



Bakalářská práce

Návrh tepelného oběhu pro malý modulární reaktor chlazený héliem

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

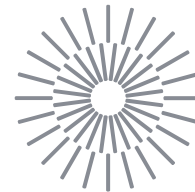
Autor práce:

Radek Klaus

Vedoucí práce:

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Návrh tepelného oběhu pro malý modulární reaktor chlazený héliem

<i>Jméno a příjmení:</i>	Radek Klaus
<i>Osobní číslo:</i>	S19000049
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra energetických zařízení
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je provést koncepční návrh tepelného oběhu pro malý modulární reaktor chlazený héliem. Práce bude zahrnovat stanovení hlavních parametrů tepelného oběhu dle zadaných kritérií, tvorbu základního tepelného schématu, tvorbu výpočetního modelu oběhu v programovacím jazyce Python a stanovení technických parametrů hlavních komponent tepelného oběhu. Pro řešení práce nejsou nutné předchozí znalosti programovacího jazyka Python, vedoucí práce provede intenzivní zaškolení formou krátkého kurzu během semestru.

1. Zpracujte krátkou rešerši na téma vysokoteplotní malé modulární reaktory.
2. Definujte ideální zadávací (vstupní) parametry tepelného oběhu.
3. Sestavte topologii tepelného oběhu.
4. Pro tepelný oběh vytvořte výpočetní model v jazyce Python. Pro stanovení termofyzikálních parametrů chladiva použijte knihovnu Coolprop. Výstupem výpočetního modelu by měl být kompletní výpočet energetických a hmotových toků ve všech potrubních větvích oběhu.
5. Na základě výstupů z výpočetního modelu oběhu stanovte základní technické parametry hlavních komponent tepelného oběhu.
6. Zpracujte závěrečnou zprávu, kde budou přehledně v tabulkách uvedeny všechny stanovené parametry tepelného oběhu.

Rozsah grafických prací: 0
Rozsah pracovní zprávy: 68
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

[1] Advances in small modular reactor technology developments 2018 edition : a supplement to: IAEA advanced reactors information system (ARIS), IAEA Viena, 2020

[2] BEČVÁŘ, Josef. Jaderné elektrárny. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.

Vedoucí práce: doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

15. května 2023

Radek Klaus

Anotace

Cílem této práce je vytvořit koncepční návrh tepelného oběhu pro vysokotlaký héliem chlazený malý modulární reaktor (SMR) s dělenou kompresí.

Práce bude vycházet z předem stanovených vstupních parametrů, ze kterých se vytvoří výpočtový model v programovacím jazyce Python, díky kterým bude možné navrhnout fyzikální parametry v konkrétních částech tepelného oběhu.

Klíčová slova

Modulární jaderný reaktor, tepelný oběh, Helium, SMR

Annotation

The goal of this work is to develop a conceptual heat cycle design for a high-pressure helium-cooled small modular reactor (SMR) with split compression.

The work will be based on predetermined input parameters, from which a computational model will be developed in the Python programming language to design the physical parameters in specific parts of the heat cycle.

Keywords

Modular nuclear reactor, Thermal cycle, Helium, SMR

Poděkování

Rád bych takto poděkoval všem akademickým pracovníkům Technické univerzity v Liberci, kteří mi byli během celého studia nápomocni a předávali nám své znalosti.

Speciální poděkování bych rád věnoval vedoucí mé práce doc. Ing. Petře Dančové, Ph.D. a mému odbornému konzultantovi Ing. Ondřeji Burianovi, za cenné rady v oblasti jaderné energetiky.

Radek Klaus

Obsah

Seznam ilustrací.....	9
Seznam tabulek.....	10
Seznam použitých zkratk.....	11
Jednotky.....	12
1 Úvod.....	13
1.1 Energetický mix Evropy a jednotlivých zemí.....	15
2 Jaderný reaktor.....	17
2.1 Kontejnment.....	18
2.2 Jaderné palivo.....	19
2.3 Moderátor Neutronů.....	22
2.4 Chladicí médium.....	23
2.4.1 Lehkovodní reaktor (Light water reactor, LWR).....	23
2.4.2 Těžkovodní reaktory (Heavy water reactor, HWR).....	25
2.4.3 Reaktory chlazené tekutými kovy a solemi (Liquid metal cooled reactor and Molten salt reactor, LMR and MSR).....	26
2.4.4 Plynem chlazené reaktory (Gas cooled reactor, GCR).....	27
3 Generace jaderných reaktorů.....	28
3.1 První generace.....	28
3.2 Druhá generace.....	28
3.3 Třetí generace.....	28
3.4 Čtvrtá generace.....	28
4 Chladicí okruhy JE.....	29
4.1 Primární okruh.....	29
4.2 Sekundární okruh.....	30
4.3 Terciální/ chladicí okruh.....	30
5 Definice malých jaderných reaktorů (Small modular reactor, SMR).....	31
5.1 Historie SMR.....	31
5.2 Základní znaky SMR.....	32
5.3 Plynem chlazené malé modulární reaktory(Gas-cooled SMR).....	33
6 Tepelný oběh/cyklu.....	34
6.1 Základní termodynamický cyklus.....	35
6.2 Braytonův cyklus.....	36
7 Výpočet.....	38

7.1	Návrh základního výpočtového modelu	38
7.2	Výpočet s jednoduchého cyklu.....	39
7.3	Výpočet cyklu s dělenou kompresí.....	41
7.3.1	Stanovení vhodné teploty po první kompresy	42
7.3.2	Výpočet účinnosti cyklu.....	44
7.4	Výpočet hmotnostního toku chladiva	44
7.5	Výpočet výkonu turbíny	44
7.6	Výpočet výkon kompresorů.....	45
7.7	Získávaný elektrický výkon.....	45
7.8	Rekapitulace hodnot v reálném cyklu	45
8	Závěr	46
	Seznam použité literatury	47
	Seznam příloh.....	48

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Porovnání prostoru ku instalovanému výkonu

<https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>

Obrázek 2 Energetický mix Evropy

Obrázek 3 Energetická mix České Republiky

Obrázek 4 Energetická mix Francie

Obrázek 5 Energetický mix Belgie

Obrázek 6 Kontejnment

https://en.wikipedia.org/wiki/Containment_building#/media/File:Containment_Building.jp

Obrázek 7 Sestava palivového článku

<https://blog.ucsusa.org/dlochbaum/preventing-fuel-damage-in-nuclear-reactors/>

Obrázek 8 Uranová peleta se zahloubení a vnitřním kanálkem

<https://www.shutterstock.com/cs/search/uranium-fuel>

Obrázek 9 Palivová koule PBR

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/PBR_fuel_element.svg

Obrázek 10 Princip štěpení a moderace

Obrázek 11 Uspořádání okruhů JE <https://www.maturitka.cz/en-ustni-16.php>

Obrázek 12 Carnatův cyklus v p-v a T-s diagramu

Obrázek 13 Braytonův cyklus v p-v a T-s diagramu

Obrázek 14 Braytonův cyklus s dělenou kompresí v p-v a T-s

Obrázek 15 Reálný Braytonův cyklus

Obrázek 16 Schéma jednoduchého okruhu

Obrázek 17 Průběh jednoduchého cyklu v T-s diagramu

Obrázek 18 Schéma okruhu s dělenou kompresí

Obrázek 19 Průběh cyklu s dělenou kompresí v T-s diagramu

Obrázek 20 Graf závislosti mezní teploty a účinnosti

Seznam tabulek

Cena na výstavbu 1KW elektrického výkonu

Zadané hodnoty

Vypočtené hodnoty v ideálním systému jednoduchý cyklus

Vypočtené hodnoty v reálném systému jednoduchý cyklus

Výsledné hodnoty jednoduchého cyklu

Vypočtené hodnoty v ideálním systému cyklus s dělenou kompresí

Vypočtené hodnoty v reálném systému cyklus s dělenou kompresí

Výsledné hodnoty cyklu s dělenou kompresí

Výsledné hodnoty cyklus

Rekapitulace hodnot reálného cyklu

Seznam použitých zkratek

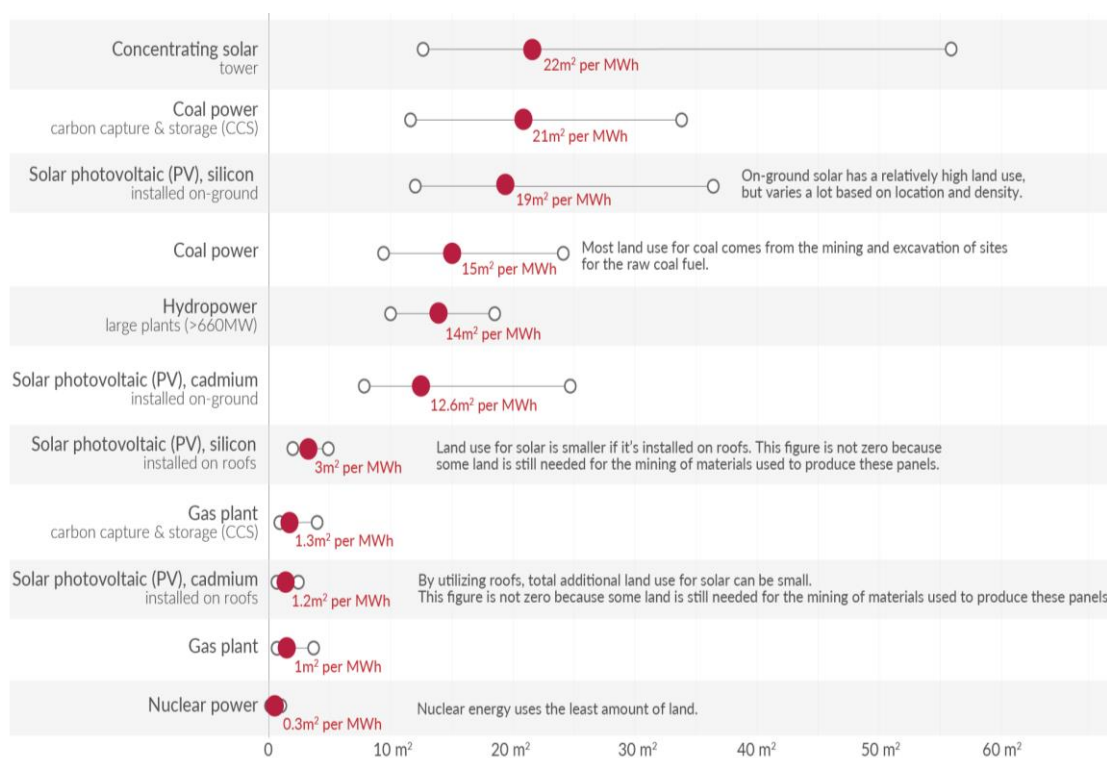
BWR	Boiling water reactor (Varný reaktor)
GCR	Gas cooled reactor (Plynem chalzený reaktor)
HWR	Molten salt cooled reactor (Reaktor chlazený tekutými solemi)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)
JE	Jaderná elektrárna
LMR	Liquid metal cooled reactor (Reaktor chlazený tekutými kovy)
LWR	Light water reactor (Lehkovodní reaktor)
PBR	Pebble-bed reactor
PWR	Pressurized water reactor (Tlakovodní reaktor)
SMR	Small modular reactor (Malý modulární reaktor)

Jednotky

Označení	Jednotka	Název veličiny
h	[kJ/kg]	Měrná entalpie
l	[m], [mm]	Délka
m	[kg]	Hmotnost
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní tok
p	[Pa], [Mpa]	Tlak
P	[W], [MW]	Výkon
q_{in}	[kJ/kg]	Dodané teplo
q_{out}	[kJ/kg]	Odvedené teplo
s	[kJ/kg*K]	Měrná entropie
T	[°C],[K]	Teplota
w	[J/kg], [kJ/kg]	Měrná práce
w_t	[kJ/kg]	Práce turbíny
w_k	[kJ/kg]	Práce kompresoru
η	[-]	Účinnost

1 Úvod

Vzhledem k narůstajícím potřebám elektrické energie ve společnosti, kdy jen v České republice došlo za posledních 20 let k nárůstu spotřeby z 60TWh na 74TWh, je nutné hledat, a také používat takové zdroje, které mají co nejméně negativních dopadů na životní prostředí a zároveň budou schopné produkovat dostatečné množství elektrické energie, kdy však nebudou takovéto zdroje zabírat příliš mnoho prostoru. Jednou z možných variant takovýchto zdrojů jsou i jaderné elektrárny. Velké, malé nebo modulární jsou z hlediska poměru elektrického výkonu na jednotku zastavěné plochy nejvýhodnější variantou Viz Obr. 1. Tato nesporná výhoda je však vykoupena výrazně vyššími náklady zejména pro výstavbu, ale i následný provoz v porovnáním s ostatními zdroji elektrické energie. Nevýhodou velkých jaderných elektráren jsou pak také nároky na vhodné prostory, které budou splňovat všechna potřebná kritéria.



Obrázek 1 Porovnání prostoru ku instalovanému výkonu

Důležitá kritéria výběru vhodné lokality:

a) Zdroj vody

Dostatečné množství vody je nezbytné k provozu JE. Požívá se ke chlazení chladícího či pracovního média reaktoru

b) Geologické podloží

Při výběru lokace je nutné brát zřetel také to, aby podloží JE bylo dostatečně pevné a odolné vůči přírodním vlivům, jako jsou zemětřesení či sesuvy půdy nebo také propad podloží pod váhou samotné JE. Z tohoto důvodu se jako vhodná místa volí masivní monolity vybraných hornin jako jsou granit, žula, či čedič.

c) Vzdálenost od obyvatelné oblasti

JE musí být umístěna v dostatečně vzdálenosti od obydlených oblastí, aby minimalizovala riziko pro životy a majetek obyvatel.

