo by to z pohledu jaderné fúze další jeho úsporu, neboť při recyklaci surovin vždy dochází k jejich ztrátám, byť minimálním. Olovo také může být ve většině mimofúzních aplikací nahrazeno jinými prvky.

Z pohledu vydatnosti tak lze jednoznačně říci, že olovo je vhodnějším násobičem. Definici silné udržitelnosti nespĺňuje berylium ani v jednom ze scénářů, a to i při uvažování získávání z vody. Olovo naopak definici splňuje pro scénáře C a F již v případě zdrojů. V ostatních scénářích definici nespĺňuje ani při získávání z vody, jak již ovšem bylo zmíněno, oproti ostatním zde zkoumaným izotopům je výskyt olova v hydrosféře malý.

Míra spotřeby násobičů neutronů však závisí primárně na konstrukci reaktoru a dalších systémů fúzní elektrárny, proto, pokud by se podařilo snížit spotřebu násobičů kupříkladu na 1/10, stane se olovo ze zdrojů udržitelné pro všechny scénáře. Berylium z hydrosféry by se pak stalo udržitelné pro scénáře C a F.



Obrázek 16: Vydatnost zásob a zdrojů násobičů neutronů pro dva nejextrémnější scénáře

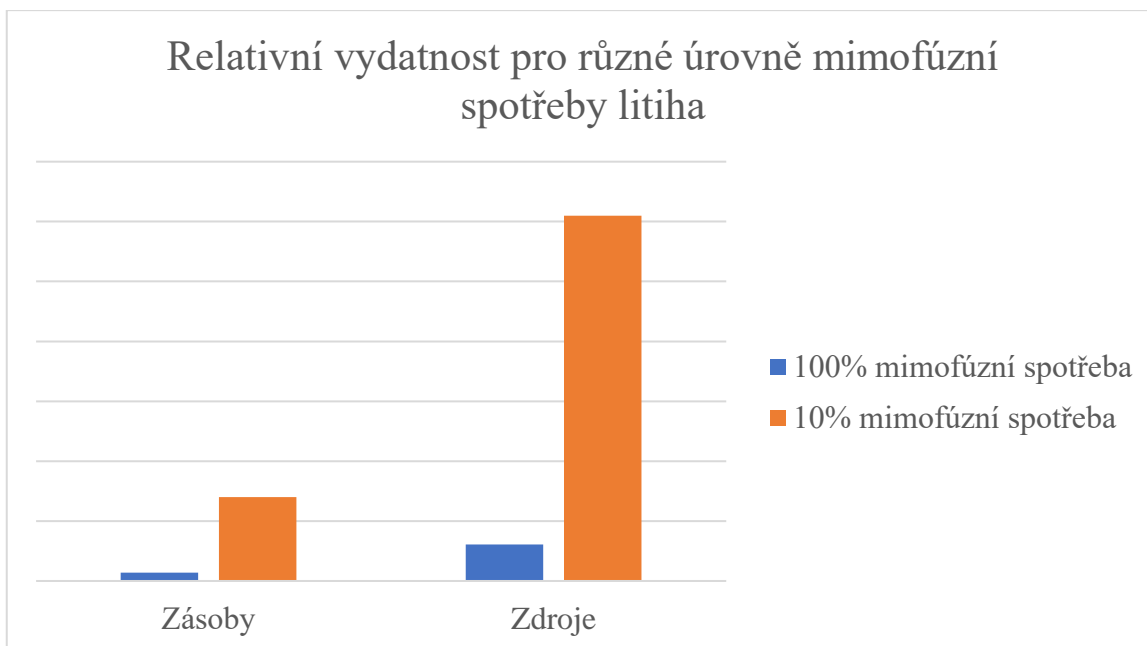
Diskuse - Paliva pro první generaci fúzních zařízení

V kategorii paliv pro první generaci fúzních jaderných zařízení představuje z pohledu vydatnosti hlavní limitující faktor lithium. Při volbě jakéhokoli scénáře a i v případě, že by mělo dojít na jeho získávání z vody a deuterium by mělo být získáváno pouze z vody těžké, je jeho vydatnost vždy menší. Toto je důvodem toho, proč je v této kapitole probíráno právě jen lithium.

Lithium má v současnosti vzhledem k velikosti svých zásob celkem velkou mimofúzní spotřebu. Je také predikováno (viz výše), že tato dále poroste, a to až do té míry, že by mohla teoreticky ohrozit dostupnost lithia pro fúzní energetiku. Lithium je typicky používáno pro akumulátory, v nich ovšem dochází pouze ke změně jeho chemické formy, fyzikální podstata zůstává zachována. Díky tomu mohou být akumulátory do značné míry recyklovány a lithium z nich použito znovu. Dále by po zvládnutí obohacování bylo možné pro akumulátory využívat pouze lithia ochuzeného a obohacené lithium uchovávat pro pozdější fúzní použití. Lithium také může být v řadě mimofúzních aplikací nahrazeno jinými prvky.

Porovnání relativní vydatnosti pro případ s recyklací a bez je provedeno v grafu na obrázku 17. V tomto je započítáno pouze mimofúzní použití lithia a má ukázat, jak důležitá recyklace lithia vzhledem k omezenosti jeho zásob a zdrojů je. Pokud bude v blízké době využito neuvážlivě, může to mít za následek zbytečný nárůst jeho ceny pro pozdější fúzní použití. Jak již však bylo stanoveno, v ceně obohaceného lithia hraje cena vstupní suroviny spíše menší roli. Mimofúzní spotřeba deuteria je zanedbatelná a jeho dostupnost pro fúzní energetiku by i vzhledem k vydatnosti jeho zdrojů neměla ohrozit. Na rozdíl od lithia je však používáno i ve fyzikálních procesech.

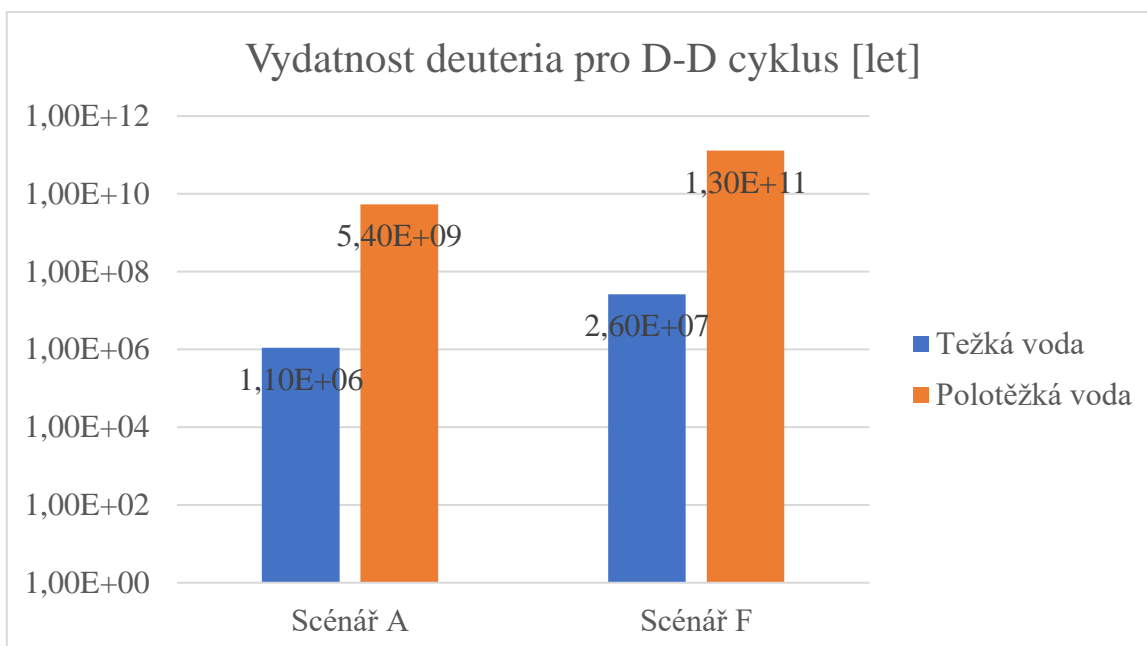
Pro případ získávání z vody je možno lithium nazvat silně udržitelným bez ohledu na zvolený scénář. Naopak, jeho zásoby a zdroje bez ohledu na zvolený scénář silně udržitelné nejsou. V případě D-T cyklu je pak deuterium silně udržitelné a to i v případě jeho získávání pouze z těžké vody. Tato udržitelnost opět nezávidí na scénáři.



Obrázek 17: Srovnání vydatnosti lithia pro různé úrovně mimofúzní spotřeby

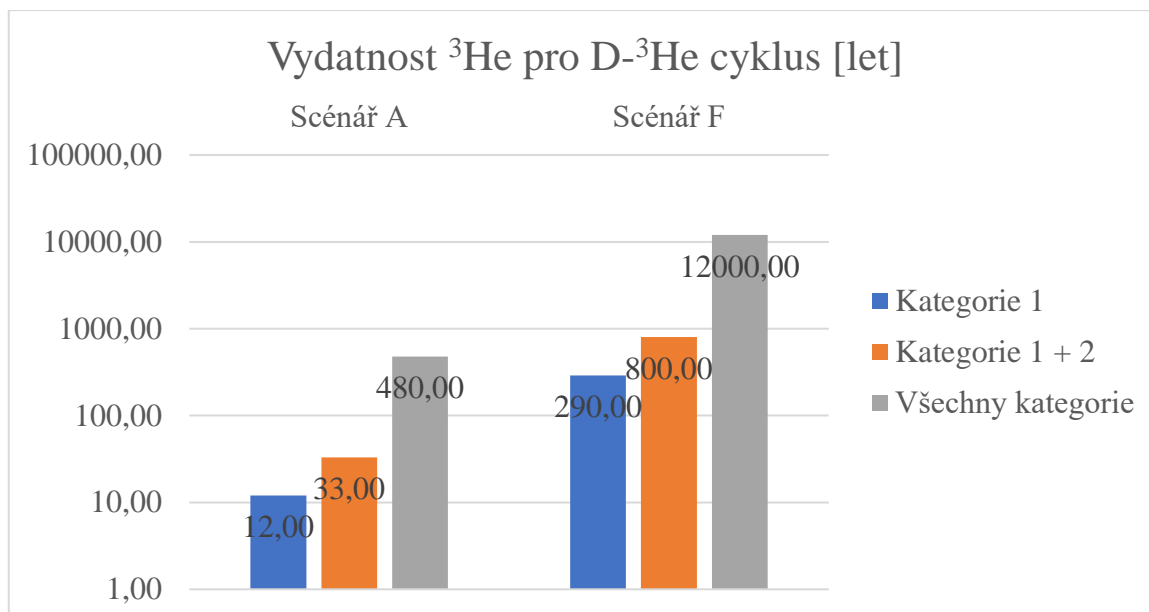
Diskuse - Paliva pro druhou generaci fúzních zařízení

V prvním z palivových cyklů druhé generace fúzních zařízení, D-D cyklu, figuruje pouze deuterium. Jeho vydatnost pro extrémní scénáře je znázorněna na obrázku 18.



Obrázek 18: Srovnání vydatnosti deuteria pro různé scénáře a zdroje pro D-D cyklus

Jak již bylo poznamenáno, mimofúzní spotřeba deuteria je zanedbatelná a jeho dostupnost pro fúzní energetiku tak prakticky neohrožuje. Deuterium používané pro D-D cyklus splňuje definici silné udržitelnosti bez ohledu na zvolený scénář. Tuto definici navíc splňuje i tehdy, pokud bude extrahováno jen z těžké vody, což je zdroj sice méně vydatný, proces extrakce deuteria z ní je však pravděpodobně levnější (proces extrakce z polotěžké vody doposud nebyl řádně prozkoumán).



Obrázek 19: Srovnání vydatnosti pro různé scénáře a zdroje ^3He pro D- ^3He cyklus

Dalším z uvažovaných palivových cyklů pro druhou generaci fúzních zařízení je D- ^3He cyklus. Stejně jako u D-T cyklu není ani pro tento limitujícím faktorem deuterium, ale druhý z izotopů. Vydatnost jeho jednotlivých zdrojů shrnuje obrázek 19. Jak bylo uvedeno v předchozí části této práce, ročně na Měsíc dopadne cca 63 kg ^3He . Vzhledem k jeho vypočtené spotřebě nelze tento přírůstek považovat za dostatečný.

Na rozdíl od ostatních zvažovaných paliv je současná a i predikovaná spotřeba ^3He pro mimofúzní aplikace nulová. Nehrozí tak, že by z tohoto důvodu rostla jeho cena. Vzhledem k vydatnosti ^3He nelze označit D- ^3He cyklus za silně udržitelný, neboť nesplňuje definici při uvažování ani jednoho ze scénářů. Otázkou ovšem zůstává, jak by toto ovlivnilo získávání ^3He z nějakých jiných zdrojů, jako je například sluneční vítr a jiné. Analýza těchto variant však přesahuje rozsah této práce, jejich technická realizovatelnost v blízké době je navíc dle autora této práce diskutabilní.

Diskuse - Paliva pro třetí generaci fúzních zařízení

Pro třetí generaci fúzních zařízení uvažuje tato práce pouze jeden cyklus, tím je H- ^{11}B . Stejně jako v předchozích případech je i ze limitujícím palivem to, které není primárně získáváno z moře, tím je bor. O něm především pojednává tato kapitola.

Vzhledem k velikosti zásob a zdrojů není fúzní použití boru v podstatě ohroženo nefúzním; většina pozemského boru je navíc tvořena pro fúzní aplikace vhodným ^{11}B . Stejně jako u lithia je jeho mimofúzní využití především chemické. Toto je možno případně snížit pomocí zvýšení míry recyklace, která je v současnosti vzhledem k dostupnosti boru celkem nízká; případně použitím náhražek. Z fyzikálních je možno zmínit například využívání ^{10}B jako absorbátoru neutronů.

Pro scénáře C a F je možno nazvat zdroje boru silně udržitelnými. Pakliže by došlo na jeho extrakci z hydrosféry, je možné nazvat bor silně udržitelným palivem pro všechny zvažované scénáře. Pro vodík je uvažována hydrosféra jako jediný zdroj, tato je však silně udržitelná pro každý scénář. Vzhledem k velikosti zásob pak zůstává toto adjektivum platné i v případě využívání vodíku pro nějaký další fyzikální účel, a to i v případě, pokud by jeho spotřeba byla srovnatelná se spotřebou fúzní energetiky pro scénář A. Otázkou pak zůstává vliv aplikace magnetohydrodynamického generování. Pokud by však toto zvýšilo čistou účinnost elektrárny kupříkladu na 50 %, budou zdroje boru silně udržitelné i pro scénář E a zásoby boru budou silně udržitelné pro scénář F.