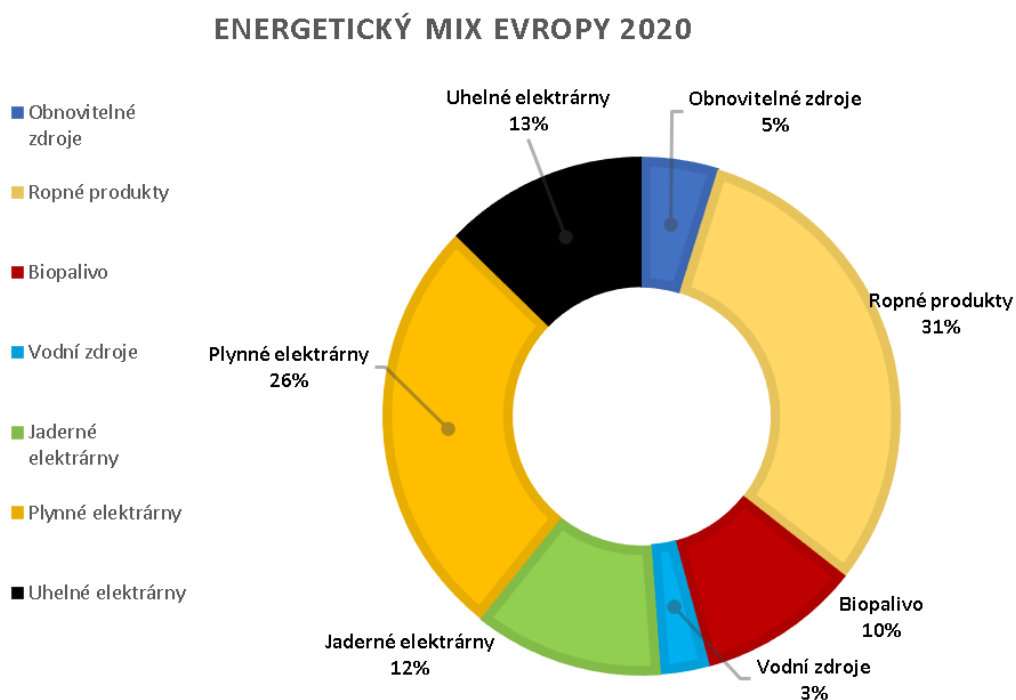
d) Logistická dostupnost

Je výhodné mít přístup k logistické síti, ať už k silniční či vlakové. Toto kritérium není podmínkou, ale spíše ekonomickou výhodou.

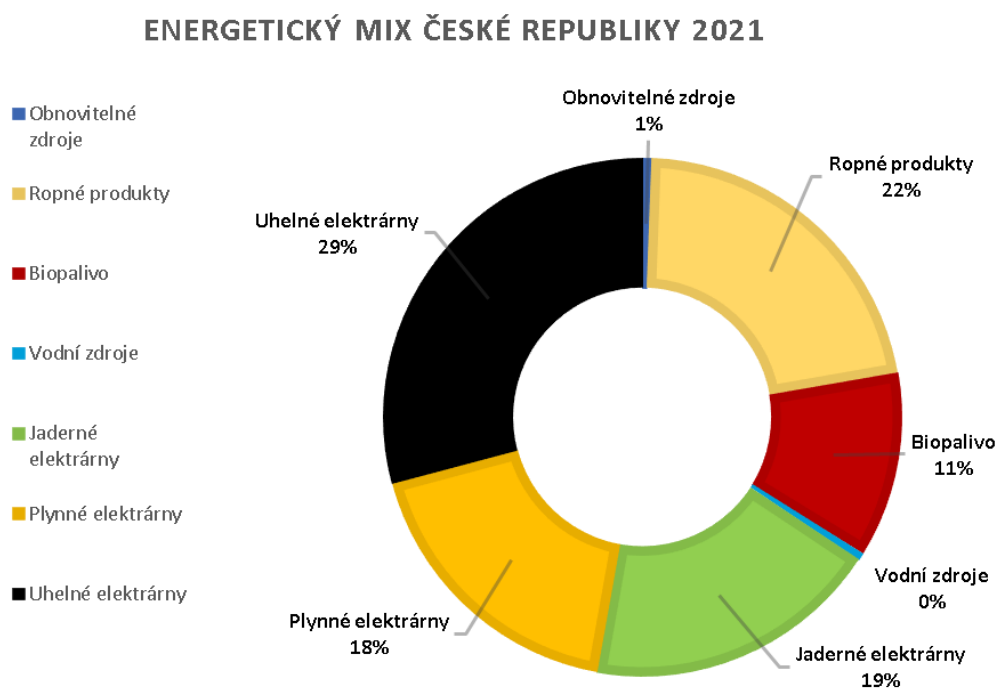
I přes veškeré tyto problematické aspekty se jaderné elektrárny těší nemalé oblibě. Pomineme-li Německo, je celoevropským trendem jaderné elektrárny buďto udržovat, nebo dokonce stavět nové.

1.1 Energetický mix Evropy a jednotlivých zemí

Z dat poskytnutých IAEA vyplývá, že v celoevropské statistice zaujímá elektřina produkovaná v JE 12 %. Nad celoevropským průměrem se pak pohybují země jako je Francie, Belgie nebo také Česká republika.

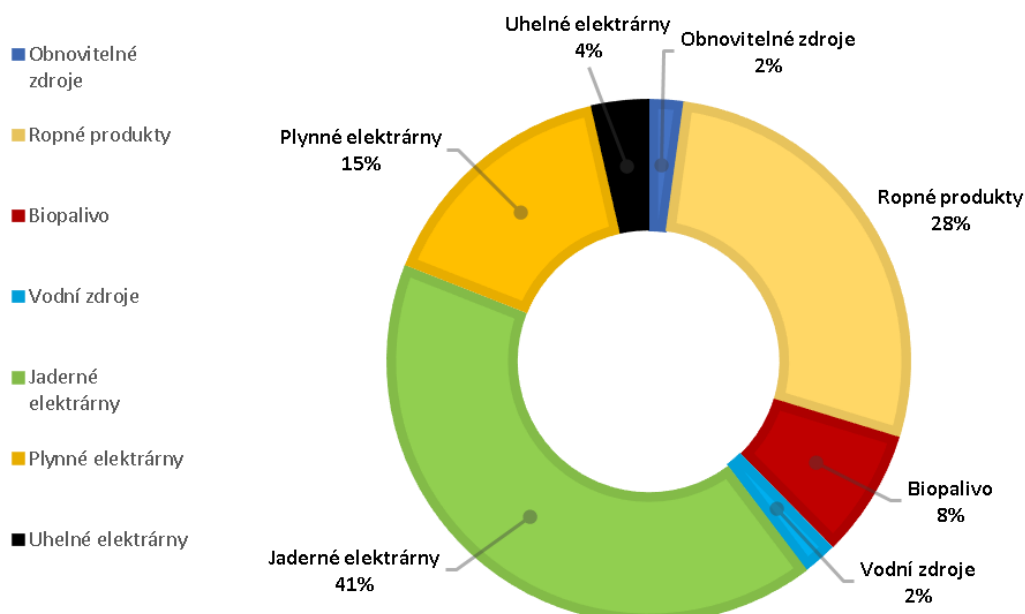


Obrázek 2 Energetický mix Evropy



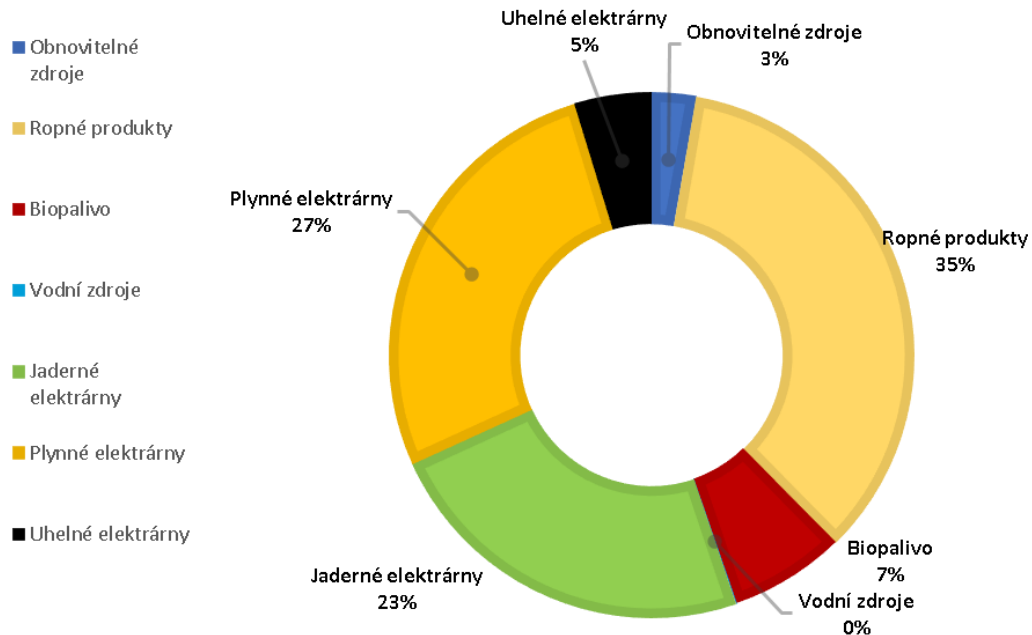
Obrázek 3 Energetická mix České Republiky

ENERGETICKÝ MIX FRANCIE 2021



Obrázek 4 Energetická mix Francie

ENERGETICKÝ MIX BELGIE 2021



Obrázek 5 Energetický mix Belgie

2 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je zařízení, které generuje tepelnou energii díky kontrolované štěpné reakci vybraných izotopů těžkých kovů, kterými jsou v současnosti určité izotopy uranu, plutonia či thoria. Nejčastěji používaný štěpný materiál je uran v různých poměrech izotopů U235 nebo U233 a U238 v závislosti na typu reaktoru, pro každý druh reaktoru je efektivní jiné obohacení paliva U235. Některé typy reaktorů jsou vhodné k získávání tepelné energie, jiné zase k získávání jiných prvků jako je právě Pl239 nebo U235. Samotný reaktor se pak skládá z několika hlavních částí:

a) Kontejnment

Nádoba, někdy také samotná budova, ve které je reaktor uschován

b) Jaderné palivo

Štěpný materiál, jehož štěpením získáváme tepelnou energii

c) Moderátor neutronů

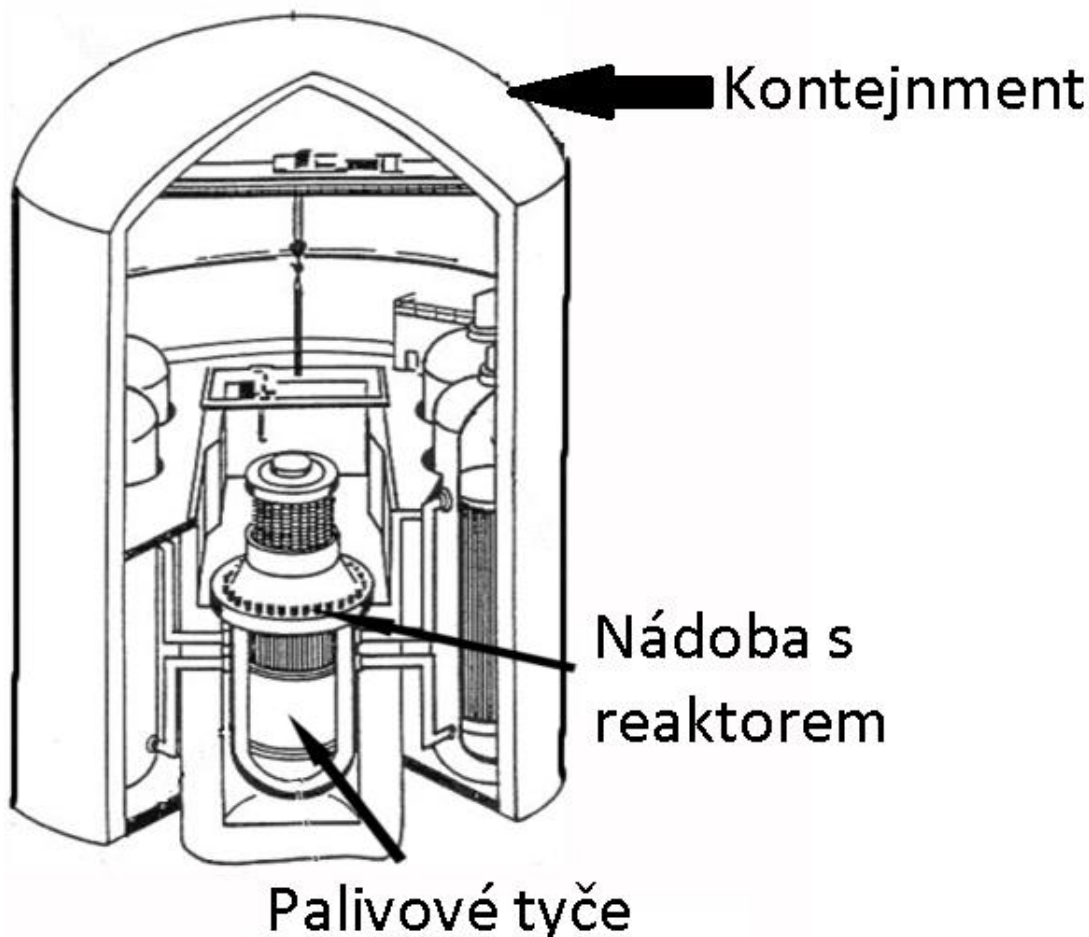
Látka, jejíž cílem je zpomalovat neutrony

d) Chladicí medium

Látka, která odvádí teplo z aktivní zóny reaktoru

2.1 Kontejnment

Kontejnment je nezbytná ochranná schránka reaktoru, která brání nechtěnému úniku radioaktivního materiálu z reaktoru. Ze strojírenského hlediska se jedná se o tlakovou nádobu, velmi často s kulovými čely, z důvodu lepšího rozložení tlaku. Nádobu musí splňovat jedny z nejpřísnějších požadavků na kvalitu provedení, či míru poruchovosti, které můžeme najít. Vnitřní kontejnment musí odolávat tlakům uvnitř reaktoru a zároveň musí bránit úniku radiace z prostoru aktivní zóny. Vnější kontejnment neboli vnější budova chrání reaktor před vnějšími vlivy, ať už to nepříznivými vlivy počasí, zemětřeseními, v přímořských oblastech vlnám tsunami, či útokům lidí. Zároveň musí být schopen udržet radiaci v případě porušení vnitřního kontejnmentu.