Závěr

Byla vypočtena vydatnost pro jednotlivé palivové cykly, paliva, či násobiče neutronů a scénáře spotřeby. Dále byly pro některé případy nastíněny metody jak tyto prodloužit. Následně bylo rozhodnuto, zda je možno jednotlivé cykly považovat za silně udržitelné. Z pohledu paliv je v případě extrakce lithia z hydrosféry D-T cyklus udržitelný vždy, z pohledu násobičů však jen v případě užití olova ze zdrojů a scénáře C a F. Jak však bylo popsáno, v případě snížení jeho fúzní spotřeby může být udržitelné pro všechny scénáře. D-D cyklus je udržitelný vždy, a to i v případě extrakce D pouze z těžké vody. D-³He cyklus není kvůli ³He silně udržitelným v žádném případě. H-¹¹B je v případě extrakce B z hydrosféry silně udržitelný vždy. Z pohledu vydatnosti se pak ze všech cyklů jako nejlepší jeví D-D cyklus, na druhém místě je pak H-¹¹B cyklus.

Při výpočtech byla zvažována čistá účinnost fúzních elektráren, 29,3 %. Je však možné, že tato bude u pokročilých cyklů vyšší, což by mělo za následek zvýšení vydatnosti, toto bylo popsáno pro případ boru.

5.4. Vliv palivových cyklů na cenu budoucích fúzních elektráren

Tato kapitola se zabývá tím, jaký vliv bude mít zvolený palivový cyklus na cenu budoucích fúzních jaderných elektráren. K tomu jsou využity údaje získané v předchozích kapitolách a již několikrát použitý model fúzní jaderné elektrárny z dokumentu [57]. Ten sice předpokládá užití D-T cyklu, pro tento účel bude opět extrapolován i pro ostatní zde zvažované cykly.

Metodologie

Použitý model elektrárny udává i cenu každého ze systému elektrárny. Dále byla prozkoumána každá z položek a bylo vyhodnoceno, zda nějak závisí na zvoleném palivovém cyklu. Takto mohla být pro H-¹¹B vypuštěna budova tritiového hospodářství, její cena je součástí položky stavba. Model dále do ceny elektrárny nezahrnuje cenu za první stěnu, blanket a divertor, neboť tyto jsou zahrnuty do ceny elektřiny, respektive do ceny pravidelně vyměňovaných komponent.

Jak již bylo zmíněno, každá z reakcí má jinou ideální teplotu a vyžaduje jinou magnetickou indukci. Na základě této informace je možno soudit, že zvolenou reakcí jsou přímo ovlivněny čtyři systémy: magnetický systém, systém ohřevů, řídicí systém a diagnostický systém. Ty je pak možno rozdělit dle toho, zda jsou jejich parametry ovlivněny spíše teplotou plazmatu (to je případ systému ohřevů a diagnostického systému), či spíše magnetickým polem (to je případ magnetického systému a řídicího systému). U všech čtyř systému následně musela být provedena extrapolace jejich ceny pro jiné než D-T reakce.

Autor této práce velmi hrubě odhaduje, že jejich cena závisí lineárně na velikosti s nimi spojené veličiny. Jednotlivé koeficienty pro extrapolaci jsou obsaženy v tabulkách 8 a 9 ve sloupci Poměrná velikost k D-T. Extrapolace byla provedena dle vztahu (13). V tomto k_{er} značí extrapoláční koeficient ze zmíněných tabulek, C_A cenu pro D-T cyklus a C_{Br} cenu po extrapolaci. Další hrubým odhadem je, že se cena ostatních komponent v závislosti na zvolené reakci nemění. Taktéž není uvažována možnost technologického rozvoje a z něj plynoucí změny nákladů, případně změny ve finančním sektoru apod.

Součet ceny všech komponent tvoří přímé náklady na výstavbu elektrárny, a to jsou takové náklady, které lze přiřadit ke konkrétním výrobkům či službám [62]. K těmto se dále přičtou nepřímé náklady, které již nelze přiřadit ke konkrétním výrobkům či službám, jsou však také nezbytnými [62]. Jejich výše byla odvozena od výše přímých nákladů, a to tak, aby jejich poměrná velikost byla stejná jako v modelovém případě, což je možno vyjádřit vztahem (14), kde C_{3r} je výše známé částky pro počítaný cyklus, C_{4r} je výše neznámé částky pro počítaný cyklus, C_1 je cena stejné položky jako C_{3r} pro D-T cyklus a C_2 je cena stejné položky jako C_{4r} pro D-T cyklus. Další položkou je rozpočtová rezerva – její výše byla odvozena podobným způsobem. Tyto položky společně tvoří celkové náklady na výstavbu. Po dobu jejího trvání však již vznikají náklady spojené s financování výstavby. Tyto byly opět vypočteny z celkových nákladů na výstavbu obdobným způsobem, jako v předchozích případech. Jejich přičtením k nákladům na výstavbu lze pak získat celkovou výši investice.

$$C_{Br} = C_A * k_{er} \quad (13)$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{C_{4r}}{C_{3r}} \quad (14)$$

Výsledky

Upravené náklady na výstavbu modelové fúzní jaderné elektrárny s D-T cyklem jsou obsaženy v tabulce 36 [57]. Tato také obsahuje získané náklady na výstavbu elektráren s ostatními zvažovanými cykly.

Cena [M\$]	D-T	D-D	D- ³ He	H- ¹¹ B
Stavba	1142,11	1142,11	1142,11	1127,03
Jaderné komponenty	138,09	138,09	138,09	138,09
Magnetický systém	2475,57	17824,10	14110,75	42827,36
Systém ohřevů	479,42	4794,20	4075,07	40750,70
Vakuový systém	47,68	47,68	47,68	47,68
Řídicí systém	212,77	1531,94	1212,79	3680,92
Chlazení	388,47	388,47	388,47	388,47
Úprava paliva	360,69	360,69	360,69	360,69
Diagnostický systém	181,95	1819,50	1546,58	15465,75
Dálková údržba	363,90	363,90	363,90	363,90
Turbinový ostrov	388,95	388,95	388,95	388,95
Elektrická část	58,79	58,79	58,79	58,79
Ostatní zařízení	26,83	26,83	26,83	26,83
Kryogenní systém	103,86	103,86	103,86	103,86
Přímé náklady	6369,08	28989,12	23964,55	105729,02
Nepřímé náklady	1787,16	8134,33	6724,44	29667,51
Rozpočtová rezerva	1223,43	5568,51	4603,34	20309,45
Cena výstavby	9379,67	42691,96	35292,34	155705,98
Náklady na financování	1406,96	6403,82	5293,87	23355,98
Celková investice	10786,63	49095,77	40586,20	179061,95

Tabulka 36: Náklady na výstavbu jednotlivých fúzních elektráren [57]

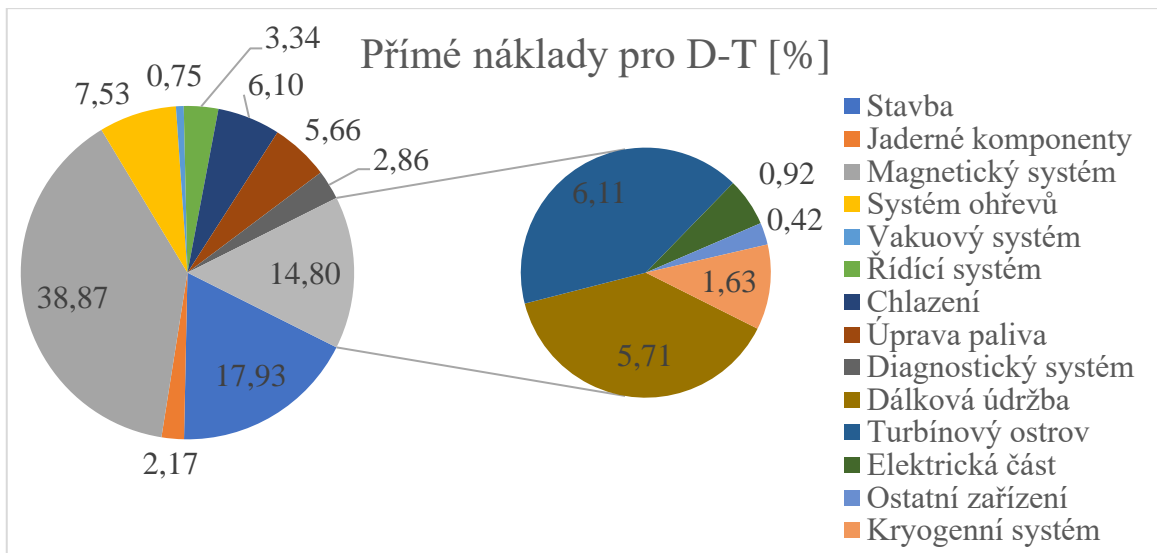
Diskuse

Nejprve bude provedena diskuse rozložení nákladů na výstavbu D-T fúzní elektrárny. Tyto jsou pro přehlednost zobrazeny v grafu na obrázku 20. Graf ale nepokrývá náklady na financování, nepřímé náklady a rozpočtovou rezervu, zobrazuje pouze přímé náklady. Jak je patrné, celých 63 % těchto nákladů je tvořeno komponenty přímo spojenými s plazmatem či palivem.

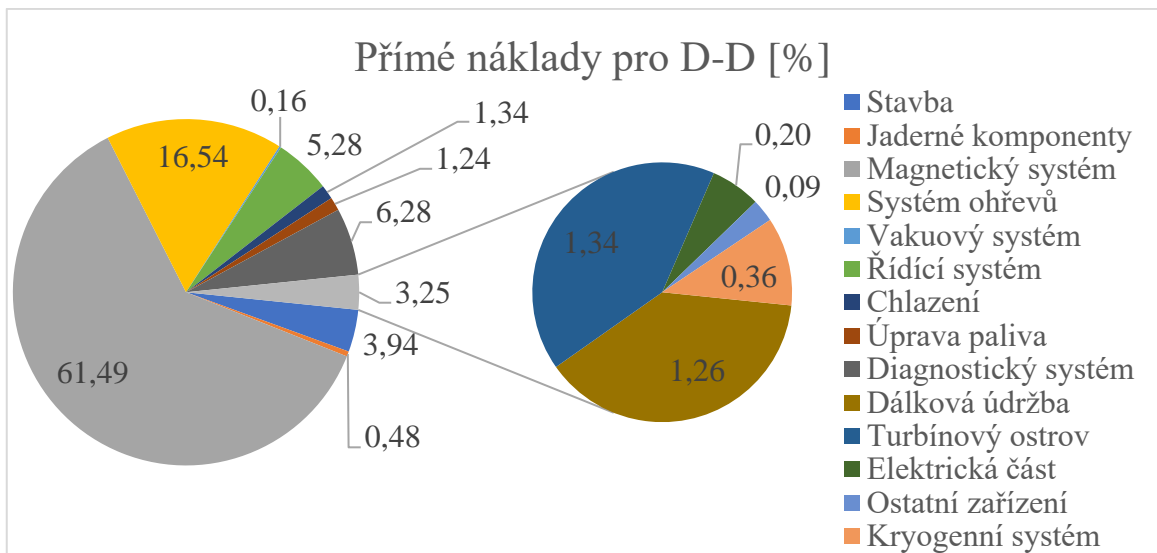
Dále je možné vyhodnotit rozložení nákladů na výstavbu elektráren s dalšími palivovými cykly. Tyto jsou pro D-D cyklus zobrazeny v grafu na obrázku 21, pro D-³He cyklus v grafu na obrázku 22 a pro H-¹¹B cyklus v grafu na obrázku 23. Stejně jako v předchozím případě zobrazují pouze přímé náklady. Pro elektrárnu s D-D cyklem tvoří náklady na komponenty přímo spojené s plazmatem či palivem celých 92 % přímých nákladů. Toto je spojeno především se změnou parametrů plazmatu a z toho plynoucím nárůstem ceny magnetických systémů a systémů ohřevů. Jejich srovnání s ostatními cykly je řešeno dále.

Pro elektrárnu s D-³He cyklem tvoří náklady na komponenty přímo související s plazmatem či palivem celých 89 % přímých nákladů. Důvody tohoto jsou stejné jako v předchozím případě.

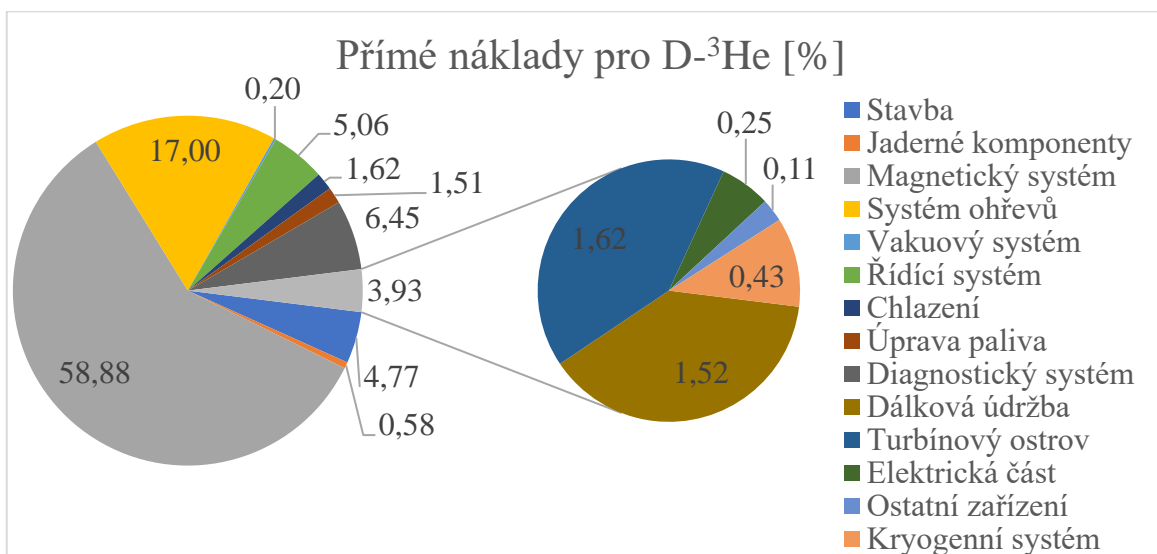
Pro elektrárnu s H-¹¹B cyklem tvoří náklady na komponenty přímo spojené s plazmatem či palivem celých 99 % přímých nákladů, a to také kvůli vyššímu vlivu ceny systému ohřevů.



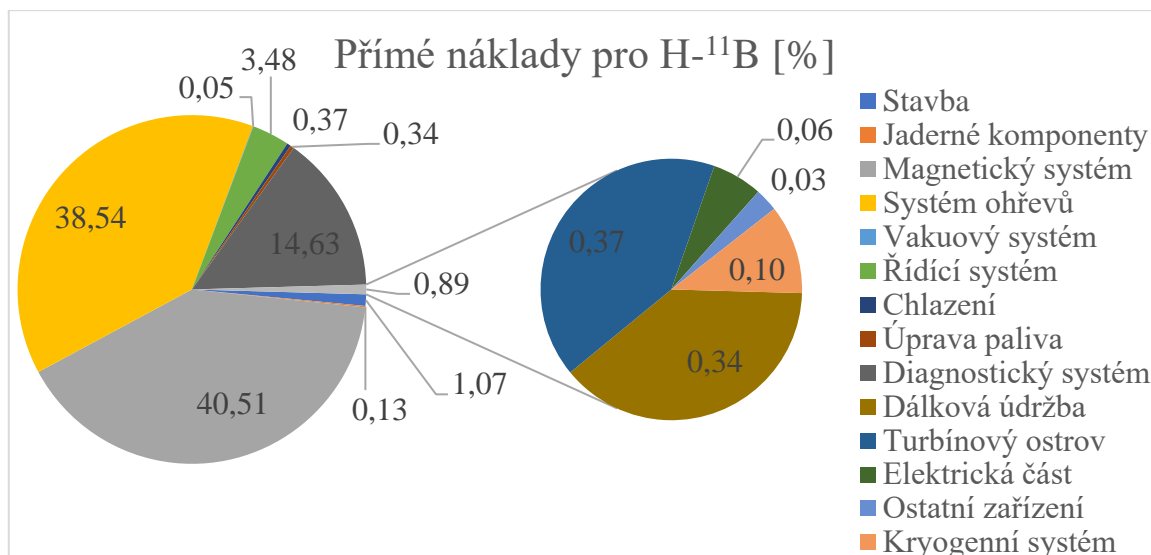
Obrázek 20: Poměrné zastoupení jednotlivých složek přímých nákladů pro D-T elektrárnu, převzato ([57])



Obrázek 21: Poměrné zastoupení jednotlivých složek přímých nákladů pro D-D elektrárnu



Obrázek 22: Poměrné zastoupení jednotlivých složek přímých nákladů pro D-³He elektrárnu

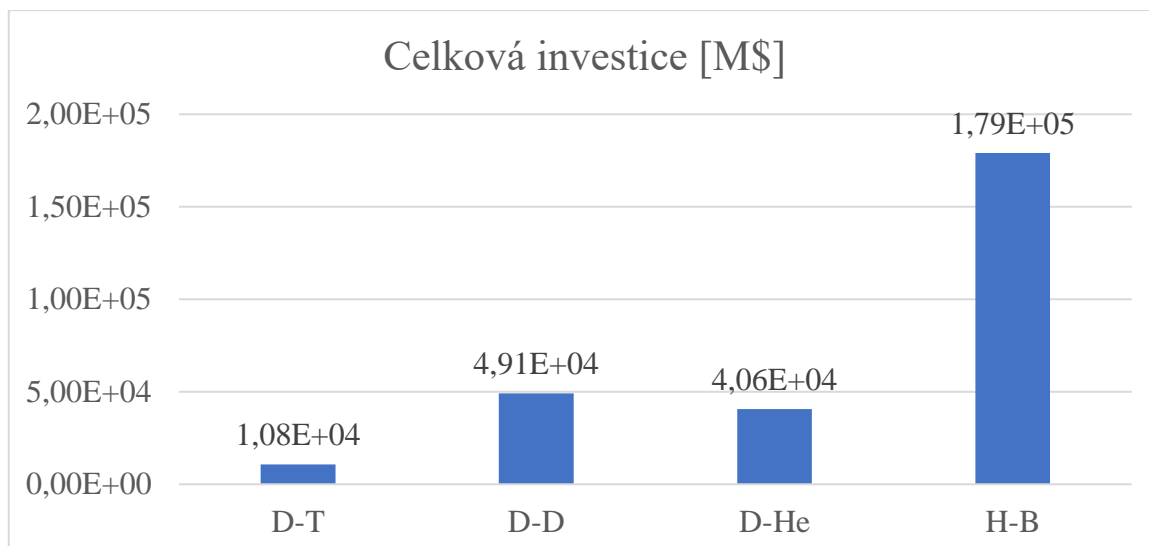


Obrázek 23: Poměrné zastoupení jednotlivých složek přímých nákladů pro H-¹¹B elektrárnu

Z doposud diskutovaných dat zřetelně vystupuje trend růstu poměrného zastoupení nákladů na komponenty přímo spojené s plazmatem a palivem společně s růstem parametrů plazmatu. Tyto především jsou způsobeny za nárůst cen elektráren pracujících s reakcemi vyžadujícími vyšší parametry plazmatu. Většina ostatních položek, snad kromě diagnostického systému, má cenu zřetelně nižší, či neměnnou, v případě nepřímých nákladů a rozpočtových rezerv přímo navázanou na přímé náklady a v případě nákladů na financování pak přímo navázanou na cenu výstavby. Cenu jednotlivých elektráren porovnává obrázek 24.

Veškeré zde zmiňované ceny se mohou v budoucnu pravděpodobně snížit (myšleno bez započítání inflace), a to především díky rozvoji technologií, postupnému růstu zkušeností s výrobou jednotlivých komponent a postupnému růstu zkušeností s výstavbou fúzních elektráren. Díky tomu také může poklesnout míra nejistoty při stanovování těchto nákladů. Účelem této části práce je však primárně porovnat jednotlivé palivové cykly a určit rozložení přímých nákladů.

Růst poměrného zastoupení doposud nepříliš používaných technologií v přímých nákladech pro vyšší generace fúzních zařízení je možno brát jako pozitivní informaci, neboť šance, že poklesne cena již osvědčených technologií je dle autora této práce daleko nižší, než u těch doposud ne příliš známých; potenciální pokles přímých nákladů pro kupříkladu H-¹¹B reakci tak může být teoreticky velmi významný. Samozřejmě, že pokud došlo k zmiňovanému poklesu ceny daných komponent, zůstávají D-T elektrárny stále nejlevnějšími ze všech probíraných variant. Otázkou zůstává případné využití magnetohydrodynamického generování elektřiny u zařízení třetí generace, její zodpovězení by přesahovalo rozsah této práce.



Obrázek 24: Porovnání výše celkové investice pro fúzní elektrárny s různými palivovými cykly

Závěr

Byly vypočteny náklady na výstavbu budoucích fúzních jaderných elektráren pro jednotlivé palivové cykly. Dále bylo učiněno jejich vzájemné porovnání a porovnání nákladů na jejich jednotlivé komponenty. Vzhledem k předpokládaným obdobím jejich výstavby je však vysoce pravděpodobné, že náklady na některé, ne-li všechny komponenty mohou být díky rozvoji technologií a zkušeností s fúzní energetikou sníženy. Autor této práce očekává pokles především u komponent tvořící majoritu ceny elektráren vyšších generací, jako je například magnetický systém a systém ohřevů. Dle [7] může již při výstavbě desáté elektrárny dosahovat tento pokles až 40 %. Otázkou pak zůstává správnost odhadů a extrapolací provedených v této kapitole, jakožto i budoucí dostupnost materiálů pro výrobu jednotlivých komponent a z ní odvozený vývoj cen. Odhad zásob těchto materiálů však přesahuje rozsah této práce. Slabá udržitelnost takovýchto zařízení pak nemůže být vyhodnocena bez znalostí ceny jimi produkované elektřiny.

5.5. Náklady na palivo budoucích fúzních elektráren

Jak již plyne z jejího názvu, hlavním cílem této kapitoly je analýza nákladů na paliva a násobiče neutronů budoucích fúzních elektráren. Tyto náklady by současně měly být vztaženy k elektrické práci vyvedené z elektrárny neboli spojené s čistým výkonem elektrárny. V této kapitole bude jako jednotka elektrické práce využívána Wh a její násobky, neboť tato je často používaná pro údaje spojené s výrobou elektřiny a bude vhodná i pro další výpočty a pro porovnávání s dalšími zdroji. Pro výpočet je použita již zmíněná modelová elektrárna s čistou účinností 29,3 %.

Metodologie

Pro výpočet nákladů na palivo vztažených na 1 kWh byl použit vztah (15), ve kterém veličiny c značí relativní cenu, konkrétně c_{mi} značí cenu za kilogram příslušného izotopu a c_{eir} značí náklady na palivo/násobič neutronů na 1 kWh pro příslušný izotop a palivový cyklus. Pro některé izotopy je známa střední cena, pro jiné maximální a minimální. Tento vzorec je také možno využít pro výpočet hodnoty fúzních produktů vznikajících při výrobě. Celkové náklady pro jednotlivé palivové cykly c_{jr} pak lze získat pomocí vztahu (16).

$$c_{eir} = \frac{M_{dir} c_{mi} * 1000}{P_{ec} * 24} \quad (15)$$

$$c_{jr} = \sum_{vstup} c_{eir} \quad (16)$$

Výsledky

Byly vypočteny palivové náklady pro jednotlivé izotopy a palivové cykly na 1 kWh elektrické energie vyvedené z elektrárny. Tyto náklady byly také vypočteny pro násobiče neutronů. Jsou zaneseny v tabulce 37. Dále byla vypočtena celkové palivové náklady pro každý palivový cyklus a násobič neutronů, tyto jsou zaneseny v tabulce 38.

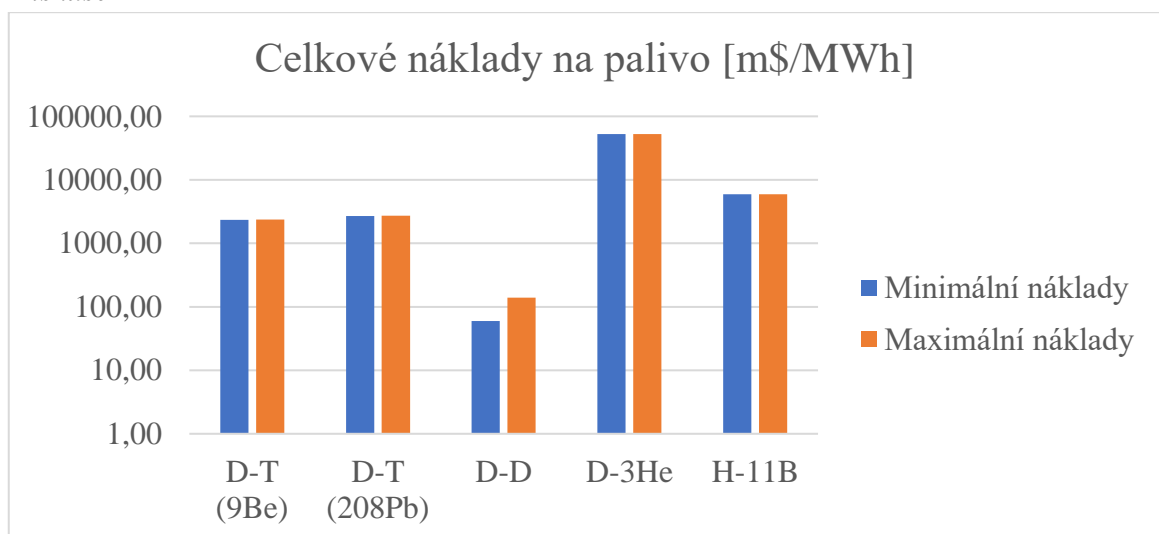
Cyklus	Izotop	Min. ceir [\$/MWh]	Stř. ceir [\$/MWh]	Max. ceir [\$/MWh]
D-T	D	$1,83 * 10^{-2}$	-	$4,47 * 10^{-2}$
	${}^6\text{Li}$	-	$2,33 * 10^0$	-
	${}^9\text{Be}$	$2,20 * 10^{-3}$	-	$4,36 * 10^{-2}$
	${}^{208}\text{Pb}$	$3,33 * 10^{-1}$	-	$3,39 * 10^{-1}$
D-D	D	$5,71 * 10^{-2}$	-	$1,39 * 10^{-1}$
D- ${}^3\text{He}$	D	$2,24 * 10^{-2}$	-	$5,47 * 10^{-2}$
	${}^3\text{He}$	-	$5,25 * 10^1$	-
H- ${}^{11}\text{B}$	H	$4,09 * 10^{-5}$	-	$1,11 * 10^{-4}$
	${}^{11}\text{B}$	-	$5,94 * 10^0$	-

Tabulka 37: Palivové náklady pro jednotlivé izotopy a palivové cykly

Cyklus	Min. c _{jr} [\$/MWh]	Max. c _{jr} [\$/MWh]
D-T (${}^9\text{Be}$)	$2,35 * 10^0$	$2,38 * 10^0$
D-T (${}^{208}\text{Pb}$)	$2,68 * 10^0$	$2,71 * 10^0$
D-D	$5,71 * 10^{-2}$	$1,39 * 10^{-1}$
D- ${}^3\text{He}$	$5,25 * 10^1$	$5,26 * 10^1$
H- ${}^{11}\text{B}$	$5,94 * 10^0$	$5,94 * 10^0$

Tabulka 38: Celková bilance nákladů na paliva a násobiče neutronů na 1 kWh pro jednotlivé palivové cykly

Diskuse



Obrázek 25: Srovnání celkových nákladů na palivo pro jednotlivé palivové cykly

Bilance celkových nákladů na palivo a případně násobiče neutronů je shrnuta v grafu na obrázku 25. Pro přehlednost jsou v něm ceny udávány v m\$/MWh a ne v \$/MWh, jako v ostatních případech. Jak je patrné, nejnižší náklady má D-D cyklus. V případě D-T cyklu jsou tyto tvořeny převážně cenou lithia, v případě D-³He cenou ³He a v případě H-¹¹B cenou boru. U deuteria jsou započteny náklady pouze při jeho extrakci z těžké vody. Vzhledem k velikosti zásob pak existuje jistá pravděpodobnost, že cena lithia a olova poroste, z toho plyne i nárůst nákladů na D-T cyklus. U ³He je pak možný pokles jeho ceny díky lepšímu zvládnutí cest do vesmíru. U H-¹¹B pak může pokles nákladů přinést použití magnetohydrodynamického generování. Pokud by toto způsobilo nárůst čisté účinnosti na 50 %, poklesly by v případě tohoto cyklu náklady na palivo o 42 %.

Závěr

Byly vypočteny palivové náklady pro jednotlivé izotopy a palivové cykly na 1 kWh elektrické energie vyvedené z elektrárny. Tyto pak byly sečteny pro jednotlivé palivové cykly a ty byly mezi sebou porovnány. Následně bylo provedeno několik predikcí jejich možných změn. Z pohledu této kapitoly se jako nejlepší jeví palivový cyklus D-D. Vliv ceny paliva na cenu vyrobené elektřiny je projednán dále.

5.6. Vliv palivových cyklů na cenu elektřiny vyrobené budoucími fúzními elektrárnami

Účelem této kapitoly je výpočet ceny elektrické energie pocházející z budoucích fúzních jaderných elektráren. K tomu budou využity především data získaná v předchozích částech této práce, jakožto i již dříve používaná modelová elektrárna [62]. Jednotlivé složky ceny elektrické energie v ní vyrobené jsou zapsány v tabulce 39. Položka cena komponent, která, jak již bylo zmíněno, obsahuje i náklady na první stěnu, blanket a divertor, je rozepsána v tabulce 40. Do této je také zahrnuta cena za přehřev paliva, neb tato je navázána na množství spotřebovaného paliva.