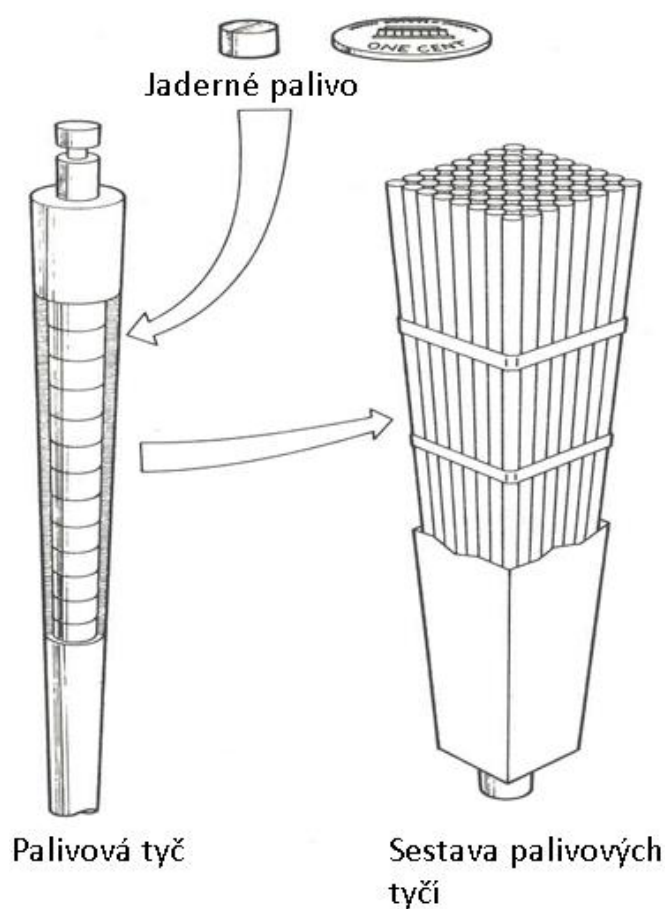


Obrázek 6 Kontejnment

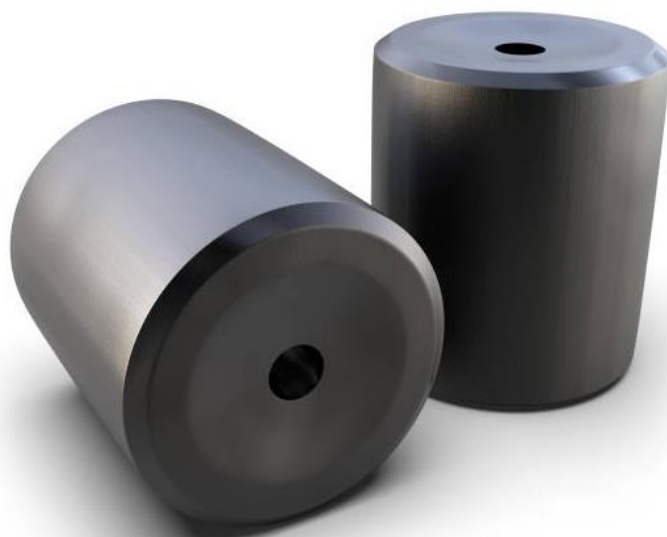
2.2 Jaderné palivo

Jaderným palivem se rozumí takový materiál, který je možné štěpit na izotopy lehčích prvků. Na rozdíl od uhelných elektráren zde nedochází k chemické reakci oxidace neboli hoření, to i přesto, že se můžeme setkat s pojmy jako vyhořelé palivo. Vyhořelým palivem je myšleno takové palivo, které již neobsahuje dostatek izotopů Uranu či Plutonia, které je potřeba pro udržení štěpné reakce v daném typu jaderného reaktoru a z paliva tak již nezískáváme dostatek tepelné energie

Nejčastější forma paliva jsou palivové tyče, plněné peletami cylindrického tvaru z oxidu uraničitého o průměru cca 10 mm a výšce cca 10 mm, mírné konstrukční odlišnosti můžeme nalézt v peletách určených pro reaktory západního a východního typu, rozdíl je především ve tvaru, kdy pelety pro reaktory bývalého sovětského bloku používají k odvádění plynných produktů štěpné reakce středový otvor a v případě pelet pro západní reaktory se využívá pouze zahloubení na čelech pelet, které slouží jako skladiště plynných produktů. V současnosti se používá také kombinace těchto dvou konstrukcí, ve se spojují výhody obou konstrukcí.

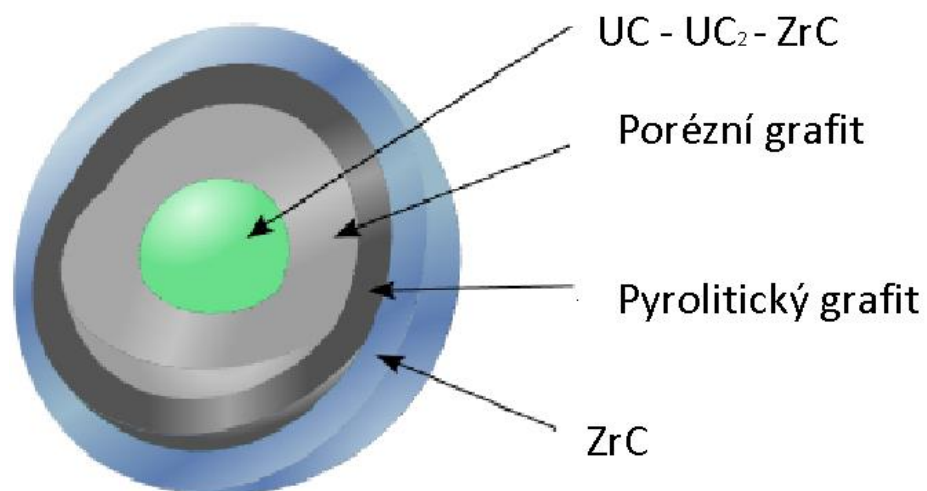


Obrázek 7 Sestava palivového článku



Obrázek 8 Uranová peleta se zahloubení a vnitřním kanálkem

V současné době se již používají i jiné tvary, které se však nedají vždy použít ve starších typech reaktorů, kterých je však stále z celkového množství provozovaných reaktorů většina. Modernějším tvarem jsou například koule, které používají v reaktorech známých jako Pebble bed reactor (PBR).



Obrázek 9 Palivová koule PBR

PBR jsou reaktory moderované grafitem a chlazené plyny, kterými jsou například heliem či oxid uhličitý, jedná se modernější typy reaktorů, které v současnosti nemají tak velké zastoupení, především kvůli horším ekonomickým faktorům takovýchto reaktorů. V porovnání s vodou chlazenými reaktory mají však výhodu v tom, že jejich palivo nemusí být obohacené na 4 % U235, ale stačí přírodní U238. Jedná se tak o jednu z možností budoucí recyklace vyhořelého paliva. Další výhodou je možnost kontinuálního doplňování paliva, není tak potřeba odstávky pro výměnu paliva.

Běžné palivové tyče jsou potahovány ze zirkonovými slitinami, zirkon se používá z důvodů vysoké korozivzdornosti a díky jeho tepelné vodivosti, která se zvyšuje s teplotou. V současnosti má 95 % lehkých a těžkovodních reaktorů tyče povlakované právě takovými slitinami. Mimo jiné povlak také zachytává produkty štěpné reakce uvnitř palivových tyčí, nedochází tak k zbytečně velké kontaminaci chladicího media.

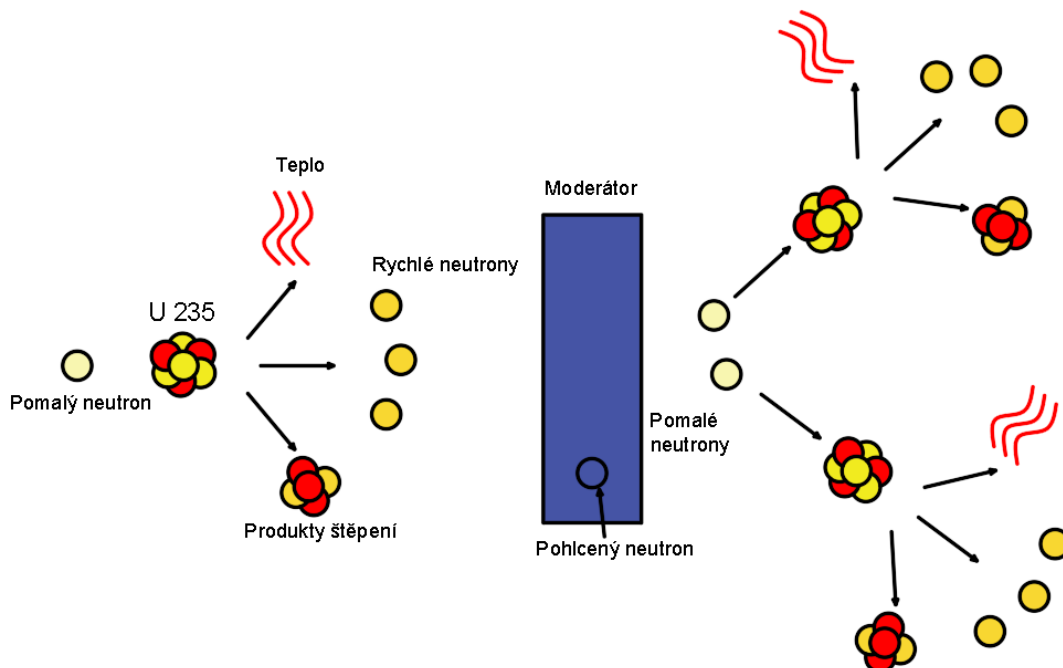
V dnes nejpoužívanějším tlakovodních reaktorech se používá palivo obohacím do 5 % U235 obohacého uranu. Ve výzkumných reaktorech se však můžeme setkat i s koncentracemi vyššími, povětšinou však do 20 %. V případě reaktorů chlazených sodíkem, díky nižšímu pohlcování neutronů je možné používat téměř přírodní uran, tj. 0,8 % U235.

Vysoké koncentrace 20-85 % U235 se v reaktorech téměř nepoužívají, tudíž takto obohacný uran je pod přísnou kontrolou jak výroby, tak nakládáním s ním. Při koncentraci nad 85 % se jedná výhradně o uran určený k výrobě jaderných zbraní.

2.3 Moderátor Neutronů

Moderátor neutronů je takový materiál, který má schopnost snižovat rychlost neutronů aniž by je pohltil. K takovému zpomalování dochází srážkami s jádry atomů moderátoru až do té míry, než neutron ztratí dostatek kinetické energie na to, aby mohl být pohlcen jádrem atomu jaderného paliva. Míra absorpce a zpomalení neutronů je statistická záležitost, do které vstupuje velké množství proměnných a takovýto výpočet není předmětem této práce.

Materiály, které se jako moderátory využívají jsou materiály lehkých prvků, například Uhlík ve formě grafitu nebo voda s minimálním množstvím dalších stopových prvku. V případě H_2O hovoříme o vodě lehké, v případě ${}^2\text{H}_2\text{O}$ o vodě těžké a u ${}^3\text{H}_2\text{O}$ o supertěžké vodě. U těžké supertěžké vody je nižší absorpce neutronů v porovnání s lehkou vodou, výhodou nižší absorpce je možnost použít méně obohacené palivo. Nevýhody těžké a supertěžké vody jsou ale zejména ekonomické, finance ušetřené na obohacení paliva nejsou dostatečné na to, aby pokryly cenu výroby takovéto vody, a proto se v současnosti nejčastěji provozu lehkovodní reaktory (zhruba 70 % všech provozovaných reaktorů). Voda má také tu výhodu, že mimo zpomalování neutronů funguje i jako chladivo a na rozdíl od jiných konceptů chlazení například tekutými kovy, nám za běžných okolností voda nezmění skupenství.



Obrázek 10 Princip štěpení a moderace

2.4 Chladicí médium

Chladicí médium, nebo také chladivo, je látka uvnitř jaderného reaktoru jejíž hlavní funkcí je odvádění tepelné energie, vytvořené uvnitř aktivní zóny jaderného reaktoru. Jakožto chladivo se z velké části používá voda, ale je také možné používat těžkou vodu, roztavené kovy, či sole.

Jednou z klíčových vlastností chladiva je schopnost vydržet vysoké teploty, aniž by docházelo k fázové změně, která je zdrojem nechtěné absorpce energie. Další důležitou fyzikální vlastností je tepelná kapacita, platí zde jednoduchá úměra čím větší tepelná kapacita, tím menší hmotnostní tok chladiva je potřeba k uchlazení reaktoru.

2.4.1 Lehkovodní reaktor (Light water reactor, LWR)

Nejpoužívanějším typem jaderného reaktoru je právě lehkovodní tlakový reaktor (Pressurized water reactor, PWR), u kterého je chladicím médiem voda. Voda zastává taktéž funkce moderátoru díky její neutrony zpomalující vlastnosti, kdy však nedochází k jejich absorpci. Tlakové vodou chlazené reaktory zaujímají zhruba 65 % všech lehkovodní reaktorů, které jsou samy o sobě nejpoužívanějším typem reaktorů. Dále zde máme také konstrukci, při které dochází k varu vody přímo v aktivní zóně, reaktorům se říká varné reaktory (Boiling water reactors, BWR). Varné reaktory kvůli nejsou tak populární zejména kvůli problémům s odvodem tepla z okolí palivových tyčí, ke kterému dochází díky tvoření páry na povrchu palivových tyčí.

U PWR díky přetlaku až 15 MPA vře až při teplotách okolo 350°C. Kvůli vyšší teplotě varu nedochází ke změně skupenství chladicího media, které by mělo za následek ztrátu energie. Konstrukce tlakovodních reaktorů, je rozdělena do dvou separátních okruhů, tzv. primární a sekundární. Za primární okruh považujeme okruh, ve kterém chladicí médium prochází přímo přes aktivní zónu jaderného reaktoru a sekundární okruhem je myšlený okruh, který prochází přes turbínu. Teplo se mezi jednotlivými okruhu předává v tepelných výměnících, ve kterých se v sekundárním okruhu voda za atmosférického tlaku mění na páru, která následně proudí přes turbínu, čímž generuje elektrickou energii.

Výhody PWR

a) Ekonomičnost

Hlavní výhodou je cena a fakt, že voda slouží zároveň jako moderátor.

b) Částečná samoregulace

Řetězová štěpná reakce se samovolně zpomaluje, pokud se teplota zvyšuje, to je zapříčiněno větší absorpcí neutronů při nárůstu teploty.

c) Bezpečnost konstrukce

díky separátním okruhům není nutné celý komplex přizpůsobovat vysokým tlakům, teplotám a v sekundárním obvodu se při úniku média nejedná o radiační hrozbu, protože zdejší voda není radioaktivní.

Nevýhody PWR

a) Obohacování paliva

V lehké vodě dochází ke zvýšené absorpci neutronů. Tato absorpce se musí kompenzovat větším množstvím lehce štěpitelných izotopů, palivo se musí obohacovat.

b) Přehřátí palivových tyčí

Přehřátí má za následek tvorbu páry na povrchu tyčí, čímž se masivně snižuje schopnost odvádět teplo. Naštěstí v případě PWR se dá do takového stavu dostat poněkud obtížně díky již zmíněné částečné samoregulaci. Pokud však k tomuto dojde, dochází k rychlému nárůstu teploty a při teplotách nad 1200 °C dochází k rozdělení molekuly vody na jednotlivé molekuly kyslíku a vodíku, kdy tato kombinace pak tvoří výbušnou směs.

c) Únik tritia

Kvůli vysokému množství neutronu, je zde možnost, že některé molekuly vody pohltí v jádru neutron a stane se z nich molekula deuteria, popřípadě tritia, při úniku tekutiny z reaktoru pak může dojít i k úniku tritia, které je radioaktivní podléhá beta rozpadu na ^3He v poločase 12let.

2.4.2 Těžkovodní reaktory (Heavy water reactor, HWR)

Těžkou vodu neboli izotop vodíku Deuterium mají jako chladivo reaktory, které mají stejnou konstrukci, jako klasické tlakové lehkovodní reaktory viz 2.4.1.