Položka	Cena [\$/MWh]
Kapitálová investice	112,19
Provoz a údržba	11,90
„Jaderný účet“	0,95
Cena komponent	32,18
Celková cena	157,22

Tabulka 39: Složky ceny elektrické energie

Položka	Cena [\$/MWh]
Blanket a první stěna	22,65
Divertor	5,01
Přehřev	1,48
Materiál paliva	2,36
Uložení odpadu	0,68
Cena komponent	32,18

Tabulka 40: Složky ceny komponent

Metodologie

Jednotlivé složky ceny elektřiny jsou závislé na různých okolnostech. Autor této práce hrubě odhaduje, že kapitálová investice je lineárně závislá na celkové investici dle vztahu (14) a provoz a údržba na výkonu. Částka odváděná na jaderný účet je fixní, respektive, roční objem financí na něj odvedený závisí přímo na množství vyrobené elektřiny. Cena blanketu a první stěny nezávisí na použitém palivu, respektive je možné ji ponížít o náklady na násobič neutronů; náklady na divertor jsou pak přímo závislé na teplotě plazmatu dle vztahu (14). Cena za přehřev závisí na množství spotřebovaného paliva. Model předpokládá beryliový násobič, proto je nutné upravit cenu blanketu i pro D-T variantu s Pb násobičem. Náklady na materiál paliva byly vypočteny v předchozí kapitole. Náklady na uložení paliva jsou pak také fixní. Pokud jsou užity hodnoty z předchozí kapitoly, je použita jejich průměrná hodnota.

Výsledky

Cyklus	D-T (^9Be)	D-T (^{208}Pb)	D-D	D- ^3He	H- ^{11}B
Blanket a první stěna [\$/MWh]	22,65	22,98	20,29	20,29	20,29
Divertor [\$/MWh]	5,01	5,01	50,10	42,59	425,85
Přehřev [\$/MWh]	1,48	1,48	1,16	1,13	5,68
Materiál paliva [\$/MWh]	2,36	2,69	0,10	52,56	5,93
Uložení odpadu [\$/MWh]	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Cena komponent [\$/MWh]	32,18	32,84	72,32	117,25	458,43

Tabulka 41: Jednotlivé položky ceny komponent pro jednotlivé palivové cykly

Byly vypočteny jednotlivé složky ceny komponent pro všechny palivové cykly, jsou obsaženy v tabulce 41. Dále byly vypočteny jednotlivé složky ceny elektrické energie, ty jsou zaneseny v tabulce 42.

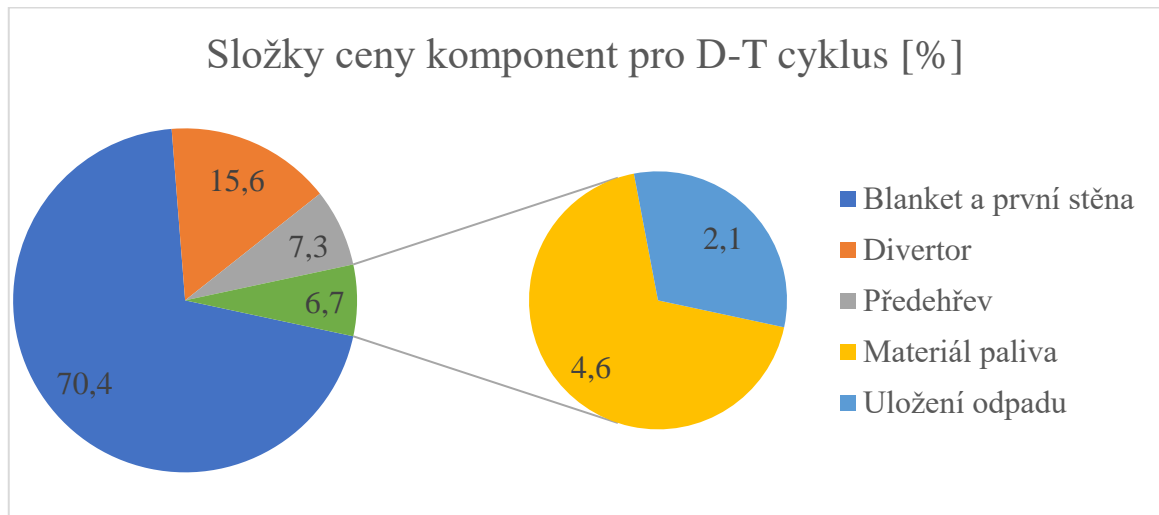
Cyklus	D-T (^9Be)	D-T (^{208}Pb)	D-D	D- ^3He	H- ^{11}B
Kapitálová investice [\$/MWh]	112,19	112,19	510,64	422,13	1862,40
Provoz a údržba [\$/MWh]	11,90	11,90	11,90	11,90	11,90
Jaderný účet [\$/MWh]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Cena komponent [\$/MWh]	32,18	32,84	72,32	117,25	458,43
Celková cena [\$/MWh]	157,22	157,88	595,81	552,23	2333,67

Tabulka 42: Jednotlivé položky ceny elektrické energie pro jednotlivé palivové cykly

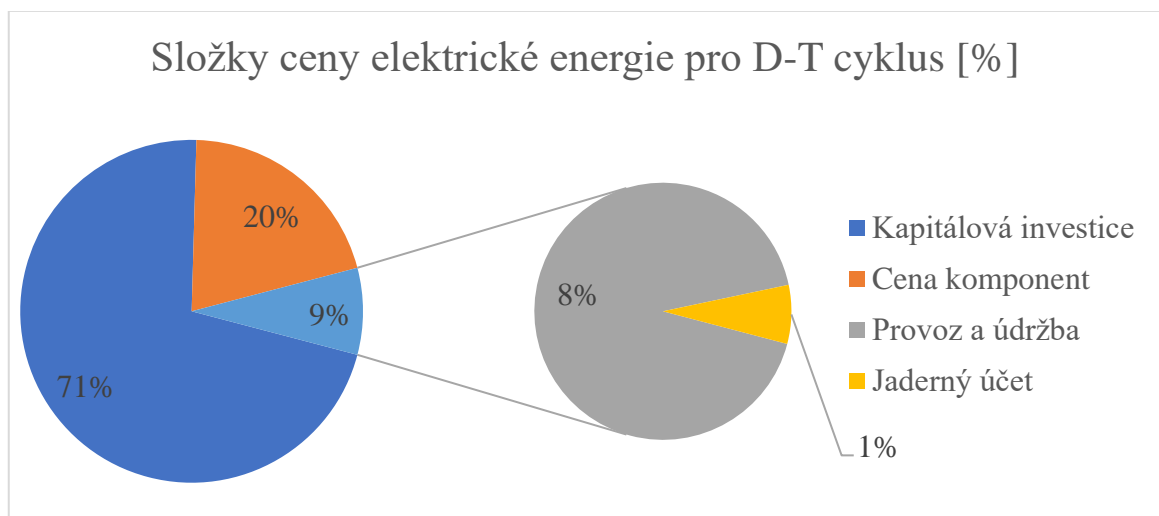
Diskuse

Nejprve je uveden obrázek s grafickým znázorněním rozložení ceny elektrické energie pro upravený referenční model. To na zajišťují obrázky 26 a 27. Jak je patrné, majoritu nákladů na položku komponent tvoří cena blanketu a divertoru, cena samotného materiálu násobiče neutronů zde tvoří 7,3 % ceny této položky bez ohledu na použitý násobič. V tomto případě pak tvoří samotný materiál paliva pouze 7,3 % celkové ceny položky komponent. Většinu ceny elektrické energie představuje kapitálová investice, komponenty tvoří 20,47 %.

Kapitálová investice závisí přímo na ceně elektrárny, tato a možnosti jejího snížení byly probrány v dřívějších kapitolách. Částka určená pro jaderný účet je nezměnitelná. Cena za provoz a údržbu může být v budoucnu teoreticky snížena, a to na základě provozních zkušeností. Cena za blanket, první stěnu, divertor a předeřev mohou být díky rozvoji technologií a zkušeností s fúzní energetikou také poníženy. Naopak u ceny za samotný materiál paliva lze na základě předchozích kapitol očekávat nárůst.

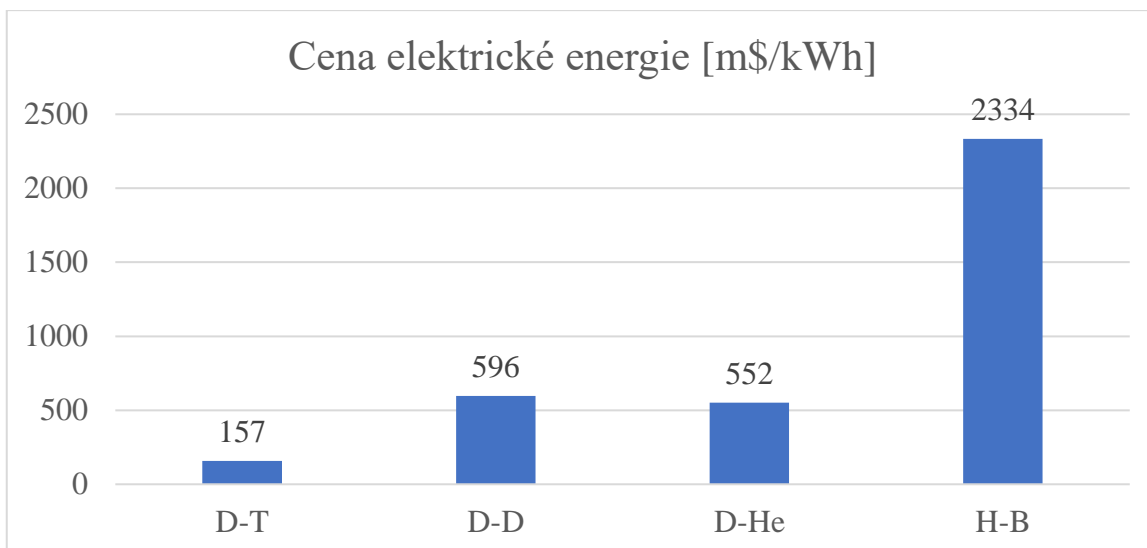


Obrázek 26: Složky ceny paliva pro D-T reakci

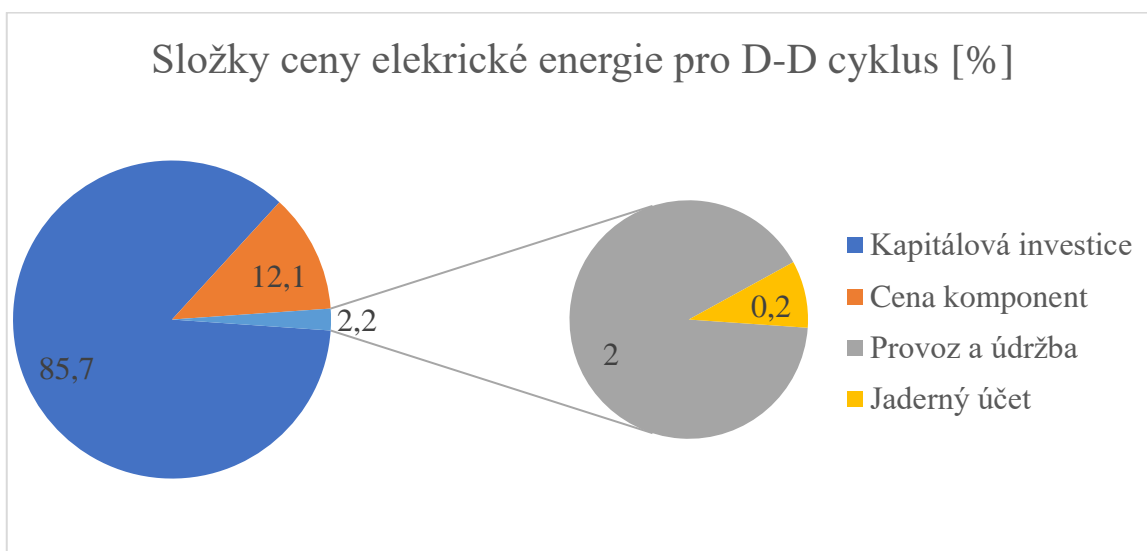


Obrázek 27: Složky ceny elektrické energie pro D-T reakci

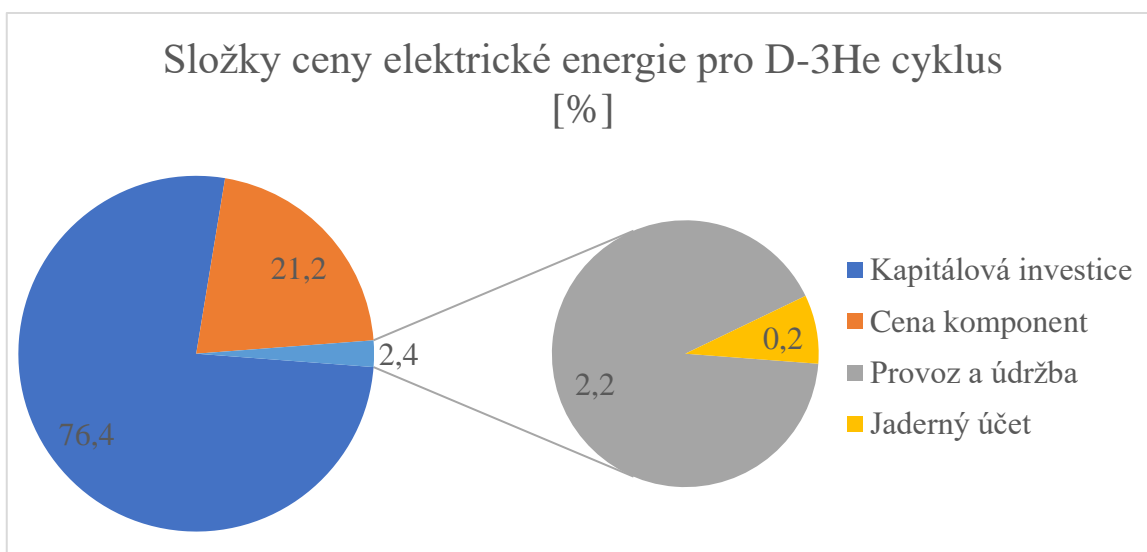
Dále je možno zkoumat výsledky pro ostatní palivové cykly. Srovnání nákladů na elektrickou energii pro jednotlivé cykly je provedeno v grafu na obrázku 28. Jak je zřejmé, náklady s každou generací fúzních zařízení rostou. Pro analýzu možnosti jejich snížení je třeba porovnat zastoupení jejich jednotlivých složek. Toto je provedeno na obrázcích 29, 30 a 31. Jak je patrné, u všech cyklů tvoří majoritu ceny elektrické energie náklady na kapitálové investice. Možnosti jejich snížení již byly popsány v předchozích kapitolách. Další nezanedbatelnou položku tvoří cena komponent. Nejnižší zastoupení má u D-D cyklu, což jej z tohoto pohledu činí nejvýhodnějším. Pro hlubší analýzu ceny komponent je však nutno porovnat zastoupení jeho jednotlivých složek. Toto je provedeno na obrázcích 32, 33 a 34.



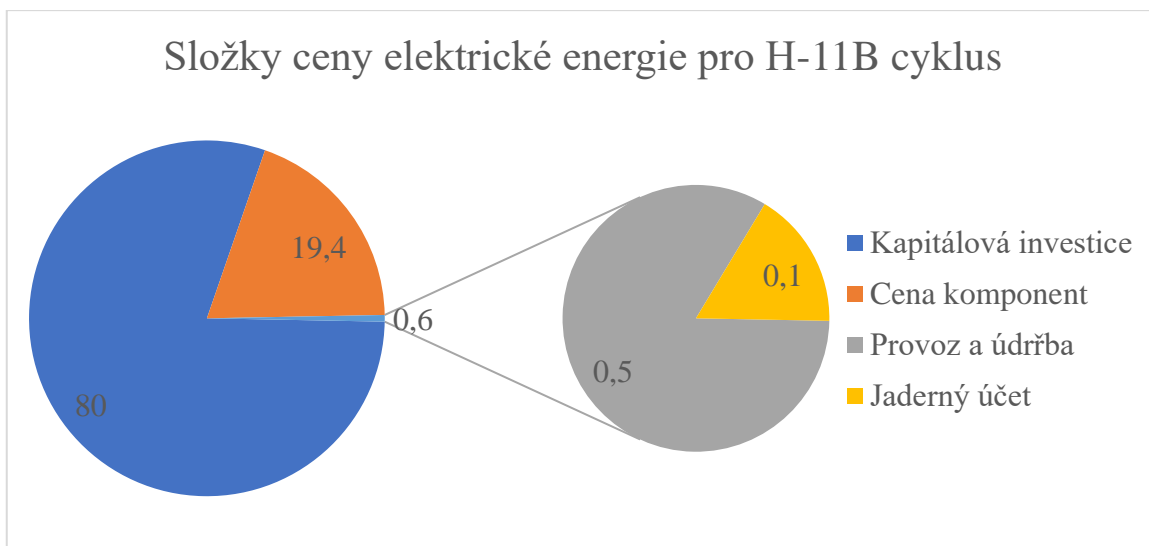
Obrázek 28: Cena elektrické energie pro fúzní elektrárny s jednotlivými palivovými cykly



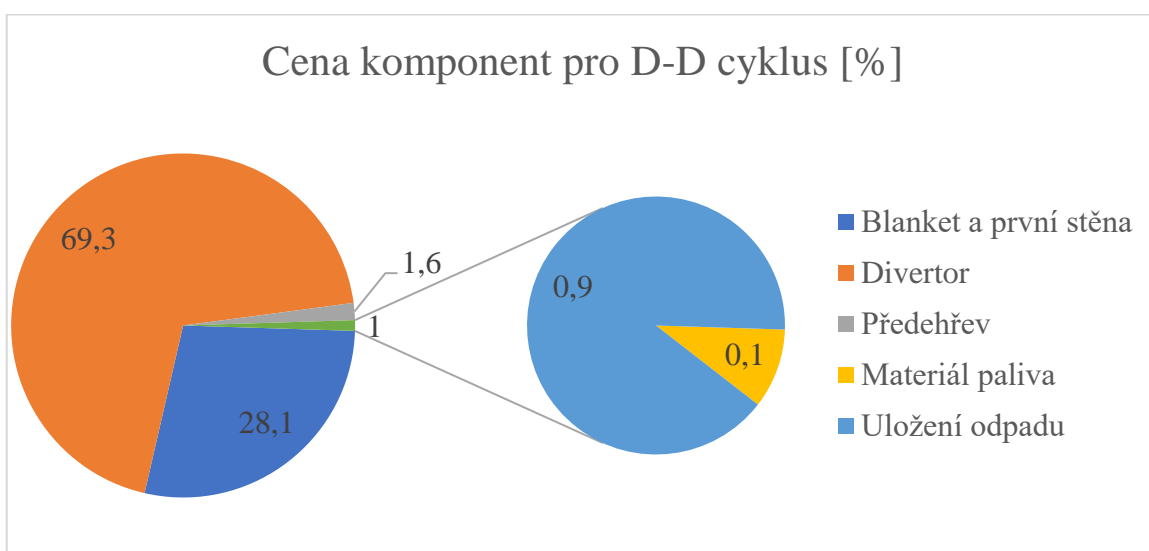
Obrázek 29: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny elektriny pro D-D cyklus



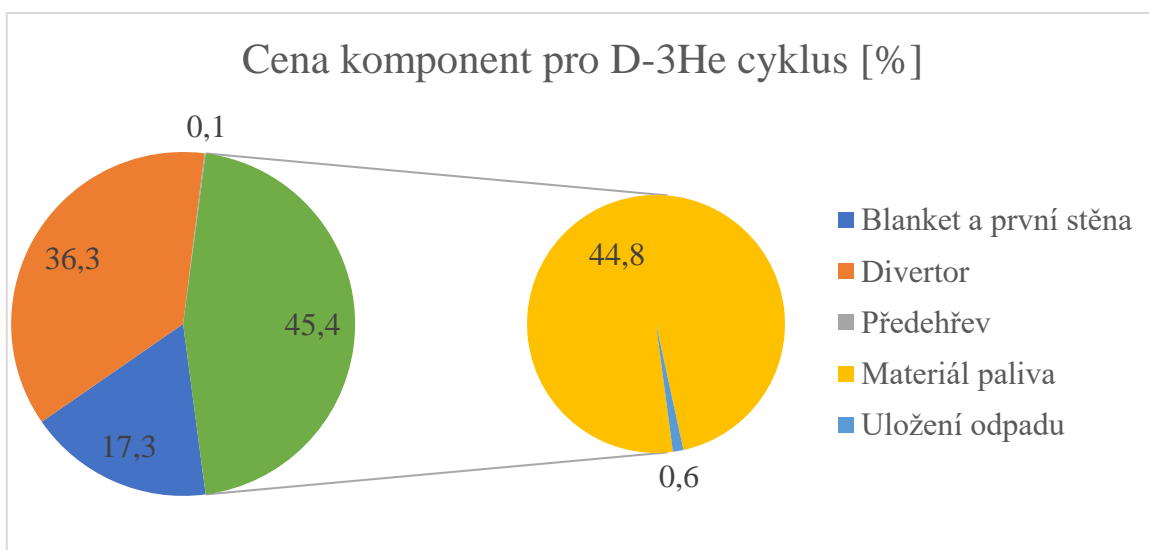
Obrázek 30: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny elektriny pro D-³He cyklus



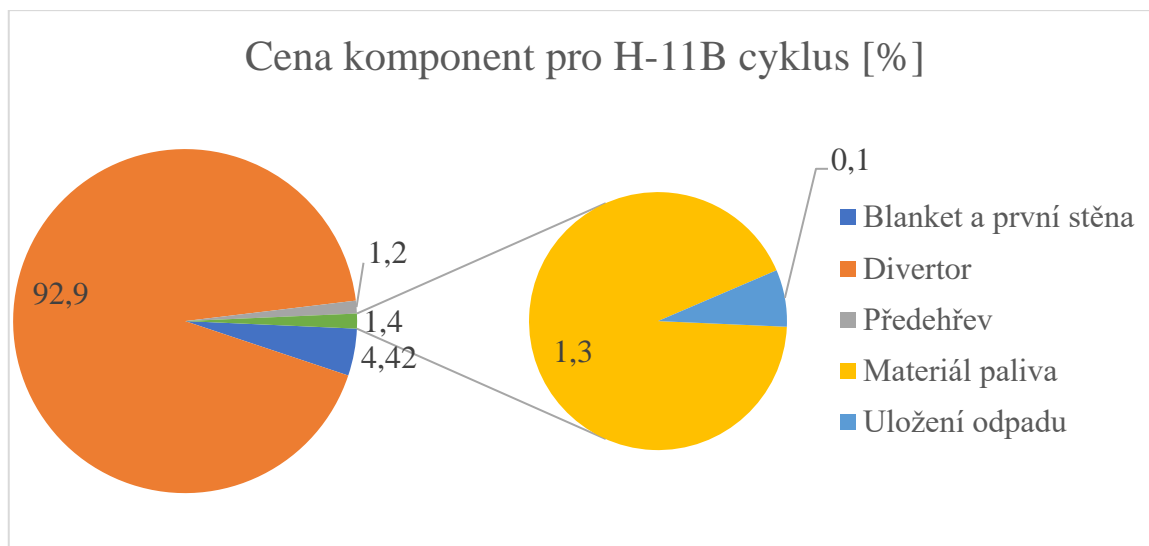
Obrázek 31: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny elektřiny pro H-¹¹B cyklus



Obrázek 32: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny komponent pro D-D cyklus



Obrázek 33: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny komponent pro D-³He cyklus



Obrázek 34: Poměrné zastoupení jednotlivých položek ceny komponent pro H-¹¹B cyklus

Jak je patrné z grafů, s každou generací klesá poměrné zastoupení ceny blanketu a první stěny a naopak roste zastoupení divertoru. Toto je především způsobeno růstem teploty plazmatu, k ceně blanketu pak u D-T reakce navíc přispívá cena násobiče neutronů. Vzhledem k růstu poměrné ceny divertoru také klesá poměrné zastoupení ostatních položek. Jak již bylo poznamenáno u ostatních fúzních technologií, náklady na blanket, první stěnu a divertor mohou být s růstem zkušeností sníženy. Proto je důležité se zaměřit primárně na zastoupení ceny samotného paliva, u kterého autor této práce v některých případech naopak očekává růst. Z tohoto srovnání opět nejlépe vychází D-D cyklus, neboť u něj je zastoupení ceny paliva nejnižší a zároveň nelze očekávat přílišný nárůst jeho ceny, jelikož, kromě jiného, je jeho mimofúzní využití zanedbatelné. Jistou anomálií tvoří vysokým zastoupením ceny paliva D-³He cyklus. Toto u něj také způsobuje vyšší zastoupení ceny komponent

Závěr

Byly vypočítány ceny elektrické energie pro jednotlivé palivové cykly budoucích fúzních jaderných elektráren. Dále byly studovány jejich jednotlivé složky. Nakonec byly tyto ceny srovnány. Ze srovnání vyplývá, že cena elektrické energie vyrobené pomocí D-T reakce je ze všech nejnižší a že z hlediska ceny elektrické energie se jako lepší násobič neutronů jeví berylium. Zároveň je však možno odhadovat, že díky rozvoji technologií a zkušeností s fúzní energetikou má D-D reakce nejvyšší šanci na to stát se z pohledu ceny elektrické energie nejvýhodnějším palivovým cyklem. Otázkou zůstává vliv případné realizace magnetohydrodynamického generování pro H-¹¹B cyklus, ta by kromě ceny elektrické energie změnila i investiční náklady na celou elektrárnu. Podrobnější rozbor této problematiky by však přesahoval rozsah této práce. Vyhodnocení slabé udržitelnosti fúzní energetiky i se znalostí těchto cen není možné, neboť v současné době nejsou známy konkrétní socioekonomické podmínky případného využívání fúzní energie. Jisté přiblížení však bude možné po jejím porovnání s ostatními zdroji energie

5.7. Vliv palivových cyklů na environmentální následky budoucích fúzních elektráren

Environmentální následky spojené s jednotlivými palivy a násobiči neutronů, především tedy spojené s jejich těžbou, fabrikací, obohacováním atd. byly popsány v předchozí části práce. Pro všechny izotopy je tak hlavní problematikou energetická náročnost těchto procesů a s ní spojené emise. U některých dalších, jako je například olovo, berylium, lithium či ^3He je dále problémem spotřeba vody, vznik strusky, úniky, znečištění, emise atd. Mnoho z těchto problémů lze kromě případu ^3He řešit jejich extrakcí z vody, u tohoto postupu přetrvává v podstatě jen problém energetické náročnosti. V případě ^3He je pak hlavním problémem uspokojivé vyřešení dopravy ze Země na Měsíc a zpět.

Odpovědí na otázku energetické náročnosti a sní spojených emisí je vysoké zastoupení fúzní energetiky v PEZ, z tohoto pohledu nejlepší variantou jsou výše zmíněné scénáře A či D, případně B či E spojené s výrobou zbývajících PEZ pomocí obnovitelných zdrojů energie. Tímto by měl být problém emisí v podstatě vyřešen. Pokud by však například u lithia, berylia apod. nemělo z jakéhokoli důvodu docházet k jejich extrakci z hydrosféry, jeví se autorovi této práce jako nejlepší D-D palivový cyklus, neboť jeho palivo je spojeno právě jen s energetickou náročností získávání, a navíc již nepotřebuje násobič neutronů. Vliv jeho úbytku v lokalitě extrakce je navíc z environmentálního pohledu zanedbatelný [7].

Jak již bylo zmíněno, výslednými produkty jednotlivých zkoumaných reakcí jsou jen ^4He a H. Tyto nelze považovat za odpad, jejich potenciální využití již bylo popsáno. Problematika environmentálních následků spojených s ostatními surovinami, využívanými a vznikajícími v budoucích fúzních elektrárnách pak přesahuje rozsah této práce.

5.8. Shrnutí

V této kapitole byly vyhodnoceny některé s palivovými cykly spojené aspekty budoucích fúzních elektráren. Dále bylo určeno, který z palivových cyklů z pohledu každého aspektu působí jako nejvýhodnější.

Nejprve byla vyhodnocena denní spotřeba jednotlivých paliv, z tohoto pohledu se jako nejlepší jeví D- ^3He cyklus. Následně byla vyhodnocena denní spotřeba násobičů neutronů, z tohoto pohledu se jako nejlepší násobič neutronů jeví ^9Be . Dále byla vyhodnocena vydatnost jednotlivých palivových cyklů, z tohoto pohledu se jako nejvýhodnější cyklus zdá D-D. Byly také stanoveny způsoby, jak jednotlivé vydatnosti prodloužit. Rovněž byla dokázána oprávněnost označení fúzní energetiky jako silně udržitelné. Poté byly vyhodnoceny investiční náklady na fúzní elektrárny v závislosti na použitém palivovém cyklu, z tohoto pohledu se jako nejlepší jeví D-T cyklus; byly také popsány možnosti snížení těchto nákladů. Následně byly stanoveny náklady na paliva jako taková pro jednotlivé cykly, z tohoto pohledu se nejpříznivěji jeví D-D cyklus, byly také popsány možnosti snížení těchto nákladů. Poté byly určeny ceny elektrické energie při použití jednotlivých cyklů, zde jako nejvýhodnější vychází z analýzy D-T cyklus, ovšem díky technologickému vývoji se může D-D cyklus stát výhodnějším. Jako poslední byly vyhodnoceny environmentální následky spojené s užitím jednotlivých palivových cyklů. Tento úkon ukázal na výhodnost D-D cyklu.

Pokud by měl být při shrnutí všech v této kapitole získaných informací vybrán nejvýhodnější palivový cyklus, byl by to D-D cyklus.