Výhody HWR

- a) Nižší absorpce neutronů

Výrazně nižší absorpce neutronů v porovnání s lehkou vodou, díky tomu je možné používat i velmi málo obohacené palivo, někdy dokonce přírodní uran, který má zhruba 0,8 % U235. Hlavním představitelem těžkovodních reaktorů jsou tzv. CANDU reaktory, z anglického Canadian Deuterium Reactor.

- b) Všechny ostatní výhody PWR

Nevýhody HWR

- a) Ekonomičnost

Výrazně vyšší náklady na těžkou vodu, které často převyšují cenu obohacení paliva, a proto se tento typ reaktorů používá jen v místech kde je přístup k těžké vodě.

- b) Všechny ostatní nevýhody PWR

2.4.3 Reaktory chlazené tekutými kovy a solemi (Liquid metal cooled reactor and Molten salt reactor, LMR and MSR)

Využití tekutých kovů jakožto chladiva vidáme především u rychlých reaktorů. Nejčastěji se zde používá tekuté olovo, sodík, či slitina olova a bismutu, v případě prvních reaktorů tohoto typu byla použita i rtuť, od které se ale opustilo díky větším tlaku par a toxicitě samotné rtuti. V případě tekutých solí se používají sole ze směsi Lithia, Sodíku a Draslíku či Beryllia.

Výhody LMR a MSR

a) Teplota varu

V porovnání s vodními reaktory mnohem větší teploty varu a nízký tlak par.

b) Tepelná kapacita

Tekuté kovy mnohem větší tepelnou kapacitu v porovnání s vodou. Díky tomuto není třeba tak velký průtok chladicího media.

Nevýhody LMR a MSR

a) Externí zdroj tepla

Nutnost externího zdroje tepla je zde kvůli faktu, že chladivo se musí udržovat v tekutém skupenství a to už ve chvíli, kdy samotný reaktor spouštíme.

b) Nebezpečí výbuchu v případě sodíkového chladiva

V případě sodíkem chlazených reaktorů je nebezpečí výbuchu, dojde-li k úniku sodíku z reaktoru, sodík je velmi reaktivní s vodou, a to dokonce i v tak malých koncentracích jaké jsou ve vzduchu.

2.4.4 Plynem chlazené reaktory (Gas cooled reactor, GCR)

Plynné chladicí media využívají především rychlé a výzkumné reaktory. Plyny které se používají je Helium, Oxid Uhličitý, nebo Dusík. Princip odvádění tepla je dost podobný jako u lehkovodních tlakových reaktorů.

Výhody GCR

a) Vyšší teploty

Hlavní předností GCR je výrazně vyšší teplota, ve které může reaktor pracovat, teplotní limitace jsou zde dané použitými materiály, nikoli vlastnostmi chladicího media jako v ostatních případech. S vyšší teplotou je spojena vyšší účinnost teplotního cyklu.

b) Nízká absorpce neutronů

Díky velmi nízké absorpci neutronů lze v takovýchto reaktorech využívat velmi málo obohacené palivo.

c) Konstrukce

Konstrukčně je tento typ reaktoru pověrně jednoduchý v porovnání s například LMR a SMR. Navíc lze bez problémů připojit turbínu na primární okruh reaktoru, díky čemuž odpadají ztráty způsobené přenosem tepla a změnou skupenství v jednotlivých okruzích.

Nevýhody GCR

a) Bezpečnost

Větší náročnost na těsnost zejména v případě použití lehkých plynů jako je He. Může tak docházet k únikům plynů.

b) Velký průtok chladiva

Díky malé tepelné kapacitě je nutné zajistit velký průtok chladiva jádrem reaktoru, toho je docíleno velkými plynovými kompresory, které spotřebovávají značné množství energie produkované na turbíně.

3 Generace jaderných reaktorů

V současnosti se reaktory rozdělují mimo jiné také podle tzv. generací. Nejedná se ani tak o rozdělení časové, jako spíše z hlediska použitých technologií, zejména těch bezpečnostních. Reaktory se dělí aktuálně dělí do 4 generací, kdy ta nejvyšší je považována za nejbezpečnější a ekonomicky nejvýhodnější.

3.1 První generace

První generací reaktorů byla z velké části tvořena prototypy a vojenskými reaktory. Reaktory první generace se dají označit spíše za zařízení potvrzující koncept využití jaderné energetiky v komerčním prostoru. Mezi první civilně používané jaderné reaktory, které nebyli součástí vojenského komplexu se řadí reaktory v Shippingportu v Americké Pensylvánii, který dosáhl kritického stavu 1957 a operoval až do roku 1982, kdy byl vyřazen z provozu. Dále sem patří Britský reaktor Calder Hall-1, který byl v provozu mezi lety 1956 až 2003 a Americký Dresden-1, který byl v provozu mezi lety 1960-1978. Poslední reaktor z první generace Britský Wylfa, byl odstaven v prosinci roku 2015.

3.2 Druhá generace

Druhá generace reaktorů, již byla designovaná na rozdíl od předchozí generace spíše prototypových reaktorů jako ekonomicky zisková. Doba operace takovýchto reaktorů byla designovaná zejména na 40 let. První reaktory této generace se spouštěli koncem 60 let 20. století, značná část těchto reaktorů se využívá dodnes.

3.3 Třetí generace

Třetí generace přinesla především vylepšení z hlediska bezpečnosti, a to zejména v oblasti pasivní bezpečnosti. Některé reaktory jsou zároveň designované pro tvorbu vodíku separací molekuly vody.

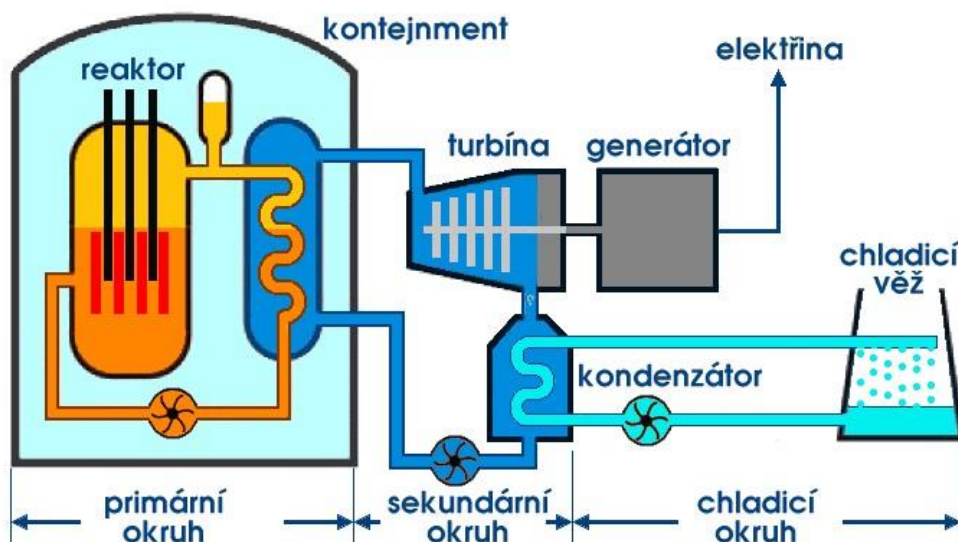
3.4 Čtvrtá generace

V současnosti se začíná hovořit o již 4. generaci, v porovnání s třetí generací jsou tyto reaktory ještě bezpečnější. Hlavní předností těchto nových typů reaktorů je možnost používat již vyhořelé palivo či Thoriové palivo.

4 Chladicí okruhy JE

Díky chladicí okruh může docházet k odvodu tepla z aktivní zóny reaktoru. Uvnitř chladicí okruhu cirkuluje chladivo, bez této cirkulace nejen, že z reaktoru nezískáváme žádnou energii, kterou bychom byli schopni v turbíně přetvářet na energii elektrickou, ale ve většině koncepcích jaderného reaktoru dochází k přehřívání aktivní zóny, které může vést k havárii reaktoru.

Uspořádání chladicí okruhu se může lišit v závislosti na typu reaktoru a použitém palivu. Chladicí okruh se typicky skládá z jedné až tří sekcí, nejčastěji nazývaných jako Primární, Sekundární, Terciální nebo také chladicí okruh.



Obrázek 11 Uspořádání okruhů JE

4.1 Primární okruh

Jedná se o uzavřený okruh, kterým protéká chladivo skrze aktivní zónu reaktoru. Až na výjimku v podobě Helia je chladivo kontaminované radiací, tudíž je kladen velký důraz na bezpečnost a technické provedení, které je navíc musí snášet vysoké teploty a tlaky.

V určitých typech reaktorů, se využívá pouze jeden uzavřený okruh, jehož součástí je i turbína a chlazení. Mezi takovéto reaktory patří typicky varné a plynné reaktory.

Výhodou jednoho chladicí okruhu je menší náchylnost ke ztrátám tepla a jednoduchost konstrukce, která jde ruku v ruce s nižšími náklady na výstavbu.

Nevýhodou je však větší náchylnost na poruchu chlazení.

4.2 Sekundární okruh

V sekundárním okruhu dochází p přenosu tepelné energie z reaktoru do media, které roztáčí turbínu. Tímto médiem je povětšinou voda, respektive vodní pára. K předávání tepla mezi jednotlivými okruhy slouží tepelné výměníky, ve kterých se voda mění na přehřátou páru. V části sekundárního okruhu před turbínou bývá přetlak z toho důvodu, aby byl zajištěn tlakový spád při průchodu turbínou, kde na výstupu bývá naopak podtlak, a to nejen z důvodu tlakového spádu, ale také proto, aby zde nedocházelo ke kondenzaci vodních par, které mohou kavitačně poškozovat lopatky turbíny, které má za následek snížení efektivity a životnosti turbíny. Pára v sekundárním okruhu je chlazena studenou vodou z Terciálního okruhu.

Výhodou konstrukce se sekundárním okruhem je oddělení kontaminovaných medií

Nevýhodou je náročnější konstrukce a větší tepelné ztráty díky většímu množství dílů ve kterých musí dojít ke konvekci tepla.

4.3 Terciální/ chladící okruh

Chladící okruh je nezbytnou součástí JE, proudí zde studená voda, která protéká tepelným výměníkem se sekundárním okruhem ve kterém odebere zbytkové teplo a následně ho odvede do chladící věže, ve které se tryská ve výšce několika desítek metrů do vzduchu tak, aby díky komínovému efektu v chladící věži došlo k odvedení tepla do okolního vzduchu. Takovéto chladící věže mohou výškou přesahovat 100 m a to proto, aby byl zabezpečen dostatečně silný komínový efekt. Chladná voda je často čerpána z přílehlých vodních zdrojů. Dostatečné množství vody je klíčovým aspektem volby pozemku pro jadernou elektrárnu.

5 Definice malých jaderných reaktorů (Small modular reactor, SMR)

Dle definice Mezinárodní agentury pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency, IAEA), se malým modulárním reaktorem (Small modular reactors, dále jen SMR) myslí reaktor, který dosahuje výkonu do 300MW(e). Dále se také můžeme setkat s pojmem střední modulární (Medium modular reactors, zkráceně MMR), který zahrnuje modulární reaktory o výkonu mezi 300 až 700MW(e). Větších výkonů než 700MW(e) již jednotlivé modulární reaktory nedosahují a o takových reaktorech hovoříme jako o velkých reaktorech (Large reactors).

Výhodou modulárního reaktoru, je možnost postupné expanze v podobě přidávání modulů dle potřeby, zároveň se jedná o dobrý zdroj elektrické energie v místech, kde je potřeba elektrárnu vybudovat rychle a to díky možnosti instalovat další moduly, není třeba postavit celý komplex najednou jako tomu je v případě velkých jaderných elektráren. Vhodné jsou i pro využití v místech, kde se nevyplatí stavět velké bloky, nebo by to velmi ekonomicky i logisticky náročné. Modulární blok je možno převážet autem, lodí, či vlakem.

Další nespornou výhodou je prefabrikace takovýchto bloků. S nárůstem počtu kusů je možné optimalizovat a tím výrazně zlevňovat náklady na výrobu takového bloku. Dalším pozitivem je bezesporu možnost upravovat výrobek na základě zpětné vazby zákazníka a tím rychleji vyvíjet efektivnější, levnější, bezpečnější nebo pro operátory příjemnější reaktor.

5.1 Historie SMR

Myšlenka modulárního reaktoru začala vznikat již v počátku nasazení civilních reaktorů. První historické zmínky jsou již z padesátých let 20. století. Již v této době našli modulární reaktory uplatnění v armádním využití u válečných ponorek, lodí, či ledoborců. Již ke konci padesátých let se americká armáda pokoušela o vývoj reaktoru, který bude možné převést na potřebné místo díky lodi, či vlaku a jednoduše ho připojit do elektrické sítě. První prototyp byl instalován v roce 1957 (nikdy se však neověřila možnost jeho transportu) a jednalo se lehkovodní reaktor.

Ačkoli napájel elektrickou energií celou vojenskou základnu ve Virginii sloužil zejména jako cvičný reaktor. V období sedmdesátých let 20. století nastali s modulárními reaktory problémy, které se týkaly ekonomické stránky věci. Projekty byli nutné investovat velkou část finančních prostředků na proškolení personálu, a tak nezbyly finance na další vývoj. Program jako takový byl ale považován za úspěšný, protože dokázal potvrdit prvotní myšlenku předem sestaveného reaktoru, který je možno jednoduše instalovat i ve velmi odlehlých lokalitách za poměrně krátký čas. V současnosti se vývojem SMR zabývá velká část zemí využívající jadernou energii, v čele těchto zemí jsou země jako je Čína, Kanada nebo Rusko. Také se již chystá první civilní nasazení těchto reaktorů například v České republice se největší energetická firma na trhu ČEZ vyjádřila, že první modulární reaktor by měl stát v oblasti Jaderné elektrárny Temelín již v roce 2032 a následně se do roku 2050 počítá s nasazením minimálně na dalších 6 místech, kde mají tyto reaktory nahradit současné spalovací kotle na uhlí, či dřevěnou štěpku.

5.2 Základní znaky SMR

Jedním z nejdůležitějších rysů v porovnání s velkými jadernými komplexi je jednoznačně jednoduchost konstrukce, která je spojená s prefabrikací jednotlivých bloků, stejně jako u každé sériové výroby zde může docházet ke zefektivňování jak na straně výroby, tak konstrukce. S prefabrikací ve výrobním závodě je spojena také výhoda nižších pořizovacích nákladů, které jsou stále velmi velké, ale v porovnání nákladů na výstavbu velkých jaderných komplexů stále řádově nižší. Ekonomicky jsou na tom hůře i z hlediska jednotky vyrobené energie na jednotku pořizovací ceny v porovnání s velkými reaktory.

Výrazně menší nároky na prostor. Tato vlastnost je opět úzce spojena s prefabrikací, která samotnou velikost také limituje, reaktor, který by se nedal převézt již není modulární. S menšími rozměry je i spojen menší výkon, výkon zpravidla nepřesahuje 300Mw. Zároveň je díky tomu možno stavět takovéto reaktory i na jiných místech než velké JE, které jsou díky nutnosti mnohem masivnějšího geologického podloží velmi limitované místy, ve kterých se dají stavět.

Dalším významným znakem je určitá forma normalizace, díky které je možné v případě potřeby přistavovat potřebné bloky bez větších obtíží.

Pasivní bezpečnost, to je jeden z dalších znaků SMR, využívá se zde fyzikálních zákonů k případnému nouzovému zastavení štěpné reakce, není zde potřeba žádný zásah člověka. Zároveň je zde možnost při prefabrikaci reaktor učinit odolnější vůči vnějším vlivům, takovéto reaktory pak nejsou tak náchylné na poškození nepřátelskými silami, což je výhoda zejména v oblastech vojensky nestabilních. Takovýto reaktor tak již není nejslabším článkem elektrické sítě.

Ekonomické hledisko. Z ekonomického hlediska tyto reaktory dlouhou dobu nebyli tak atraktivní díky jejich většímu kapitálu vynaloženým na MW elektrického výkonu. Kdy podle dat Amerického ministerstva energetiky jsou náklady na výstavbu následující:

Cena na výstavbu 1Kw elektrického výkonu	
Běžný reaktor	2 500-4 500\$ (55 000 – 100 000)
Modulární reaktor	5 500-8 000\$ (120 000 -180 000)

Celková cena na výstavbu je však stále nižší, což z nich dělá mnohem atraktivnější volbu pro menší města či velké výrobní závody.

5.3 Plynem chlazené malé modulární reaktory(Gas-cooled SMR)

Dle předchozích definic jde o reaktor dosahující zpravidla do 300MW. Chladičem takového reaktoru je nejčastěji Oxid uhličitý, Helium, Vodík a jeho izotopy či Dusík. Díky plynému chladičímu mediu je zde možno používat nižší koncentrace U235, což umožňuje například využívat přírodní uran, nebo vyhořelé jaderné palivo z větších PWR reaktorů, což citelně snižuje náklady na palivo a zároveň šetří náklady na uskladnění vyhořelého paliva.

S plynem jakožto chladičem je úzce spjatá pasivní bezpečnost. Štěpná reakce se sama zpomaluje díky zvýšení absorpce neutronů, což je jedna z fyzikálních vlastností, díky které se velmi výrazně snižuje riziko jaderné havárie. K této samoregulaci však dochází až při vyšších teplotách v porovnání například s PWR, běžně dosažitelné teploty v plynem chlazeném SMR jsou i 900 °C což má pozitivní vliv na účinnost samotného reaktoru, která se může pohybovat až nad 50%.

6 Tepelný oběh/cyklu

Jedná se o uzavřený oběh, ve kterém dochází k předávání tepelné energie z místa s vyšší tepelnou energií do místa s nižší tepelnou energií. Tato zákonitost bývá někdy nazývána jako nultý zákon termodynamiky.

V tepelném oběhu probíhají základní termodynamické děje, u kterých je však nutno v reálném světě počítat i s tzv. ztrátami, které vznikají díky nedokonalým technickým provedením členů systému (převážně netěsnosti systému a s nimi spojený únik tlaku), nebo faktu, že samotný systém reaguje také s okolním prostředím, díky čemuž dochází ke ztrátám tepelným.

Ztráty na mechanických členech lze částečně eliminovat zpřesněním výroby, to se však ekonomicky vyplatí pouze do určité hranice, kdy by náklady na výrobu výrazně přesáhli získanou efektivitu.

Ztráty tepelné lze eliminovat snížením přenosu tepla mezi systémem a okolním prostředím například zlepšením či zvětšením množství izolačních materiálů. Zlepšení izolačních schopností lze opět ekonomicky efektivně zvyšovat jen do určité míry

Celková energetická ztráta, ke které dojde v cyklu během přeměny energie tepelné na v našem případě energii mechanickou a následně elektrickou se vyjadřuje veličinou zvaná termodynamická účinnost.

6.1 Základní termodynamický cyklus

Nejjednodušším termodynamickým cyklem je Carnatův cyklus, pojmenovaný podle francouzského fyzika Sadi Carnota. Carnatův oběh v jeho nezměněné podobě je platný pouze v případě ideálních plynů. Jedná se o cyklus s největší možnou tepelnou účinností, a proto se snažíme v případech reálných plynů, které se však vlastnostmi blíží plynům ideálním tento cyklus napodobit. Zařízení, která pracují s takovými plyny jsou například: klimatizační jednotky či parní turbíny.

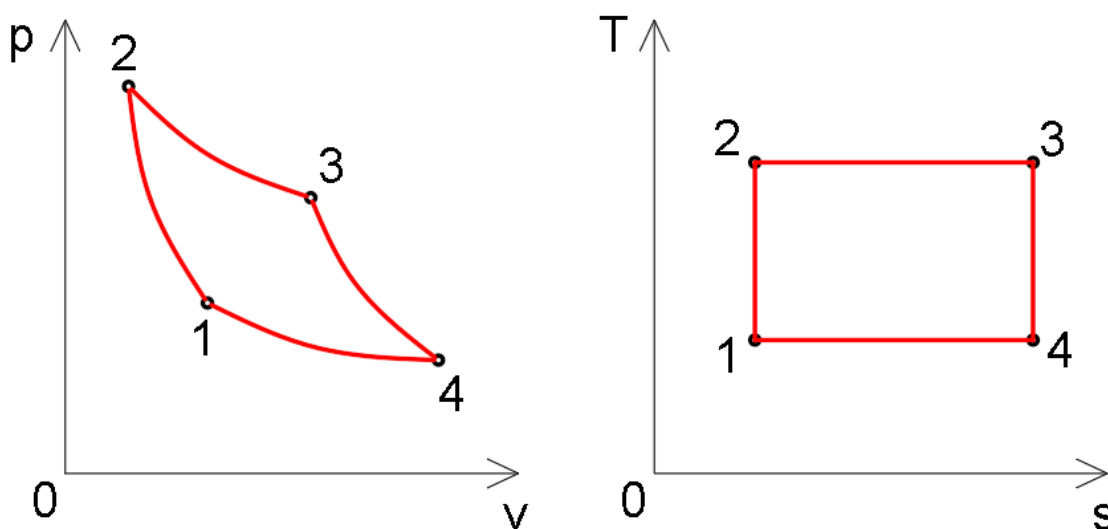
Carnatův oběh se skládá ze 4 dějů které jdou vždy ve stejném pořadí, nezáleží však, který bod je považován za první. Pro tento příklad platí:

1->2 Adiabatická komprese

2->3 Izotermická expanze

3->4 Adiabatická expanze

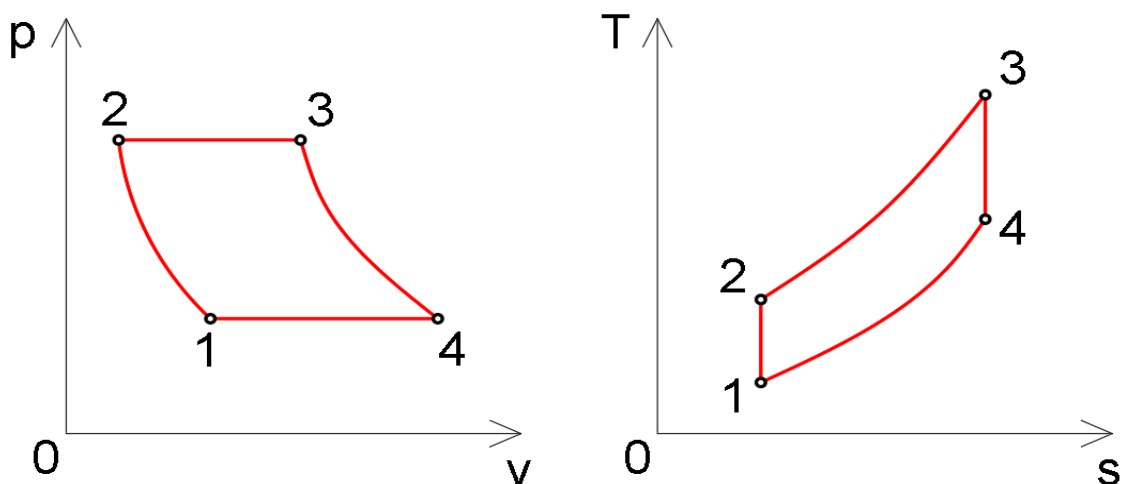
4->1 Izotermická komprese



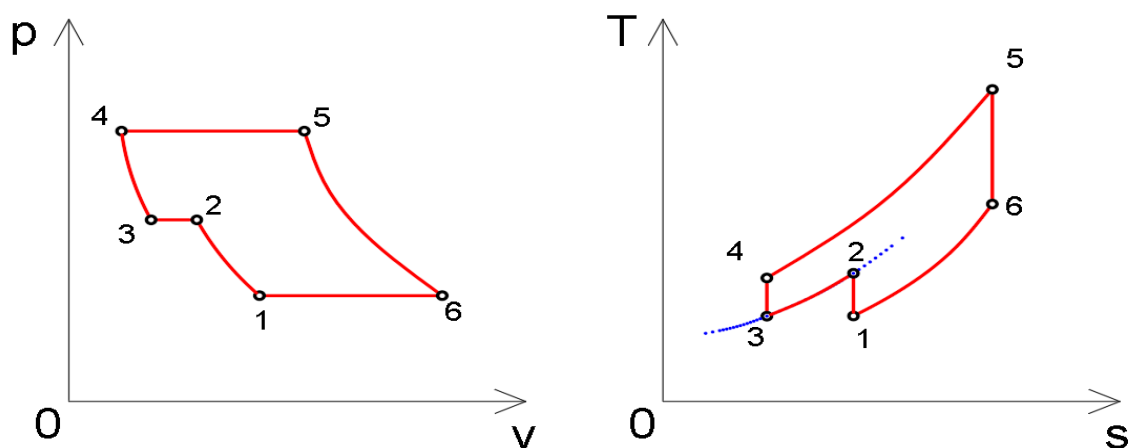
Obrázek 12 Carnatův cyklus v p - v a T - s diagramu

6.2 Braytonův cyklus

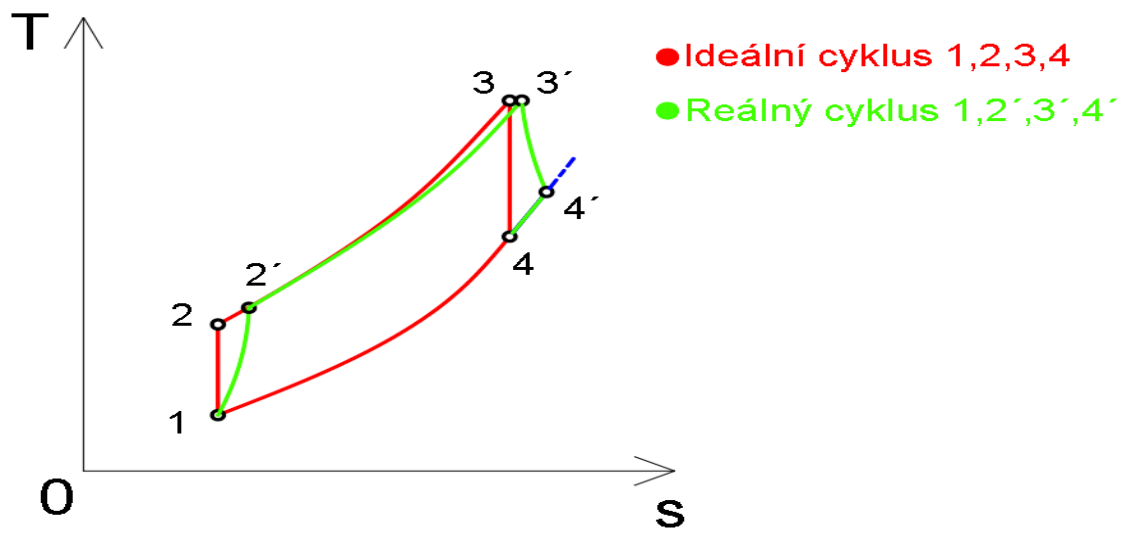
Braytonův cyklus je velmi hojně používaný cyklus díky jeho vysoké účinnosti, kterou je možné zvýšit například dělenou kompresí. Dělená komprese je proces, kdy nedochází ke stlačení na požadovaný tlak během jednoho děje, ale během dvou a více kroků, kdy se zde střídá komprese a chlazení, viz obr. 15. K ideální účinnosti, kterou by poskytoval cyklus pracující za ideálních podmínek se lze díky dělené kompresy, či analogicky dělené expanzi přiblížit téměř úplně. Problém však činí ekonomická stránka věci, a proto je nutné vždy vycházet z ekonomické kalkulace pro to, kdy se nám zvýšení tepelné účinnosti v porovnání s cenou komponent, potřebným k uskutečnění těchto kroků. To vše však platí za ideálních podmínek, v reálném světě vypadá Braytonův oběh v T-s diagramu spíše Viz Obr 16, do výpočtu s reálnými ztrátami vstupuje mnoho proměnných, které nejsou pro výpočty v této práci k dispozici a proto se ve výpočtu omezíme jen na ztráty, které známe a těmi jsou Účinnost kompresorů a turbíny.



Obrázek 13 Braytonův cyklus v p-v a T-s diagramu



Obrázek 14 Braytonův cyklus s dělenou kompresí v p-v a T-s



Obrázek 15 Reálný Braytonův cyklus

7 Výpočet

7.1 Návrh základního výpočtového modelu

Jakožto první výpočtový model zde volím jednoduchý cyklus, ve kterém není žádná dělená komprese či expanze a to z toho důvodu, aby bylo s čím porovnávat případné komplexnější systémy.