6. Srovnání fúzní energetiky s vybranými zdroji energie

Účelem této kapitoly je porovnat některé aspekty budoucích fúzních elektráren spojené s palivovými cykly, vyhodnocené v předchozí kapitole, s dalšími vybranými zdroji elektrické energie. Pro srovnání bude sloužit modelová fúzní elektrárna využitá v minulé kapitole a poměřována bude s elektrárnami o stejném čistém elektrickém výkonu. Srovnání bude provedeno pro elektrárny jaderné, plynové, uhelné, slunečné, větrné pevninské a větrné mořské. Pro uhelné elektrárny se za směrodatnou bere hodnota zprůměrovaná ze spotřeb jak hnědo- tak černouhelných elektráren, pro jaderné elektrárny průměrná elektrárna s tlakovodním reaktorem.

6.1. Denní spotřeba paliva

Toto srovnání neuvažuje obnovitelné zdroje energie. Denní spotřeb paliva je zde řešena pro elektrárny o čistém elektrickém výkonu 953,1 MW, tuto shrnuje tabulka 43 [63a], [64]. Pro jadernou elektrárnu je zde udáváno množství obohaceného uranu vstupujícího do reaktoru. Pro přepočítání jednotek bylo použito nástroje [65]. Zdroj [63a] udává spotřebu uhlí a zemního plynu na 1 kWh elektřiny, tato je 0,51 kg/kWh pro uhlí a 0,14 kg/kWh pro plyn. Elektrárna o čistém el. výkonu 953,1 MW pak denně vyrobí $23 \cdot 10^6$ kWh elektřiny. Hustota zemního plynu byla získána pomocí [63c], tato činí $0,712 \text{ kg/m}^3$. Zdroj [64] udává spotřebu pro jadernou elektrárnu o čistém elektrickém výkonu 1000 MW, tuto je nutné přepočíst pro uvažovaný čistý el. výkon 953,1 MW.

Ze srovnání vyplývá, že průměrná spotřeba paliva fúzní elektrárny je nejnižší ze všech (vyjma srovnání jaderné elektrárny a $\text{H-}^{11}\text{B}$ elektrárny). Nejbližší realizaci je ze všech cyklů pravděpodobně D-T cyklus, proto bude porovnán tento. Jeho spotřeba je podobná jako u uranu. V jeho případě se na jednu reakci uvolní sice více energie, hmotnost jednoho jádra však několika násobně převyšuje součet hmotnosti jádra lithia a deuteria. Plynová elektrárna pak svou spotřebou převyšuje D-T elektrárnu a 6 řádů, uhelná dokonce o sedm. U fosilních elektráren samozřejmě záleží na účinnosti konkrétní elektrárny a na kvalitě spalovaného paliva.

Zdroj	Spotřeba [kg/den]
Uhelná elektrárna	$1,17 \cdot 10^7$
Plynová elektrárna	$3,22 \cdot 10^6$
Jaderná elektrárna	$6,52 \cdot 10^1$
D-T	$1,05 \cdot 10^0$
D-D	$8,16 \cdot 10^{-1}$
D- ^3He	$8,01 \cdot 10^{-1}$
H- ^{11}B	$4,01 \cdot 10^0$

Tabulka 43: Denní spotřeba paliva jednotlivých elektráren [63a], [64]

6.2. Vydatnost

Tato kapitola se opět nezabývá obnovitelnými zdroji energie, neboť vyhodnocuje pouze budoucí dostupnost paliv a ne surovin pro výrobu elektráren. Pro fosilní paliva uvažuje hodnoty [66a]. Tyto uvažují současné zastoupení daných paliv v PEZ a jejich množství lidstvu známé v roce 2015. Toto je v současnosti pravděpodobně o něco vyšší. Jejich zastoupení v PEZ je pak přibližně stejné (kolem 20 %). V roce 2015 byla celková velikost PEZ přibližně 581 EJ [66b]. V tomto výpočtu jsou uvažována pouze fosilní paliva pocházejících z v současné době těžitelných ložisek. Uvažování i dalších ložisek považuje autor za bezpředmětné, neb v budoucnu očekává odklon od spalování fosilních paliv.

Pro fúzní paliva je zde uvažováno PEZ taktéž 581 EJ a zastoupení v nich 20 %. Uváděné hodnoty platí pro extrakci z moře. Tabulka neuvažuje násobiče neutronů, neb jejich spotřeba se může měnit. Pro každý z palivových cyklů udává vydatnost limitujícího izotopu. Pro daný scénář je však vydatnost olova $1,9 \cdot 10^6$ let. Pokud by bylo uvažováno deuterium jen z těžké vody, bude jeho vydatnost $8,3 \cdot 10^6$ let. V tabulce je však uvažována extrakce i z polotěžké vody.

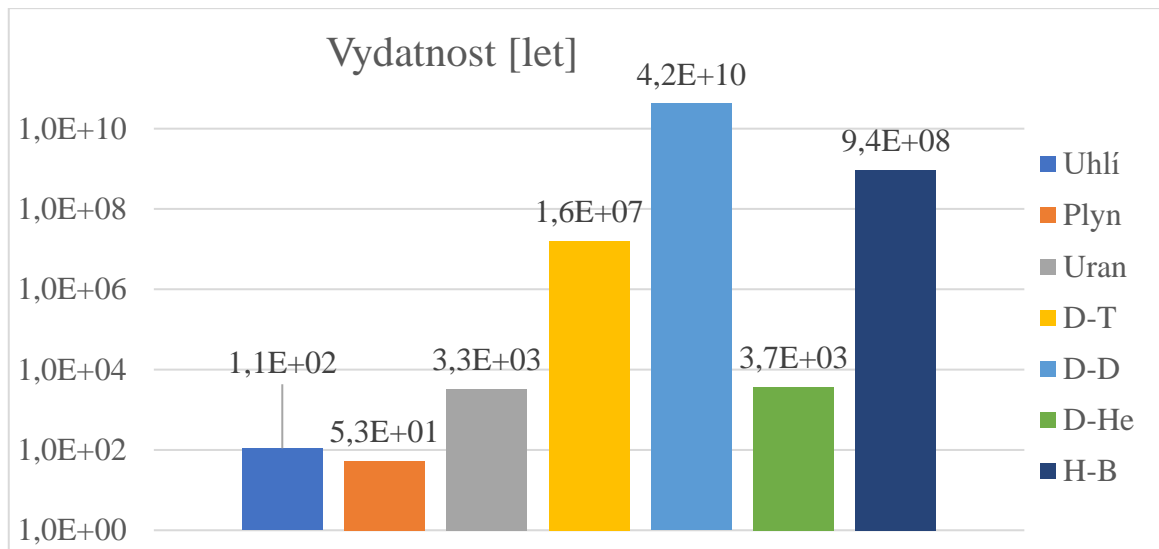
Jako již v předchozí kapitole, autor uvažuje množství obohaceného uranu vstupujícího do reaktoru. V moři se nachází 0,28 Gt uranu, v pozemských zdrojích pak 0,02 Gt. [67]. V přechodí kapitole byla vypočtena průměrná spotřeba uranu v elektrárně o čistém el. výkonu 953,1 MW. Pro výpočet vydatnosti uranu je tak možno použít podobných vztahů jako v případě fúzní energetiky. Pro uran je uvažován sejný scénář jako pro fúzní paliva (PEZ = 581 EJ, zastoupení 20 %).

Jak je patrné, ze všech nefúzních zdrojů má největší vydatnost uran, tato je podobná jako v případě D-³He cyklu. Ostatní fúzní cykly však jeho vydatnost převyšují nejméně o 4 řády (v případě uvažování i násobičů neutronů převyšuje D-T s Pb násobičem pouze o 3 řády, v případě uvažování extrakce D pouze z těžké vody převyšuje D-D také jen o 3 řády). D-D cyklus pak dokonce o 7 řádů.

Jak již bylo poznamenáno, pro fúzní paliva je sice uvažován obdobný scénář, započítány jsou však pouze těžitelná ložiska. Autor práce totiž předpokládá postupný útlum využívání fosilních paliv, takže nepředpokládá ani vytěžení těžitelných ložisek.

Zdroj	Vydatnost [let]
Uhlí	$1,1 \cdot 10^2$
Plyn	$5,3 \cdot 10^1$
Uran	$3,3 \cdot 10^3$
D-T	$1,6 \cdot 10^7$
D-D	$4,2 \cdot 10^{10}$
D- ³ He	$3,7 \cdot 10^3$
H- ¹¹ B	$9,4 \cdot 10^8$

Tabulka 44: Vydatnost pro jednotlivé zdroje energie



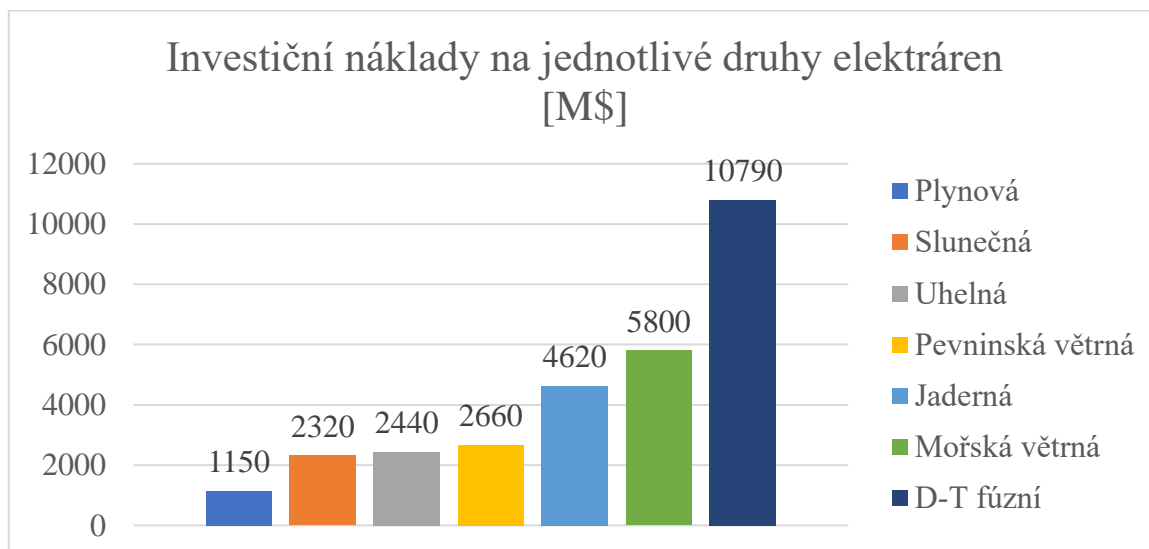
Obrázek 35: Porovnání vydatnosti pro jednotlivé zdroje energie

6.3. Cena elektrárny

Tato kapitola se zabývá i obnovitelnými zdroji energie a porovnává investiční náklady na vybrané typy elektráren. Jako zdroj využívá průměr údajů z [7] upravených na dnešní hodnotu [27]. U slunečních elektráren uvažuje pouze velké parky a kategorii fúzních elektráren představuje D-T elektrárna, neboť její cena se dá odhadnout nejpřesněji. Investiční náklady pro jednotlivé zdroje jsou obsaženy v tabulce 45 a dále jsou porovnány v grafu na obrázku 36. Je evidentní, že fúzní elektrárny jsou ze všech srovnávaných zřetelně nejdražší. Možnosti snížení nákladů na ně byly vyhodnoceny v předchozích částech. Tyto náklady také neuvažují životnost daných elektráren. Cena se vztahuje na elektrárny o čistém elektrickém výkonu 953,1 MW.

Elektrárna	Náklady [M\$]
Plynová	1 150
Slunečná	2 320
Uhelná	2 440
Pevninská větrná	2 660
Jaderná	4 620
Mořská větrná	5 800
D-T fúzní	10 790

Tabulka 45: Investiční náklady na jednotlivé druhy elektráren [7]



Obrázek 36: Srovnání investičních nákladů na jednotlivé druhy elektráren

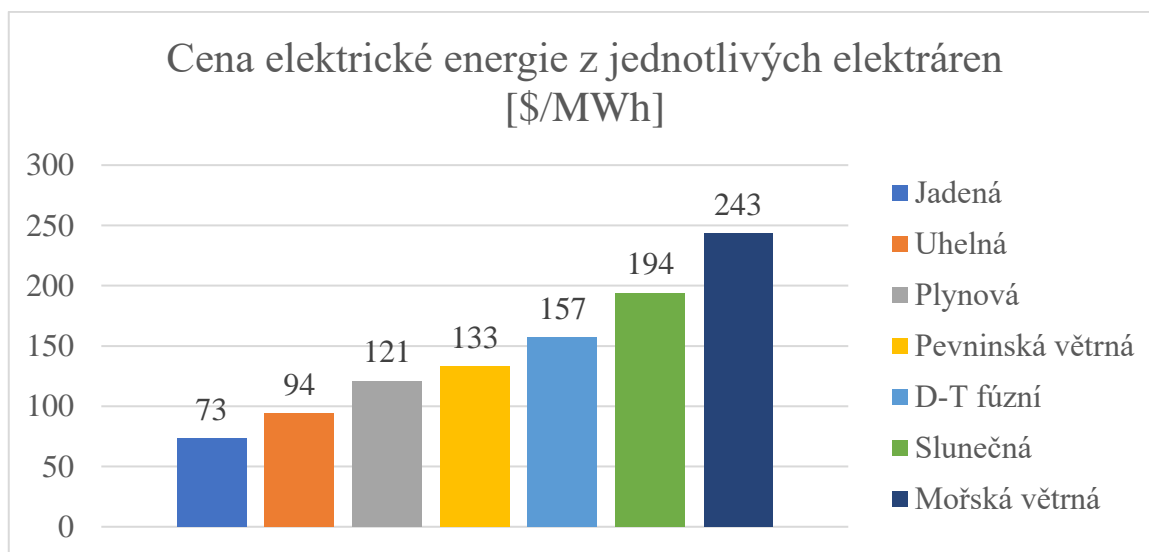
6.4. Cena elektřiny

V této kapitole budou porovnány ceny elektrické energie z jednotlivých zdrojů. Z fúzních reakcí bude uvažována pouze D-T reakce. K její implementaci do energetiky totiž dojde pravděpodobně nejdříve, tudíž pravděpodobnost, že se ceny elektrické energie v daný čas budou odpovídat těm současným, je nejvyšší. Ceny elektrické energie pro jednotlivé zdroje jsou obsaženy v tabulce 47 [7] [27] a znázorněny v grafu na obrázku 37.

Elektrárna	Cena elektrické energie [\$/MWh]
Jaderná	73
Uhelná	97
Plynová	121
Pevninská větrná	133
D-T fúzní	157
Slunečná	194
Mořská větrná	243

Tabulka 46: Cena elektrické energie z jednotlivých zdrojů [7]

Jak je patrné, fúze patří k spíše dražším zdrojům energie. Čísla obsažená v této tabulce však nejsou ovlivněna environmentálními vlivy jednotlivých zdrojů, které jsou například u fosilních značně velké, naopak u fúzní energetiky minimální. Pokud by byly započítány externí náklady, budou naopak fúzní elektrárny společně s těmi jadernými produkovat nejlevnější elektrickou energii [7]. V důsledku toho vyplývá možnost označit fúzní energetiku za slabě udržitelnou. Jak již bylo poznamenáno, v případě fosilních elektráren má na cenu energie velký vliv cena paliva, zůstává proto otázkou, jaký bude stav trhu, respektive cena fosilních paliv v čase, kdy bude fúzní energetika implementována. Podstatnou část této ceny u fúzních zdrojů navíc tvoří náklady na kapitálovou investici, které mohou být v budoucnu podstatně sníženy.