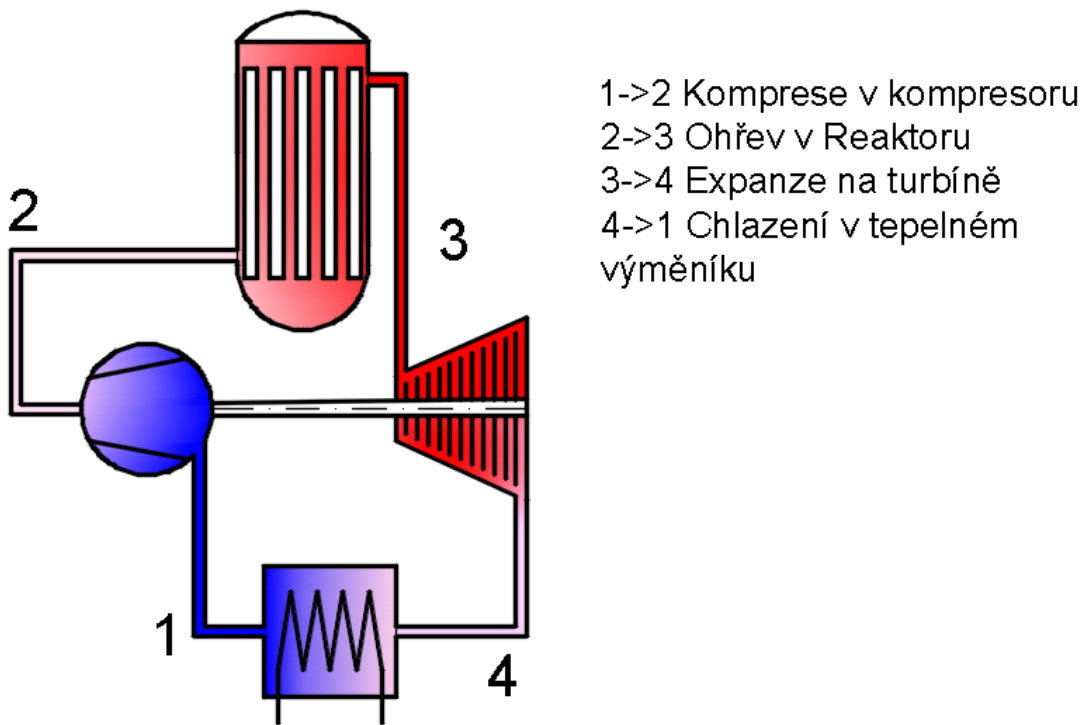
Zadané hodnoty jsou do velké míry inspirované reaktorem GTHT300C.

Zadané hodnoty			
Název veličiny	Značení	Hodnota	Jednotka
Nejnižší teplota cyklu	T_{\min}	250	°C
Teplota na vstupu do reaktoru	T_{vstupu}	580	°C
Maximální teplota cyklu	T_{\max}	900	°C
Maximální tlak cyklu	p_{\max}	7	MPa
Tepelný výkon reaktoru	P	600	MW
Účinnost kompresoru	η_k	0.97	-
Účinnost turbíny	η_t	0.95	-

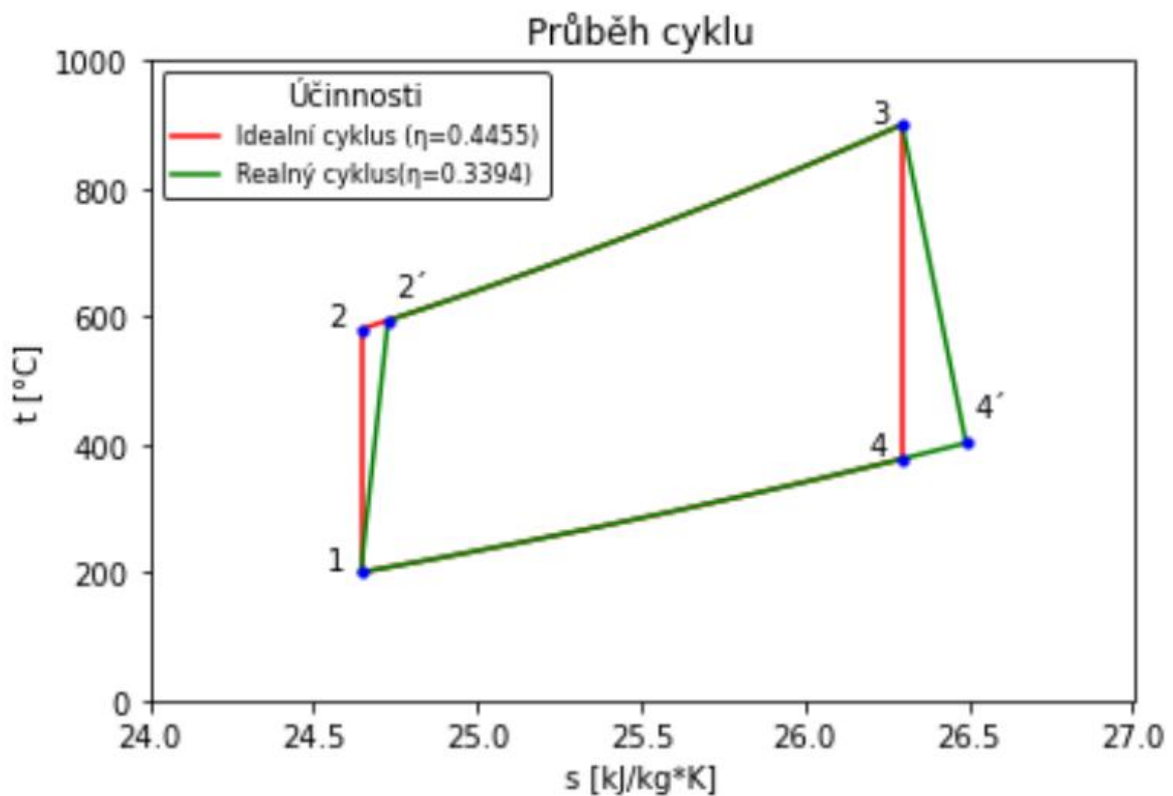
Při výpočtu bude volen postup výpočtu všech potřebných veličin v konkrétních částech cyklu průběhu v T-s diagramu pomocí programu Python a jeho knihoven, zejména knihovny Coolprop.

7.2 Výpočet s jednoduchého cyklu

Výpočet je popsán v příloze 1.



Obrázek 16 Schéma jednoduchého okruhu



Obrázek 17 Průběh jednoduchého cyklu v T-s diagramu

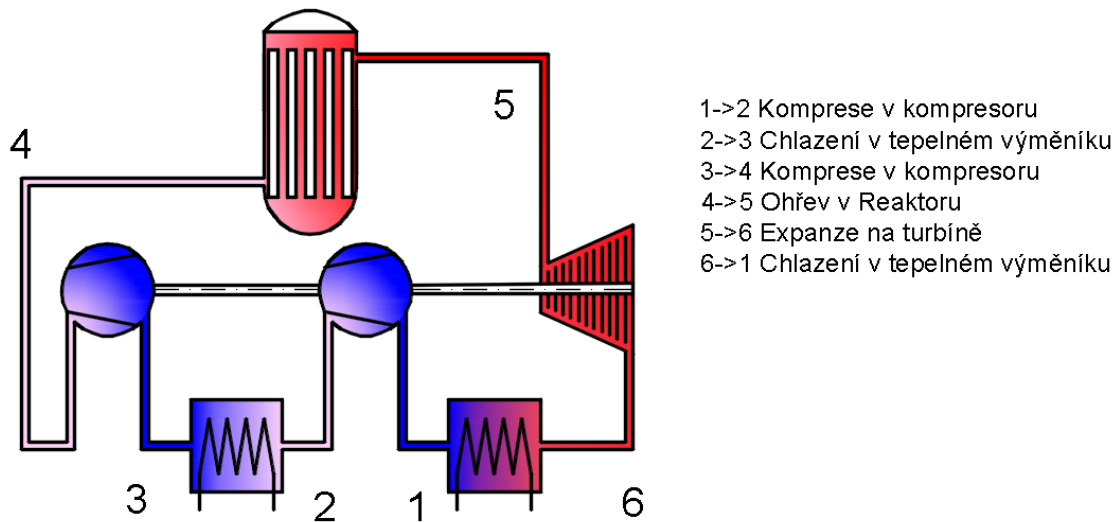
Vypočtené hodnoty v ideálním systému jednoduchý cyklus				
Část cyklu	Tlak p [MPa]	Teplota t [°C]	Entropie h [kJ/kg]	Entalpie s [kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹]
1	1.6	200	2467,46	24,64
2	7	580,0	4456,78	24,64
3	7	900,0	6117,47	26,30
4	1.6	377,4	3388,39	26,30

Vypočtené hodnoty v reálném systému jednoduchý cyklus				
Část cyklu	Tlak p [MPa]	Teplota t [°C]	Entropie h [kJ/kg]	Entalpie s [kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹]
1	1.6	200	2467,46	24,64
2	7	593,8	4528,38	24,72
3	7	900,0	6117,47	26,30
4	1.6	402,2	3517,14	26,49

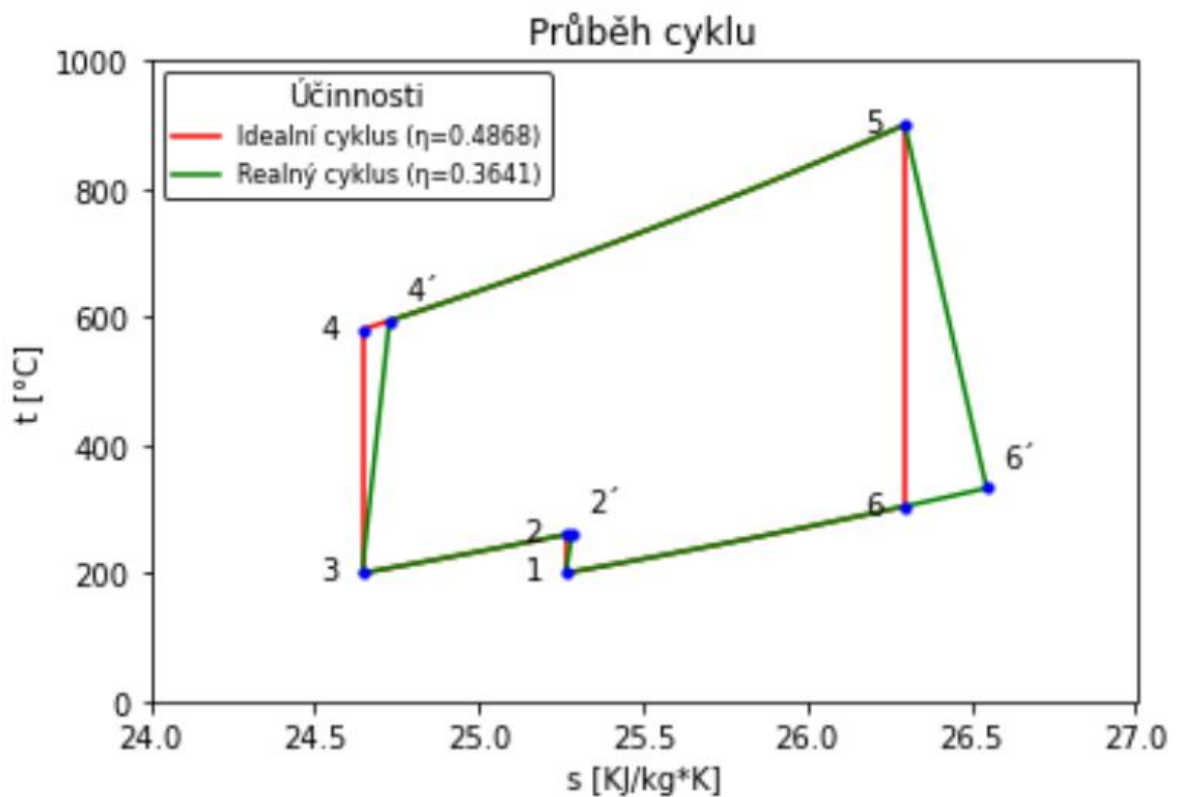
Výsledné hodnoty jednoduchého cyklu		
Druh cyklu	Ideální	Reálný
Získaná práce [kJ/kg] ($h_3 - h_4$)	2729,08	2600,33
Spotřebovaná práce [kJ/kg] ($h_2 - h_1$)	1989,32	2060,92
Dodané teplo [kJ/kg] ($h_3 - h_2$)	1660,69	1589,09
Účinnost cyklu [%]	44,55	33,94

7.3 Výpočet cyklu s dělenou kompresí

Při výpočtu s dělenou kompresí přidáme kompresor s mezi chlazením, cílem je zvýšení účinnosti. Míru zvýšení účinnosti ověříme výpočtem. Cílem je překonat účinnost 33.94% pro případ reálného cyklu. Celkový výpočet je popsán v příloze 2.



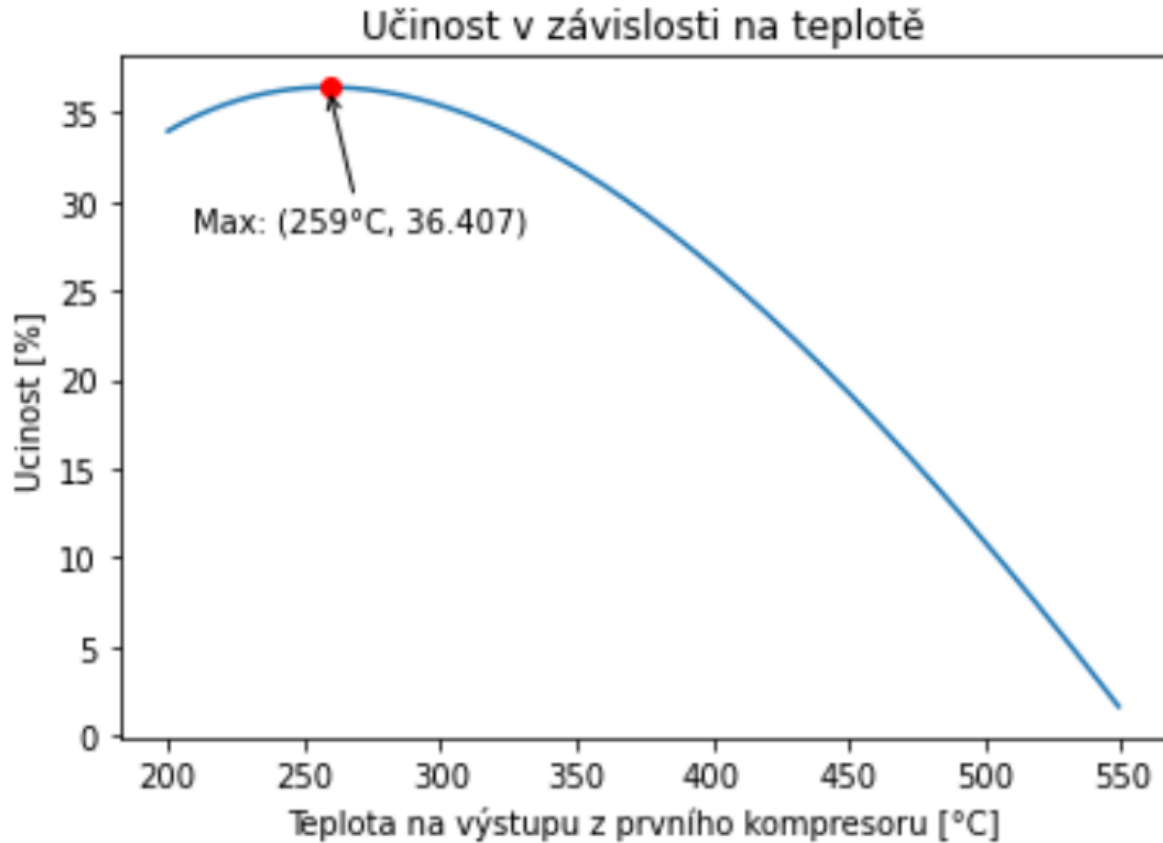
Obrázek 18 Schéma okruhu s dělenou kompresí



Obrázek 19 Průběh cyklu s dělenou kompresí v T-s diagramu

7.3.1 Stanovení vhodné teploty po první kompresy

Vzhledem ke spjatosti veličin tlaku a teploty volíme možnost, ve které hledáme ideální teplotu na výstupu prvního kompresoru. Celkový výpočet v příloze 3.



Obrázek 20 Graf závislosti mezní teploty a účinnosti

Na základě výpočtu nám vychází teplota na výstupu z prvního kompresoru 259°C s nejvyšší účinností 36,41%, čímž se splnila naše podmínka účinnosti vyšší než 33,94%, která náleží cyklu bez dělené komprese.

Vypočtené hodnoty v ideálním systému cyklus s dělenou kompresí				
Část cyklu	Tlak p [MPa]	Teplota t [°C]	Entropie h [kJ/kg]	Entalpie s [kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹]
1	1.2	200,00	2466,15	25,25
2	1.6	259,00	2773,81	25,25
3	1.6	200,00	2467,46	24,64
4	7.0	580,00	4456,78	24,64
5	7.0	900,00	6117,47	26,30
6	1.2	305,24	3012,58	26,30

Vypočtené hodnoty v reálném systému cyklus s dělenou kompresí				
Část cyklu	Tlak p [MPa]	Teplota t [°C]	Entropie h [kJ/kg]	Entalpie s [kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹]
1	1.2	200,00	2466,15	25,25
2	1.6	261.05	2784,45	25,27
3	1.6	200,00	2467,46	24,64
4	7.0	593,80	4528,38	24,73
5	7.0	900,00	6117,47	26,30
6	1.2	333,57	3015,71	26,54

7.3.2 Výpočet účinnosti cyklu

$$\eta_{\text{cyklu}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}}$$

Výsledné hodnoty cyklu s dělenou kompresí		
Druh cyklu	Ideální	Reálný
Získaná práce [kJ/kg] $w_t = (h_5 - h_6)$	3104,89	3101,76
Spotřebovaná práce [kJ/kg] $w_k = (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)$	2296,98	2379,22
Dodané teplo [kJ/kg] $q_{in} = (h_5 - h_4)$	1660,69	1589,09
Odvedené teplo [kJ/kg] $q_{out} = (h_6 - h_1) + (h_2 - h_3)$	852,78	866,55
Účinnost cyklu η_{cyklu} [%]	48,65	36,41

7.4 Výpočet hmotnostního toku chladiva

Ze známé účinnosti cyklu je nyní možné spočítat hmotnostní tok potřebný k odvedení tepla z reaktoru.

$$\dot{m} = \frac{P}{(c_p \cdot (t_5 - t_4))} = \frac{600\,000\,000}{5190 \cdot (900 - 593,8)} = 377,55 \text{ kg/s}$$

Potřebný hmotnostní průtok chladiva je 377,55 kg/s

7.5 Výpočet výkonu turbíny

$$P_t = \dot{m} \cdot (h_{5skut} - h_{6skut}) = 377,55 \cdot (6117,47 - 3015,71) \cdot 10^3 = 1\,116,77 \text{ MW}$$

Výkon turbíny je 1 116,77 MW

7.6 Výpočet výkon kompresorů

$$P_k = \dot{m} \cdot w_k = 377,55 \cdot 2379,22 \cdot 10^3 = 898,27 \text{ MW}$$

Výkon spotřebovaný na kompresorech je 898,27 MW

7.7 Získávaný elektrický výkon

$$P_{\text{celkový}} = P_t - P_k = 1\,116,77 - 898,27 = 218,5 \text{ MW}$$

Celkový získávaný elektrický výkon je 218,5 MW

7.8 Rekapitulace hodnot v reálném cyklu

Rekapitulace hodnot reálného cyklu	
Veličina	Hodnota
Tepelný výkon reaktoru	600 MW
Teplota na vstupu do turbíny	900 °C
Teplota na výstupu z turbíny	333,57 °C
Tlak na vstupu do turbíny	7 MPa
Tlak na výstupu do turbíny	1,2 MPa
Teplota po první kompresy	261,05 °C
Tlak po první kompresy	1,6 MPa
Výkon turbíny	1 116,77 MW
Příkon kompresorů	898,27 MW
Elektrický výkon	218,5 MW
Hmotnostní průtok He	377,55 kg/s
Účinnost cyklu bez dělené komprese	33,94 %
Účinnost cyklu s dělenou kompresí	36,41 %

8 Závěr

Výpočty prokazují, že takovéto provedení cyklu je z hlediska termodynamiky proveditelné. Přidání dělené komprese má pozitivní vliv na účinnost, kdy v našem případě se účinnost cyklu zvedla z 33,94 % o téměř 2,5 % na 36,41 %. Větší účinnosti by bylo teoreticky možné dosáhnout přidáním dalšího stupně dělené komprese, nebo přidáním dělené expanze. Pro takovýto model by se však musel upravit také samotný výpočet. Nastává zde pak ekonomická otázka na to, zda se přidání dalších prvků do systému vyplatí. To vše však za předpokladu, že nedochází k dalším ztrátám než k těm na turbíně a kompresoru. Další ztráty nebyli ve výpočtu zohledňovány pro jejich náročnou aplikaci ve výpočtu.

Pro dostatečný odvod tepla je nutno zajistit hmotnostní tok Helia aktivní zónou alespoň 377,55kg/s, což nám spotřebuje 898,27 MW výkonu z turbíny, díky čemuž následně na turbíně získáváme 218,5 MW elektrického výkonu. To vše je za předpokladu, že neuvažujeme žádné další ztráty.

Výpočty potvrdili, že cyklus je termodynamicky možný, nastává zde však problém s materiály, které budou muset podstupovat velmi vysoké teploty až 900 °C. Nutnost použití takovýchto materiálů má za následek nárůst pořizovacích cen a cen za údržbu, což se nám musí také promítnout do ekonomické kalkulace.

Výsledné hodnoty cyklu	
Účinnost získaná dělenou kompresí	2,5%
Hmotnostní tok Helia	377,55kg/s
Elektrický výkon	218,5 MW

Zbylé vypočtené hodnoty jsou shrnuty v tabulce Rekapitulace hodnot reálného cyklu na str. 49.

Seznam použité literatury

- [1] Advances in small modular reactor technology developments 2018 edition : a supplement to: IAEA advanced reactors information system (ARIS), IAEA Viena, 2020
- [2] BEČVÁŘ, Josef. Jaderné elektrárny. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [3] Klik F., Daliba J.: Jaderná energetika. ČVUT v Praze. 2002
- [4] Advances in small modular reactor technology developments 2020 edition : a supplement to: IAEA advanced reactors information system (ARIS), IAEA Viena, 2020
- [5] Status report 101 - Gas Turbine High Temperature Reactor (GTHTR300C). IAEA. 22.
- [6] BELL, I. H., WRONSKI, J., QUOILIN, S., & LEMORT, V. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. Industrial & Engineering Chemistry Research [online]. 2014, 53(6), 2498–2508 [vid. 2019-05-10]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie4033999

Seznam příloh

Příloha 1 program pro výpočet jednoduchého cyklu

Příloha 2 program pro výpočet cyklu s dělenou kompresí

Příloha 3 program pro získání ideální teploty

A. Příloha 1 program pro výpočet jednoduchého cyklu

```
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

#Vstupní hodnoty
t_vstupu =580 #teplota plynu na vstupu do reaktoru
t_max =900 #teplota na výstupu z reaktoru
t_min = 200 #miminální teplota v cyklu
p_max = 7 #max tlak cyklu
nykompresoru = 0.97 #účinnost kompresoru
nyturbiny = 0.95 #účinnost turbíny
kapa = 1.67 #plynová konstanta

#Přepočet hodnot na správné jednotky
t_min = t_min+273.15
t_vstupu = t_vstupu + 273.15
t_max = t_max+273.15
p_max = p_max * 1e6
Cp =5190

#bod 2
p2 = p_max
t2 = t_vstupu
```

s2 = PropsSI('S','T',t2, 'P',p2,'He')

h2 = PropsSI ('H','P',p2,'S',s2,'He')

#bod 1

s1 = s2

t1 = t_min

p1 = PropsSI ('P','T',t1,'S',s1,'He')

h1 = PropsSI('H','S',s1, 'P',p1,'He')

#bod 3

p3 = p_max

t3 = t_max

s3 = PropsSI ('S','T',t3, 'P',p3,'He')

h3 = PropsSI ('H','P',p3,'T',t3,'He')

#bod 4

p4 = p1

s4 = s3

t4 = PropsSI ('T','P',p4,'S',s4,'He')

h4 = PropsSI ('H','P',p4,'S',s4,'He')

#vypocet ucinosti

#idealni ucinost

```
n_ideal=1-(t1/t_max)
```

```
#vypocitana ucinost ideal
```

```
def ucinost(h1,h2,h3,h4):
```

```
    Q_in = h3-h2
```

```
    Q_out = h4-h1
```

```
    n_real = (Q_in - Q_out)/Q_in
```

```
    return n_real
```

```
print('ucinsot je',ucinost(h1, h2, h3, h4))
```

```
#Výpočet s účinností real
```

```
m = (kapa-1) / kapa
```

```
epsilon = p2/p1
```

```
zavorka1 = 1+(epsilon**m -1)/nykompresoru
```

```
zavorka2 = 1-(1-1/epsilon**m)*nyturbiny
```

```
t2skut = t1* zavorka1
```

```
t4skut = t3 * zavorka2
```

```
s2skut = PropsSI('S','T',t2skut, 'P',p2,'He')
```

```
s4skut = PropsSI ('S','T',t4skut, 'P',p4,'He')
```

```
h2skut = PropsSI ('H','P',p2,'S',s2skut,'He')
```

```
h4skut = PropsSI ('H','P',p4,'S',s4skut,'He')
```

```
def ucinostreal(h1,h2skut,h3,h4skut):
```

```
    Q_in = h3-h2skut
```

```

Q_out = h4skut-h1
n_skut = (Q_in - Q_out)/Q_in
return n_skut
print('ucinsot skut je',ucinostreal(h1, h2skut, h3, h4skut))

# vykreslovani grafu
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
ideal = color = 'r'
real = color = 'g'
ax.set_xlim (24,27)
ax.set_ylim (0,t3-273.15+100)

tlak = [p1,p2,p3,p4]

#izoentropa 1-2 ideal
ax.plot([s1/1e3,s2/1e3],[t1-273.15,t2-273.15],ideal)

#izoentropa 1-2 real
ax.plot([s1/1e3,s2skut/1e3],[t1-273.15,t2skut-273.15],real)

#izobara 2-3 ideal
t_aktual2 = np.arange(t2,t3,1)
s2_3 = PropsSI ('S','P',p2,'T',t_aktual2,'He')
ax.plot(s2_3/1e3, t_aktual2-273.15,ideal)

```

```

#izobara 2-3 real
t_aktual2 = np.arange(t2skut,t3,1)
s2_3 = PropsSI ('S','P',p2,'T',t_aktual2,'He')
ax.plot(s2_3/1e3, t_aktual2-273.15,real)

#izoentropa 3 -4 ideal
ax.plot([s3/1e3,s4/1e3],[t3-273.15,t4-273.15],ideal)
#izoentropa 3 -4real
ax.plot([s3/1e3,s4skut/1e3],[t3-273.15,t4skut-273.15],real)

##izobara 4-1 ideal
t_aktual4 = np.arange(t1,t4,1)
s4_1 = PropsSI ('S','P',p4,'T',t_aktual4,'He')
ax.plot(s4_1/1e3, t_aktual4-273.15,ideal)
##izobara 4-1 real
t_aktual4 = np.arange(t1,t4skut,1)
s4_1 = PropsSI ('S','P',p4,'T',t_aktual4,'He')
ax.plot(s4_1/1e3, t_aktual4-273.15,real)

#popis bodů
x = [s1,s2,s3,s4]
xx = [s2skut,s4skut]
y = [t1-273.15,t2-273.15,t3-273.15,t4-273.15]
yy = [t2skut-273.15,t4skut-273.15]
popisek = ['1', '2', '3', '4']

```

```
popisekreal = ['2','4']
```

```
for i, label in enumerate(popisek):
```

```
    plt.scatter(x[i]/1e3, y[i], s=10, c='b', marker='o',zorder=2)
```

```
    plt.text(x[i]/1e3-0.1, y[i]+5, popisek[i])
```

```
for u, label in enumerate(popisekreal):
```

```
    plt.scatter(xx[u]/1e3, yy[u], s=10, c='b', marker='o',zorder=2)
```

```
    plt.text(xx[u]/1e3+0.025, yy[u]+40, popisekreal[u])
```

```
#legenda
```

```
leg = plt.legend(title='Účinnosti', loc='upper left',prop={'size': 8}, labels=['Ideální cyklus  
( $\eta=0.4f$ )%ucinnost(h1, h2, h3, h4),'Realný cyklus( $\eta=0.4f$ )%ucinnost(h1, h2skut, h3,  
h4skut)])
```

```
leg.get_frame().set_edgecolor('black')
```

```
ax.set_xlabel('s [kJ/kg*K]')
```

```
ax.set_ylabel('t [°C]')
```

```
ax.set_title('Průběh cyklu')
```

```
plt.show()
```


B. Příloha 2 program pro výpočet cyklu s dělenou kompresí

```
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

t_vstupu = 580 #teplota plynu na vstupu do reaktoru
t_max = 900 #teplota na výstupu z reaktoru
t_min = 200 #miminální teplota v cyklu
p_max = 7 #max tlak cyklu
nykompresoru = 0.97 #účinnost kompresoru
nyturbiny = 0.95 #účinnost turbíny
kapa = 1.67 #plynová konstanta
P = 6*1e8
#Plynová konstanta helia
Cp = PropsSI ('C','P',p_max*1e6,'T',t_max+273.15,'He')

#funkce výpočtu jednotlivých bodů cyklu
def vypocet_reaktoru(t_min,t_max,t_vstupu,p_max):
    t_min = t_min + 273.15
    t_max = t_max +273.15
    t_vstupu = t_vstupu + 273.15
    p_max = p_max * 1e6
```

#bod 4

p4 = p_max

t4 = t_vstupu

s4 = PropsSI('S','P',p4,'T',t4,'He')

h4 = PropsSI('H','P',p4,'T',t4,'He')

#bod 5

p5 = p_max

t5 = t_max

s5 = PropsSI('S','P',p5,'T',t5,'He')

h5 = PropsSI('H','P',p5,'T',t5,'He')

#bod 3

t3 = t_min

s3 = s4

p3 = PropsSI('P','T',t3,'S',s3,'He')

h3 = PropsSI('H','T',t3,'S',s3,'He')

#bod 2

p2 = p3

t2 = 259+273.15

s2 = PropsSI('S','T',t2,'P',p2,'He')

h2 = PropsSI('H','T',t2,'P',p2,'He')