Obrázek 37: Srovnání ceny elektrické energie z jednotlivých zdrojů

6.5. Environmentální následky

Tato kapitola porovnává environmentální následky spojené s jednotlivými palivy uvažovanými v předchozích kapitolách. Pro fúzní paliva jsou nejproblematictějšími fázemi jejich těžba, úprava a obohacování. Těžba je často spojena s využitím síry a s vyšší spotřebou vody a energií, dále hrozí úniky těchto paliv a produkce strusky. Také dochází k lokálnímu znečištění a do jisté míry i devastaci krajiny. Úprav a obohacování jsou pak spojeny především opět se spotřebou energie, dále například s úniky rtuti.

Jistou výjimku tvoří ^3He , které je spojeno pouze s emisemi a znečištěním pramenicím s dopravou materiálů na Měsíc a zpět. Dále je výjimkou ^1H , které, pakliže je vyrobeno zelenou cestou, není spojeno s žádnými environmentálními následky, a deuterium, které je v současnosti spojeno pouze s energetickou náročností svého získávání a použitím síry, jejíž užití by však v budoucnu nutné být nemělo.

Samotné používání paliv ve fúzní elektrárně je z environmentálního hlediska bezproblémové, stejně jako produkty tohoto použití. Z pohledu radiační ochrany je využívání fúzních paliv také téměř bezproblémové. Některá paliva jsou ovšem toxická.

U uhlí je jeho použití spojeno především s vysokými emisemi CO_2 vznikajícími při jeho spalování. Tyto jsou navíc v některých zemích s nižšími požadavky na kvalitu ovzduší spojené s emisemi SO_x a NO_x . Dalším produktem je popílek, který následně může uvolňovat těžké kovy například do vodotečí. Těžba uhlí je spojena s poškozením a znečištěním krajiny, a to v míře vyšší než u ostatních zde uvažovaných zdrojů, a se ztrátami vody. Z hlediska radiační ochrany je pak spalování uhlí spojeno s emisemi radonu [13], [68].

Při spalování zemního plynu nevzniká popílek, stále však vzniká CO_2 či emise SO_x a NO_x , ačkoli v nižší míře než u uhlí. Jeho transport, a to často na dlouhé vzdálenosti, je však spojen s úniky skleníkových plynů, které jsou svými celkovými účinky srovnatelné s účinky emisí ze spalování uhlí. Jeho těžba je pak spojena s lokálním znečištěním a devastací krajiny. Pokud je navíc získáván pomocí frakování, dochází k velkým ztrátám vody a znečištění vodotečí [69].

Při používání uranu v jaderné elektrárně vzniká vysoce aktivní radioaktivní odpad. Toto je navíc spojeno s rizikem vzniku radiačních událostí. Těžba a úprava uranu je pak spojena se vznikem chemického znečištění (například kvůli použití síry), vznikem radioaktivních odpadů, energetickou náročností a do jisté míry i devastací krajiny [63b]. Jaderné elektrárny jsou také spojené s rizikem jaderných havárií, což kromě jiných nezanedbatelných důsledků, způsobuje nezanedbatelný odpor veřejnosti k této technologii.

Pokud mají být tedy jednotlivá paliva srovnána, velkou výhodou všech paliv pro fúzní elektrárny je to, že jejich samotné použití není spojeno s žádnými environmentálními dopady, respektive že produkty reakcí odehrávajících se ve fúzních elektrárnách jsou na rozdíl od ostatních pouze životnímu prostředí neškodné látky (vodík, helium). Pokud mají být srovnány přední části palivových cyklů, jsou problémy spojené se získáváním paliva pro fúzní energetiku z pravidla nižší než u ostatních typů. Například u D-D cyklu je pak do budoucna jediným problémem energetická získávání paliva, tuto lze z environmentálního pohledu řešit výrobou energie pomocí OZE či jaderné fúze. Mnoho problematických technologií pro přední části palivových cyklů fúzních elektráren je navíc teprve na počátku vývoje a jejich environmentální dopady by měly být do budoucna sníženy. Z pohledu radiační ochrany je pak možno považovat fúzní paliva na rozdíl od uhlí a uranu za bezproblémová.

Další z výhod fúzní energetiky je, že mnohá její paliva mají dostatečnou vydatnost na to, aby se stala jediným nebo alespoň majoritním pozemským zdrojem energie, což řeší energetickou náročnost získávání jejich paliv. Konečně, jak bylo dokázáno, fúzní energetika je jak měkce, tak tvrdě udržitelná, což není možno říci fosilní energetice. U jaderné energetiky je pak tento problém nedořešený.

Tato kapitola neřeší environmentální následky spojené s nepalivovými částmi jednotlivých zdrojů energie, neboť toto by přesahovalo rozsah této práce.

6.6. Shrnutí

Bylo provedeno srovnání některých aspektů palivových cyklů budoucích fúzních jaderných elektráren s dalšími vybranými zdroji energie. Většina srovnání ukazuje na výhodnost fúzní energetiky oproti ostatním zdrojům energie, ačkoli tato má patrné nedostatky zejména v oblasti ceny elektráren a ceny vyrobené elektrické energie. Tyto však mohou být v budoucnu sníženy. Také bylo dokázáno, že fúzní energetika je slabě udržitelná.

7. Závěr

V první části této práce byl popsán fyzikální princip fungování fúzní jaderné reakce, jeden ze způsobů její realizace v podmínkách panujících na Zemi a možnosti jejího energetického využití. Dále byly popsány jednotlivé součásti budoucích fúzních jaderných elektráren, a to především ty, které nejvíce souvisejí s jejím palivovým cyklem.

V další kapitole byl popsán minulý, současný a budoucí vývoj fúzní jaderné energetiky. Dále zmiňuje některé problémy, které v rámci tohoto procesu nastaly, jakožto i úkoly, které stojí před fúzní energetikou v současné době. Stejně jako celá práce, sleduje i tato část vývojovou linii ITER → DEMO.

V rámci první poloviny hlavní části této práce byla provedena rešerše čtyř hlavních palivových cyklů budoucích fúzních elektráren: D-T, D-D, D-³He a H-¹¹B; v jejím rámci byla prozkoumána většina procesů spojených s jednotlivými palivy a násobiči neutronů, od jejich těžby až po vstup do reaktoru, včetně odpadů, které při daných reakcích vznikají. V rámci toho byly představeny zdroje těchto paliv, jejich zásoby, cena a environmentální následky všech s nimi spojených procesů. Dále byly stanoveny překážky, jenž v současné době dělí to které palivo od budoucího úspěšného použití v budoucích fúzních elektrárnách. Také byly objasněny faktory, jež ohrožují budoucí dostupnost těchto paliv, a byly v tomto rámci popsány i jejich mimofúzní aplikace a možnosti, jak je v těchto aplikacích nahradit. Vzhledem k tomu, že fúzní energetika se řadí ke zdrojům energie pracujícím s ionizujícím zářením, byla řešena problematika jednotlivých paliv i z pohledu radiační ochrany. Také byl řešena toxicita a karcinogenita jednotlivých paliv.

V druhé polovině hlavní části byly vypočítány některé ekonomické a environmentální aspekty jednotlivých palivových cyklů. K tomu byla využita především data získaná v předchozích částech a také model D-T fúzní elektrárny, který byl extrapolován i pro další palivové cykly. Takto mohly být vypočteny například vydatnost jednotlivých palivových cyklů, investiční náklady na jednotlivé fúzní elektrárny či cena elektrické energie vyráběné těmito elektrárnami. Také byly vyhodnoceny faktory ovlivňující jednotlivé aspekty, zároveň byly stanoveny podmínky, za jakých by šlo některé nedobré vlastnosti jednotlivých cyklů zlepšit. Ze všech těchto výpočtů vyplynulo, že v krátkodobém výhledu se jako nejvýhodnější jeví D-T cyklus, který je omezován především násobiči neutronů, ve střednědobém a v dlouhodobém výhledu pak D-D cyklus, přičemž množství paliva pro něj je natolik veliké, že je možno jej beze zbytku nazvat silně udržitelným. V této kapitole byly hodnoceny také environmentální následky využívání jednotlivých palivových cyklů a bylo dokázáno, že z toho hlediska se jako nejlepší jeví D-D cyklus, neboť následky jeho využívání jsou téměř zanedbatelné.

V poslední části bylo provedeno srovnání fúzní energetiky s ostatními zdroji energií. Z většiny těchto srovnání vyplynuly jasné výhody fúzní energetiky. Neplatí pouze v ekonomických otázkách, byly však stanoveny způsoby, jak je z pohledu fúzní energetiky zlepšit. V této části také bylo dokázáno, že fúzní energetika splňuje kritéria také slabé udržitelnosti.

Závěrem této práce je možno říci, že fúzní energetika má potenciál stát se hlavním či dokonce jediným zdrojem energie pro lidstvo, a to na značnou dobu. Zároveň je schopna spolehlivě produkovat energii bez vážnějších environmentálních následků. Pokud má být ovšem konkurence schopná, je nutný její další výzkum, jakožto i získání zkušenosti s jejím používáním a s výstavbou fúzních jaderných elektráren. Z environmentálního pohledu je nutné, aby byla do energetického mixu implementována co nejdříve a v co nevyšší míře, což ovšem vyžaduje zintenzivnění jejího výzkumu.

Seznam literatury

- [1] MCCRACKEN, Garry M. a Peter E. STOTT. *Fúze: energie vesmíru*. Praha: Mladá fronta, 2006. Kolumbus. ISBN 80-204-1453-3.
- [2] ENTLER, Slavomír a Jan MLYNÁŘ. *Spoutání slunce*. 1. Praha: Academia, 2016. Věda kolem nás.
- [3] STRASSLER, Matt. The Strengths of the Known Forces. *Of Particular Significance: Conversations About Science with Theoretical Physicist Matt Strassler* [online]. 2021, 31. 3. 2013 [cit. 2021-10-6]. Dostupné z: <https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/the-known-forces-of-nature/the-strength-of-the-known-forces/>
- [4] DONNÉ, Tony, William MORRIS, Xavier LITAUDON, et al., září 2018. *European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy: LONG VERSION* [online]. 1. Boltzmannstr. 2 85748 Garching / Munich, Germany: EUROfusion [cit. 2022-05-13]. ISBN 978-3-00-061152-0. Dostupné z: https://www.eurofusion.org/fileadmin/user_upload/EUROfusion/Documents/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf
- [5] ENTLER, Slavomír, Ondřej FICKER, Josef HAVLÍČEK, et al. *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*. Praha: Středisko společných činností AV ČR, v.v.i., pro Kancelář Akademie věd ČR, 2019. Strategie AV21. ISBN 978-80-270-6057-3.
- [6] SMOLÍK, Vojtěch, 2019. *Lawsonovo kritérium: základ fúzní energetiky*. Praha. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Slavomír Entler, Ph.D.
- [7] ENTLER, Slavomír. *Energetické využití jaderné fúze*. Praha, 2018. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce doc. Ing. Václav Dostál Ph.D.
- [8] JOHANSSON, Markus, 2003. *Direct conversion of fusion energy: Master Project in Physical Electrotechnology*. Stockholm. Diplomová práce. Royal Institute of Technology, Sweden. Vedoucí práce Associate Professor Jan Scheffel.
- [9] WHAT IS ITER? *ITER* [online]. 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.iter.org/proj/inafewlines>
- [10] MEADE, Dale, 1988. Results and plans for the Tokamak Fusion Test Reactor. *Journal of Fusion Energy* [online]. 7(2-3), 107-114 [cit. 2022-01-27]. ISSN 0164-0313. Dostupné z: doi:10.1007/BF01054629
- [11] World's largest fusion experiment back in operation, 2011. *EFDA* [online]. [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <http://www.efda.org/2011/09/world's-largest-fusion-experiment-back-in-operation/>
- [12] JT-60SA: World's largest superconducting tokamak completed!, 2020. In: *JT-60SA* [online]. Naka [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: https://www.jt60sa.org/b/index_news113.htm?news113/news113.php

- [13] Environmental impact, 2022. *ENERGY EDUCATION* [online]. CALGARY: UNIVERSITY OF CALGARY [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Environmental_impact
- [14] Is nuclear fusion a sustainable energy form? *Fusion Engineering and Design* [online]. 2011, 17. 1. 2011, 86(9-11), 2770-2773 [cit. 2021-11-01]. ISSN 09203796. Dostupné z: [doi:10.1016/j.fusengdes.2010.11.040](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.11.040)
- [15] PELENC, Jérôme, 2015. *Weak versus Strong Sustainability* [online]. In: . Belgium: Université Toulouse II - Jean Jaurès, March 2015 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: [doi:10.13140/RG.2.1.3265.2009](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3265.2009)
- [16] When did humans evolve?, 2022. *Britannica* [online]. Chicago, IL, United States: Britannica Group [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/question/When-did-humans-evolve>
- [17] *MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2022* [online], 2022. 1. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 206 s. [cit. 2022-04-05]. ISBN 978-1-4113-4434-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.5066/P9KKMCP4>
- [18] RADIAČNÍ OCHRANA: PRO VYBRANÉ PRACOVNÍKY SPECIALIZACE: VVZ, VZ, SL pro účastníky kurzů π, 2022. *SKUPINA ČEZ* [online]. Praha 4: ČEZ, září 2019 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/skoleni/skoldohprac/zoz_ro.pdf
- [19] KONISHI, Satoshi, Ryuta KASADA a Fumito OKINO, 2017. Myth of initial loading tritium for DEMO—Modelling of fuel system and operation scenario. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2017, 2017(121), 111-116 [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S092037961730697X?token=B881AD2CA2975A8988273ABAD4A2FC8F4F66E624B6AC89654F6094192BB9D26346179D62D219510E9A7674014771A969&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220206102836>
- [20] FEDERICI, G., L. BOCCACCINI, F. CISMONTI, M. GASPAROTTO, Y. POITEVIN a I. RICAPITO, 2019. An overview of the EU breeding blanket design strategy as an integral part of the DEMO design effort. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2019, 141(30-42), 30-42 [cit. 2022-03-17]. ISSN 09203796. Dostupné z: [doi:10.1016/j.fusengdes.2019.01.141](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.141)
- [21a] BÜHLER, L. a C. MISTRANGELO, 2017. MHD flow and heat transfer in model geometries for WCLL blankets. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2017(vol. 124), 919-923 [cit. 2022-05-25]. ISSN 09203796. Dostupné z: [doi:10.1016/j.fusengdes.2017.01.014](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.014)
- [21b] NUNNENMANN, Elena, Ulrich FISCHER, Robert STIEGLITZ, et al., 2017. Sensitivity and uncertainty analysis for the tritium breeding ratio of a DEMO fusion reactor with a helium cooled pebble bed blanket. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2017(146), 2 [cit. 2022-05-25]. ISSN 2100-014X. Dostupné z: [doi:10.1051/epjconf/201714609025](https://doi.org/10.1051/epjconf/201714609025)
- [22] *PubChem: Explore Chemistry* [online], 2004. National Center for Biotechnology Information U.S. National Library of Medicine 8600 Rockville Pike Bethesda, MD 20894 USA: National Institutes of Health (NIH) [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

- [23] FASEL, D. a M. Q. TRAN, 2005. Availability of lithium in the context of future D–T fusion reactors. *Fusion Engineering and Design* [online]. 6 September 2005, 2005(1163-1168), 75-79 [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0920379605003522?token=3311247630E7EBD9D87F01806F8051F5F1D63DCB8F261E8DBD04DEFF7CECFF0BDFC7647FD8F12AB5ABD3C5D9D69A0188&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220206103201>
- [24] ECKHART, Dieter, 1995. Nuclear Fuels for Low-Beta Fusion Reactors: Lithium Resources Revisited. *Journal of Fusion Energy* [online]. 1995(14), 329-341 [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02214511>
- [25] MURODJON, Samadiy, Xiaoping YU, Mingli LI, Ji DUO a Tianlong DENG, 2020. Lithium Recovery from Brines Including Seawater, Salt Lake Brine, Underground Water and Geothermal Water. *Thermodynamics and Energy Engineering* [online]. IntechOpen, 2020-7-29, 2020 [cit. 2022-02-06]. ISBN 978-1-83880-568-5. Dostupné z: [doi:10.5772/intechopen.90371](https://doi.org/10.5772/intechopen.90371)
- [26a] Projected mine production of lithium worldwide from 2021 to 2030, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/1225076/global-lithium-mine-production-projection/>
- [26b] Distribution of lithium end-usage worldwide in 2021, by area of application, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/268787/lithium-usage-in-the-world-market/>
- [26c] Production of beryllium worldwide from 2011 to 2021, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/802034/production-of-beryllium-worldwide/>
- [26d] Distribution of beryllium consumption worldwide in 2015, by end use, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/887901/global-beryllium-consumption-distribution-by-end-use/>
- [26e] Distribution of lead consumption worldwide in 2019, by end-use, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/891778/distribution-of-global-lead-consumption-by-end-use/>
- [26f] Average prices for lead worldwide from 2014 to 2025, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/675876/average-prices-lead-worldwide/>
- [26g] Distribution of helium consumption worldwide as of 2021, by end use, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/729995/helium-consumption-distribution-by-end-use-worldwide/>

- [26h] Global boron market demand by application in 2014 and 2015 (in metric tons)*, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/449769/worldwide-boron-market-demand-by-application/>
- [26i] Medium-term forecast for boron prices worldwide from 2012 to 2023, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/449813/global-prediction-of-medium-term-boron-prices/>
- [26j] Hydrogen production and consumption worldwide in 2019, by sector, 2022. *Statista* [online]. Johannes-Brahms-Platz 1 20355 Hamburg Germany: Statist [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/1199339/global-hydrogen-production-and-consumption-by-sector/>
- [27] *Inflation Calculator* [online], 2022. Oregon: Oregon State University [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.in2013dollars.com/>
- [28] Development of a viable route for lithium-6 supply of DEMO and future fusion power plants, 2019. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2019(149), 111339 [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092037961930835X/pdf?md5=effca93626787f6834b0937b831e0a21&pid=1-s2.0-S092037961930835X-main.pdf>
- [29] FLEXER, Victoria, Carlo Fernando BASPINEIRO a Claudia Inés GALLI, 2018. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment* [online]. 2018(639), 1188-1204 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0048969718318746?token=41CB9CAACBD86E992C363BAD7DACA5C197F5FC4FAC7D4134FC9D0B90E2CC0C69BD4B5BC81109CEFDDD4AF86098A39C95&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220207164119>
- [30] LUCAS, L.L. a M.P. UNTERWEGER, 2000. Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* [online]. **105**(4), 541-549 [cit. 2022-05-25]. ISSN 1044677X. Dostupné z: doi:10.6028/jres.105.043
- [31] NI, Muyi, Yongliang WANG, Baoxin YUAN, Jieqiong JIANG a Yican WU, 2013. Tritium supply assessment for ITER and DEMONstration power plant. *Fusion Engineering and Design* [online]. 88(9-10), 2422-2426 [cit. 2022-04-16]. ISSN 09203796. Dostupné z: doi:10.1016/j.fusengdes.2013.05.043
- [32] YANG, Jaemoon, 2016. Deuterium. Deuterium [online]. 1. Amsterdam: Elsevier, 2016, s. 5-18 [cit. 2022-04-02]. ISBN 9780128110409. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-811040-9.00002-3
- [33] ZENG, Gongchang, Heping ZENG, Lishan NIU, et al., 2020. A Promising Alternative for Sustainable and Highly Efficient Solar-Driven Deuterium Evolution at Room Temperature by Photocatalytic D₂O Splitting. *ChemSusChem* [online]. 13(11), 2935-2939 [cit. 2022-04-20]. ISSN 1864-5631. Dostupné z: doi:10.1002/cssc.202000562

- [34] Heavy water (deuterium oxide) exports by country in 2019, 2022. *WITS: World Integrated Trade Solution* [online]. USA: WITS [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2019/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/284510>
- [35] Deuterium oxide, 2022. *MilliporeSigma* [online]. St. Louis, MO 68178: Sigma-Aldrich [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/US/en/product/aldrich/151882>
- [36] DEUTERIUM (D, 99.8%) (D₂,99.6%+HD,0.4%), 2022. *CIL: Enriching Scientific Discovery* [online]. Cambridge: Cambridge Isotope Laboratories [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://shop.isotope.com/productdetails.aspx?itemno=DLM-408-PK>
- [37] SHIBAYAMA, Tamaki, Christopher K. DORN, Chakin VLADIMIR, Dmitry V. BACHURIN, Christopher STIHL a Pavel V. VLADIMIROV, 2020. Beryllium and its Alloys as Neutron Multiplying Materials. *Comprehensive Nuclear Materials*. Elsevier, 2020, 2020, 203-250. ISBN 9780081028667. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.11673-X
- [38] Beryllium Mining, 2022. *GREAT MINING* [online]. USA: Great Mining [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.greatmining.com/beryllium.html>
- [39] BEIRAGHI, Assadollah a Saeed BABAEE, 2008. Separation and preconcentration of ultra trace amounts of beryllium in water samples using mixed micelle-mediated extraction and determination by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. *Analytica Chimica Acta* [online]. 607(2), 183-190 [cit. 2022-04-01]. ISSN 00032670. Dostupné z: doi:10.1016/j.aca.2007.11.028
- [40] JASKULA, B. W. a D. V. THOMPSON, 2022. BERYLIUM: ADVANCE RELEASE. *Amazon S3* [online]. USA: Amazon Web Services, Inc. or its affiliates, September 2018 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/beryllium/myb1-2016-beryl.pdf>
- [41] Strategic metals prices in January 2020, 2022. *ISE: Institut für seltene Erden und strategische Metalle* [online]. Mercandor House, Lower Old Town 28, Zug: The Institute for Rare Earths and Metals [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://en.institut-seltene-erden.de/prices-for-strategic-metals-in-january-2020/>
- [42] HERNÁNDEZ, F.A. a P. PERESLAVTSEV, 2018. First principles review of options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2018(137), 243-256 [cit. 2022-04-01]. ISSN 09203796. Dostupné z: doi:10.1016/j.fusengdes.2018.09.014
- [43] SMIRNOV, A. Yu., V. D. BORISEVICH a A. SULABERIDZE, 2012. Evaluation of specific cost of obtainment of lead-208 isotope by gas centrifuges using various raw materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* [online]. 46(4), 373-378 [cit. 2022-04-01]. ISSN 0040-5795. Dostupné z: doi:10.1134/S0040579512040161
- [44] SEMKOVA, V., P. REIMER, T. ALTZITZOGLU, et al., 2009. Neutron activation cross sections on lead isotopes. *Physical Review C* [online]. 80(2), 1 - 12 [cit. 2022-04-01]. ISSN 0556-2813. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevC.80.024610

- [45] SINGH, Narendra a Jin Hui LI, 2014. Environmental Impacts of Lead Ore Mining and Smelting. *Advanced Materials Research* [online]. 2014(878), 338-347 [cit. 2022-04-01]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.878.338
- [46a] Lead (Pb) and water: Lead and water: reaction mechanisms, environmental impact and health effects, 2022. *Lenntech: Water Treatment Solutions* [online]. Distributieweg 3 2645 EG Delfgauw The Netherlands: Lenntech [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/periodic/water/lead/lead-and-water.htm>
- [46b] Boron (B) and water: Boron and water: reaction mechanisms, environmental impact and health effects Read more: <https://www.lenntech.com/periodic/water/boron/boron-and-water.htm#ixzz7UIsO8fYF>, 2022. *Lenntech: Water Treatment Solutions* [online]. Distributieweg 3 2645 EG Delfgauw The Netherlands: Lenntech [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/periodic/water/boron/boron-and-water.htm>
- [47] CIAAW [online]. IUPAC Secretariat PO BOX 13757 Research Triangle Park, NC 27709-3757, USA: International Union of Pure and Applied Chemistry [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://ciaaw.org/>
- [48] Helium - Density and Specific Weight vs. Temperature and Pressure: Online calculator, figures and tables showing density and specific weight of helium, He, at varying temperature and pressure - Imperial and SI Units., 2001. *He Engineering ToolBox* [online]. Engineering ToolBox [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/helium-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2090.html
- [49] KULCINSKI, G. I. a H. H. SCHMITT. The moon: an abundant source of clean and safe fusion fuel for the 21st century. *11th International Scientific Forum on Fueling the 21st Century* [online]. Moscow, USSR, August 1988, 1987 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/234453597>
- [50] JOHNSON, J. R., T. D. SWINDLE a P. G. LUCEY, 1999. Estimated Solar Wind-Implanted Helium-3 Distribution On The Moon. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* [online]. 26(3), 385-388 [cit. 2022-03-19].
- [51] SLYUTA, E. N., A. M. ABDRAKHIMOV a E. M. GALIMOV, 2007. THE ESTIMATION OF HELIUM-3 PROBABLE RESERVES IN LUNAR REGOLITH. *Lunar and Planetary Science* [online]. 2007(38) [cit. 2022-03-19].
- [52] DALLAS, J.A., S. RAVAL, J.P. ALVAREZ GAITAN, S. SAYDAM a A.G. DEMPSTER, 2020. The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020(255), 1 - 12 [cit. 2022-03-29]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.120209
- [53] KOROLEVA, Tatyana V., Pavel P. KRECHETOV, Ivan N. SEMENKOV, Anna V. SHARAPOVA, Sergey A. LEDNEV, Andrey M. KARPACHEVSKIY, Andrey D. KONDRATYEV a Nikolay S. KASIMOV, 2018. The environmental impact of space transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2018(58), 54-69 [cit. 2022-03-29]. ISSN 13619209. Dostupné z: doi:10.1016/j.trd.2017.10.013
- [54] WOLSKA, J. a M. BRYJAK, 2012. Methods for boron removal from aqueous solutions — A review. *Desalination*. 2013(310), 18-24.

- [55] Economic estimation of boron isotope production by gas diffusion method using BF₃ as processing gas, 2020. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 1696(1), 1 - 8 [cit. 2022-03-25]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1696/1/012006
- [56] *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor* [online], 2022. 1. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency (IRENA) [cit. 2022-04-21]. ISBN 978-92-9260-370-0. Dostupné z: www.irena.org/publications
- [57] *Kemp R. DEMO2 reference design may*, 2015, EUROfusion internal document IDM EU_D_2LCBVU, EUROfusion [cit. 2022-04-21].
- [58] CHAPTER 17 - Thermonuclear Reactions: The Beginning and the Future, 2002. CHOPPIN, Gregory R., Jan RYDBERG a Jan-Olov Liljenzin. *Radiochemistry and Nuclear Chemistry* [online]. 3. Oxford: Butterworth-Heinemann, s. 440-473 [cit. 2022-05-15]. ISBN 978-0-7506-7463-8. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/B978-075067463-8/50017-0
- [59] COLEMAN, M., Y. HÖRSTENSMEYER a F. CISMONDI, 2019. DEMO tritium fuel cycle: performance, parameter explorations, and design space constraints. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2019(141), 79-90 [cit. 2022-05-01]. ISSN 09203796. Dostupné z: doi:10.1016/j.fusengdes.2019.01.150
- [60] VAN VUUREN, Detlef P., Jae EDMONDS, Mikiko KAINUMA, et al., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* [online]. 5. srpna 2011, 109(1-2), 5-31 [cit. 2022-05-02]. ISSN 0165-0009. Dostupné z: doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- [61] Global Energy Review 2019: The latest trends in energy and emissions in 2019, 2022. *IEA: International Energy Agency* [online]. 9 rue de la Fédération 75739 Paris Cedex 15 France: International Energy Agency, April 2020 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019
- [62] Přímé a nepřímé náklady, 2022. *Ideaclub.cz* [online]. https://ideclub.cz/ [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://ideclub.cz/slovník-pojmu/prime-a-neprime-naklady
- [63a] How much coal, natural gas, or petroleum is used to generate a kilowatt-hour of electricity?, 2022. *U. S. Energy Information Administration* [online]. 1000 Independence Ave., SW Washington, DC 20585: U.S. Energy Information Administration [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=667&t=3
- [63b] Nuclear explained: Nuclear power and the environment, 2022. *U. S. Energy Information Administration* [online]. Independence Ave., SW Washington, DC 20585: U.S. Energy Information Administration [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/nuclear-power-and-the-environment.php
- [63c] Natural Gas Density Calculator, 2022. *UNITROVE* [online]. 7 Smithy Way Shepshed Leicestershire LE12 9TQ United Kingdom: Unitrove Limited [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: https://www.unitrove.com/engineering/tools/gas/natural-gas-density
- [64] Fuel Consumption of Conventional Reactor, 2022. *Nuclear Power* [online]. Nuclear Power [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/fuel-consumption-of-conventional-reactor/

- [65] *Metric Conversions* [online], 2020. United Kingdom: Wight Hat [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.metric-conversions.org/>
- [66a] Years of fossil fuel reserves left, 2022. *Our World in Data* [online]. Our World in Data [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/years-of-fossil-fuel-reserves-left>
- [66b] Energy mix, 2022. *Our World in Data* [online]. Our World in Data [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- [67] Seawater yields first grams of yellowcake: Yarn-like material collects largest amount of uranium to date, 2022. *Pacific Northwest: NATIONAL LABORATORY* [online]. Pacific Northwest National Laboratory 902 Battelle Boulevard Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, June 13, 2018 [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: <https://www.pnnl.gov/news/release.aspx?id=4514>
- [68] Environmental impacts of coal, 2021. *GEM Wiki* [online]. Global Energy Monitor [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.gem.wiki/Environmental_impacts_of_coal
- [69] NATURAL GAS ENVIRONMENTAL IMPACT: PROBLEMS AND BENEFITS, 2022. *MET* [online]. CH-6300 Zug, Baarerstrasse 141, Switzerland: MET Holding [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/natural-gas-environmental-impact>