#bod 1

t1 = t_min

s1 = s2

p1 = PropsSI('P','T',t1, 'S',s1,'He')

h1 = PropsSI('H','T',t1, 'S',s1,'He')

#bod 6

p6 = p1

s6 = s5

t6 = PropsSI ('T','P',p6,'S',s6,'He')

h6 = PropsSI ('H','P',p6,'S',s6,'He')

#hodnoty v realných bodech

m = (kapa-1) / kapa

epsilon1 = p2/p1

epsilon2 = p4/p3

epsilon3 = p5/p6

zavorka1 = 1+(epsilon1**m -1)/nykompresoru

zavorka2 = 1+(epsilon2**m -1)/nykompresoru

zavorka3 = 1-(1-1/epsilon3**m)*nyturbiny

t2skut = t1* zavorka1

t4skut = t3* zavorka2

t6skut = t5* zavorka3

s2skut = PropsSI('S','T',t2skut, 'P',p2,'He')

s4skut = PropsSI ('S','T',t4skut, 'P',p4,'He')

s6skut = PropsSI('S','T',t6skut, 'P',p6,'He')

```
h2skut = PropsSI ('H','P',p2,'S',s2skut,'He')
```

```
h4skut = PropsSI ('H','P',p4,'S',s4skut,'He')
```

```
h6skut = PropsSI ('H','P',p6,'S',s6skut,'He')
```

```
t = [t1,t2,t3,t4,t5,t6]
```

```
p = [p1,p2,p3,p4,p5,p6]
```

```
h = [h1,h2,h3,h4,h5,h6]
```

```
s = [s1,s2,s3,s4,s5,s6]
```

```
t_skut = [t1,t2skut,t3,t4skut,t5,t6skut]
```

```
h_skut = [h1,h2skut,h3,h4skut,h5,h6skut]
```

```
s_skut = [s1,s2skut,s3,s4skut,s5,s6skut]
```

```
return t,p,h,s,t_skut,h_skut,s_skut
```

```
t,p,h,s,t_skut,h_skut,s_skut = vypocet_reaktoru(t_min,t_max,t_vstupu,p_max)
```

```
#Výpočet účinnosti
```

```
def ucinost(h1,h2,h3,h4,h5,h6):
```

```
    Q_in = h5-h4
```

```
    Q_out1 = h6-h1
```

```
    Q_out2 = h2-h3
```

```
    Q_out = Q_out1 + Q_out2
```

```
    n_real = (Q_in-Q_out)/Q_in
```

```
    return n_real
```

```
print('ucinsot ideal je',ucinost(h[0], h[1], h[2], h[3], h[4], h[5]))
```

```
print('ucinsot skut je',ucinnost(h_skut[0], h_skut[1], h_skut[2], h_skut[3], h_skut[4],
h_skut[5]))
```

```
#Kreslení grafu
```

```
fig = plt.figure()
```

```
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
```

```
ideal = color = 'r'
```

```
real = color = 'g'
```

```
ax.set_xlim (24,27)
```

```
ax.set_ylim (0,t[4]-273.15+100)
```

```
#izoentropa 1-2 ideal
```

```
ax.plot([s[0]/1e3,s[1]/1e3],[t[0]-273.15,t[1]-273.15],ideal)
```

```
#izoentropa 1-2 real
```

```
ax.plot([s_skut[0]/1e3,s_skut[1]/1e3],[t_skut[0]-273.15,t_skut[1]-273.15],real)
```

```
#izobara 2-3 ideal
```

```
t_aktual2 = np.arange(t[2],t[1],1)
```

```
s2_3 = PropsSI ('S','P',p[1],'T',t_aktual2,'He')
```

```
ax.plot(s2_3/1e3, t_aktual2-273.15,ideal)
```

```
#izobara 2-3 real
```

```
t_aktual2skut = np.arange(t_skut[2],t_skut[1],1)
```

```
s2_3skut = PropsSI ('S','P',p[1],'T',t_aktual2skut,'He')
```

```
ax.plot(s2_3skut/1e3, t_aktual2skut-273.15,real)
```

```
#izoentropa 3-4 ideal
```

```
ax.plot([s[2]/1e3,s[3]/1e3],[t[2]-273.15,t[3]-273.15],ideal)
```

```
#izoentropa 3-4 real
```

```
ax.plot([s_skut[2]/1e3,s_skut[3]/1e3],[t_skut[2]-273.15,t_skut[3]-273.15],real)
```

```
#izobara 4-5 ideal
```

```
t_aktual4 = np.arange(t[3],t[4],1)
```

```
s4_5 = PropsSI ('S','P',p[3],'T',t_aktual4,'He')
```

```
ax.plot(s4_5/1e3, t_aktual4-273.15,ideal)
```

```
#izobara 4-5 real
```

```
t_aktual4skut = np.arange(t_skut[3],t_skut[4],1)
```

```
s4_5skut = PropsSI ('S','P',p[3],'T',t_aktual4skut,'He')
```

```
ax.plot(s4_5skut/1e3, t_aktual4skut-273.15,real)
```

```
#izoentropa 5-6 ideal
```

```
ax.plot([s[4]/1e3,s[5]/1e3],[t[4]-273.15,t[5]-273.15],ideal)
```

```
#izoentropa 5-6 real
```

```
ax.plot([s_skut[4]/1e3,s_skut[5]/1e3],[t_skut[4]-273.15,t_skut[5]-273.15],real)
```

```
#izobara 6-1 ideal
```

```

t_aktual6 = np.arange(t[0],t[5],1)
s6_1 = PropsSI ('S','P',p[5],'T',t_aktual6,'He')
ax.plot(s6_1/1e3, t_aktual6-273.15,ideal)

#izobara 6-1 real
t_aktual6skut = np.arange(t_skut[0],t_skut[5],1)
s6_1skut = PropsSI ('S','P',p[5],'T',t_aktual6skut,'He')
ax.plot(s6_1skut/1e3, t_aktual6skut-273.15,real)

x = [s[0],s[1],s[2],s[3],s[4],s[5]]
x_skut = [s_skut[1],s_skut[3],s_skut[5]]

y = [t[0]-273.15,t[1]-273.15,t[2]-273.15,t[3]-273.15,t[4]-273.15,t[5]-273.15]
y_skut = [t_skut[1]-273.15,t_skut[3]-273.15,t_skut[5]-273.15]

#Popis bodů
popisek = ['1', '2', '3', '4', '5', '6']
popisekreal = ['2', '4', '6']

for i, label in enumerate(popisek):
    plt.scatter(x[i]/1e3, y[i], s=10, c='b', marker='o',zorder=2)
    plt.text(x[i]/1e3-0.125, y[i]+-10, popisek[i])

for u, label in enumerate(popisekreal):
    plt.scatter(x_skut[u]/1e3, y_skut[u], s=10, c='b', marker='o',zorder=2)
    plt.text(x_skut[u]/1e3+0.05, y_skut[u]+35, popisekreal[u])

```

```

#Popis os
ax.set_xlabel('s [KJ/kg*K]')
ax.set_ylabel('t [°C]')
ax.set_title('Průběh cyklu')

#Legenda
leg = plt.legend(title='Účinnosti', loc='upper left',prop={'size': 8}, labels=['Ideální cyklus
(η=%.4f)%ucinnost(h[0], h[1], h[2], h[3], h[4], h[5]),'Realný cyklus
(η=%.4f)%ucinnost(h_skut[0], h_skut[1], h_skut[2], h_skut[3], h_skut[4], h_skut[5])])
leg.get_frame().set_edgecolor('black')

#Výpočet hm. toku
M = P / (Cp * (t_skut[4]-t_skut[3]))
print('hm. tok je',M)

#Výpočet výkonu turbíny
vykonjinak = M * (Cp * (t_skut[4]-t_skut[5]) * nyturbiny) * ucinost(h_skut[0], h_skut[1],
h_skut[2], h_skut[3], h_skut[4], h_skut[5])
print(vykonjinak/1e6)

```


C. Příloha 3 program pro získání ideální teploty

```
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

t_vstupu =580
t_max =900
t_min = 200
p_max = 7

nykompresoru = 0.97
nyturbiny = 0.95
kapa = 1.67

#vypocet bodu v idealnim cyklu
def vypocet_reaktoruideal(t_min,t_max,t_vstupu,p_max,promenateplota):
    t_min = t_min + 273.15
    t_max = t_max +273.15
    t_vstupu = t_vstupu + 273.15
    p_max = p_max * 1e6
    promenateplota = promenateplota+273.15

    #bod 4
    p4 = p_max
    t4 = t_vstupu
    s4 = PropsSI ('S','P',p4,'T',t4,'He')
```

h4 = PropsSI ('H','P',p4,'T',t4,'He')

#bod 5

p5 = p_max

t5 = t_max

s5 = PropsSI ('S','P',p5,'T',t5,'He')

h5 = PropsSI ('H','P',p5,'T',t5,'He')

#bod 3

t3 = t_min

s3 = s4

p3 = PropsSI('P','T',t3,'S',s3,'He')

h3 = PropsSI('H','T',t3,'S',s3,'He')

#bod 2

p2 = p3

t2 = promenateplota

s2 = PropsSI ('S','T',t2, 'P',p2,'He')

h2 = PropsSI ('H','T',t2, 'P',p2,'He')

#bod 1

t1 = t_min

s1 = s2

p1 = PropsSI('P','T',t1, 'S',s1,'He')

h1 = PropsSI('H','T',t1, 'S',s1,'He')

```
#bod 6  
p6 = p1  
s6 = s5  
t6 = PropsSI ('T','P',p6,'S',s6,'He')  
h6 = PropsSI ('H','P',p6,'S',s6,'He')
```

```
Q_in = h5-h4  
Q_out1 = h6-h1  
Q_out2 = h2-h3  
Q_out = Q_out1 + Q_out2  
n_real = (Q_in-Q_out)/Q_in  
return n_real
```

```
#vypocet bodu v realnem cyklu
```

```
def vypocet_reaktorureal(t_min,t_max,t_vstupu,p_max,promenateplota):
```

```
    t_min = t_min + 273.15  
    t_max = t_max +273.15  
    t_vstupu = t_vstupu + 273.15  
    p_max = p_max * 1e6  
    nykompresoru = 0.97  
    nyturbiny = 0.95  
    kapa = 1.67  
    promenateplota = promenateplota+273.15
```

```
#bod 4
```

```
p4 = p_max
```

```
t4 = t_vstupu
s4 = PropsSI('S','P',p4,'T',t4,'He')
h4 = PropsSI('H','P',p4,'T',t4,'He')
```

```
#bod 5
p5 = p_max
t5 = t_max
s5 = PropsSI('S','P',p5,'T',t5,'He')
h5 = PropsSI('H','P',p5,'T',t5,'He')
```

```
#bod 3
t3 = t_min
s3 = s4
p3 = PropsSI('P','T',t3,'S',s3,'He')
h3 = PropsSI('H','T',t3,'S',s3,'He')
```

```
#bod 2
p2 = p3
t2 = promenateplota
s2 = PropsSI('S','T',t2, 'P',p2,'He')
h2 = PropsSI('H','T',t2, 'P',p2,'He')
```

```
#bod 1
t1 = t_min
s1 = s2
p1 = PropsSI('P','T',t1, 'S',s1,'He')
```

$$h1 = \text{PropsSI}('H','T',t1, 'S',s1, 'He')$$

#bod 6

$$p6 = p1$$

$$s6 = s5$$

$$t6 = \text{PropsSI}('T','P',p6, 'S',s6, 'He')$$

$$h6 = \text{PropsSI}('H','P',p6, 'S',s6, 'He')$$

#hodnoty v realných bodech

$$m = (\text{kapa}-1) / \text{kapa}$$

$$\text{epsilon1} = p2/p1$$

$$\text{epsilon2} = p4/p3$$

$$\text{epsilon3} = p5/p6$$

$$\text{zavorka1} = 1 + (\text{epsilon1}^{**m} - 1) / \text{nykompresoru}$$

$$\text{zavorka2} = 1 + (\text{epsilon2}^{**m} - 1) / \text{nykompresoru}$$

$$\text{zavorka3} = 1 - (1 - 1 / \text{epsilon3}^{**m}) * \text{nyturbiny}$$

$$t2\text{skut} = t1 * \text{zavorka1}$$

$$t4\text{skut} = t3 * \text{zavorka2}$$

$$t6\text{skut} = t5 * \text{zavorka3}$$

$$s2\text{skut} = \text{PropsSI}('S','T',t2\text{skut}, 'P',p2, 'He')$$

$$s4\text{skut} = \text{PropsSI}('S','T',t4\text{skut}, 'P',p4, 'He')$$

$$s6\text{skut} = \text{PropsSI}('S','T',t6\text{skut}, 'P',p6, 'He')$$

$$h2\text{skut} = \text{PropsSI}('H','P',p2, 'S',s2\text{skut}, 'He')$$

$$h4\text{skut} = \text{PropsSI}('H','P',p4, 'S',s4\text{skut}, 'He')$$

```
h6skut = PropsSI ('H','P',p6,'S',s6skut,'He')
```

```
Q_in = h5-h4skut
```

```
Q_out1 = h6skut-h1
```

```
Q_out2 = h2skut-h3
```

```
Q_out = Q_out1 + Q_out2
```

```
n_ideal = (Q_in-Q_out)/Q_in
```

```
return n_ideal
```

```
#Kreslení
```

```
fig = plt.figure()
```

```
fig, ax = plt.subplots(1, 1)
```

```
x = np.arange(t_min,550,1)
```

```
y = vypocet_reaktoruideal(t_min, t_max,t_vstupu, p_max, x) * 100
```

```
ax.set_xlabel('Teplota na výstupu z prvního kompresoru [°C]')
```

```
ax.set_ylabel('Učinnost [%]')
```

```
ax.set_title('Učinnost v závislosti na teplotě')
```

```
#ax.plot (x,y)
```

```
x_real = np.arange(t_min,550,1)
```

```
y_real = vypocet_reaktoruideal(t_min, t_max,t_vstupu, p_max, x_real) * 100
```

```

ax.plot(x_real,y_real)

max_y = np.max(y)

max_x = x[np.argmax(y)]

#plt.plot(max_x, max_y, 'ro')

#plt.annotate(f'Max: ( {max_x:.0f}°C, {max_y:.3f})', xy=(max_x, max_y), xytext=(max_x -
50, max_y -8 ),

#         arrowprops=dict(facecolor='black', arrowstyle='->'))

max_y_real = np.max(y_real)

max_x_real = x[np.argmax(y_real)]

plt.plot(max_x_real, max_y_real, 'ro')

plt.annotate(f'Max: ( {max_x_real:.0f}°C, {max_y_real:.3f})', xy=(max_x_real,
max_y_real), xytext=(max_x_real - 50, max_y_real -8 ),

         arrowprops=dict(facecolor='black', arrowstyle='->'))

#ax.legend(labels=['Ideální účinnost','Reálná účinnost'],loc='lower left',prop={'size': 8})

plt.show()

```