



## **Bakalářská práce**

# **Koncepční návrh připojení kryosorpční vývěvy pro vysokoteplotní tokamaky**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Lukáš Neškudla**

*Vedoucí práce:*

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

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Koncepční návrh připojení kryosorpční vývěvy pro vysokoteplotní tokamaky

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Lukáš Neškudla</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S22000326
<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 vytvořit koncepční návrh vzorového technologického připojení kryosorpční vývěvy pro vysokoteplotní tokamaky. Základní parametry vychází z všeobecných požadavků na kryosorpční vývěvy v projektech jako jsou například ITER a EU DEMO, kde technologické připojení limitují zejména teploty panelu kryovývěvy a teploty okolí.

Jelikož v rámci provozu tokamaku ovlivňují prakticky všechny děje přímo nebo nepřímo správný provoz kryovývěvy, je pro tvorbu koncepčního návrhu nezbytné dostatečně podrobně nastudovat problematiku provozu tokamaků se zaměřením na projekty ITER a EU DEMO.

Pro tvorbu koncepčního návrhu připojení kryosorpční vývěvy v rámci vysokoteplotních aplikací je nutné posoudit možnosti aplikace stávajících komerčně dostupných kryovývěv a zhodnocení možností aplikace komerčních prvků pro čerpání kryokapalin.

Koncepční návrh by měl obsahovat:

- Volba potřebných teplotních úrovní
- Volba velikosti vzorku a definování okrajových podmínek pro vyhodnocení
- Návrh uspořádání technologického připojení kryosorpční vývěvy v místě průchodu stěnou tokamaku bez nutnosti řešení hrdel a zakončení zvolených potrubí.
- Volba materiálů, která bude přihlížet k vlivu silného magnetického pole. Koncepční návrh však nebude řešit problematiku pevnosti potrubí zatíženého magnetickým polem. Potrubí bude pouze dimenzováno pro zvolenou tlakovou úroveň.

*Rozsah grafických prací:* 40  
*Rozsah pracovní zprávy:* 40  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

[1] ŘÍPA, Milan. *Řízená termojaderná syntéza pro každého*. Praha: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, 2004. ISBN 80-902724-7-9.

[2] ŘÍPA, Milan. *Řízená termojaderná fúze – minulost, současnost a budoucnost*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06751-2.

*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

V Liberci dne 1. listopadu 2022

## 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.

## **Název bakalářské práce:**

Koncepční návrh připojení kryosorpční vývěvy pro vysokoteplotní tokamaky

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na vývoj funkční kryogenní vývěvy pro zařízení nazývané tokamak využívající termonukleární fúzi. Hlavním cílem bylo navrhnout a vyvinout kryogenní vývěvu, která je odolná vůči vysokým teplotám. Práce se soustředila na výběr správného typu, umístění a fungování dané vývěvy. Zahrnovala také zkoumání problematiky provozu tokamaků se zaměřením na projekty ITER a EU DEMO, a zhodnocení možnosti využití stávajících komerčně dostupných kryovývěv a čerpacích prvků pro tuto aplikaci. Hlavním úkolem bylo také navrhnout vhodné potrubní připojení pro přívod kryokapalin do vnitřních částí kryovývěvy, zajišťujících správnou funkci jevů kryokondenzace a kryosorpce. Výsledkem práce je konceptuální návrh a modifikace jak kryogenní vývěvy, tak potrubní části připojení pro danou aplikaci. Modifikované koncepce byly podloženy výpočty a modely.

**Klíčová slova:** tokamak, termojaderná fúze, divertor, sorpční kryovývěva, kryokondenzace, kryosorpce, kryokapalina, potrubí

## **Title of bachelor thesis:**

Conceptual design of cryo sorption vacuum pump connection for high temperature tokamaks

## **Annotation**

This bachelor's thesis focuses on the development of a functional cryogenic conduit for a device called a tokamak, which utilizes thermonuclear fusion. The main objective was to design and develop a cryogenic conduit that is resistant to high temperatures. This thesis concentrated on selecting the appropriate type, location, and functioning of the conduit. It also involved investigating the operational aspects of tokamaks, with a particular emphasis on projects such as ITER and EU DEMO, and evaluating the potential use of existing commercially available cryovessels and pumping components for this application. Another important task was to design a suitable pipeline connection for delivering cryogenic fluids to the internal parts of the cryogenic conduit, ensuring proper functioning of cryocondensation and cryosorption phenomena. The outcome of this work is a conceptual design and modifications of both the cryogenic conduit and the pipeline connection for the specified application. The modified concepts were supported by calculations and models.

**Keywords:** tokamak, thermonuclear fusion, divertor, sorption cryopump, cryocondensation, cryosorption, cryogenic fluid, pipeline

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval paní doc. Ing. Petře Dančové Ph.D. za korekturu a vedení práce a panu Ing. Ondřejovi Burianovi za ochotu a rady při výběru firmy, kde bylo téma práce zadáváno. Chci vyjádřit upřímné díky společnosti ATEKO a.s., zejména středisku točivých strojů, vedené panem Ing. Vladislavem Plašilem za umožnění realizace této bakalářské práce, odborné rady, poskytnuté důležité informace a příjemnou spolupráci. Mé studium by nemohlo být úspěšné bez mé rodiny, která mi neustále poskytuje podporu a motivaci. Jsou pro mě neocenitelnou oporou během celého studia.

## Obsah

Seznam vybraných použitých zkratk a symbolů .....	10
Seznam obrázků .....	12
1 Úvod .....	14
Teoretická část.....	15
2 Tokamak .....	15
2.1 Zrození tokamaku.....	15
2.2 Termojaderná fúze .....	15
2.3 Kontrola a vznik tokamakového plazmatu.....	16
2.4 Divertor .....	17
2.5 Základní principy fungování tokamaku .....	18
3 Vývěvy .....	20
3.1 Volba typu kryovývěvy .....	20
3.1.1 Kryosorpční vývěvy.....	20
3.1.2 Charakteristika kryosorpční vývěvy .....	20
3.1.3 Kryokondenzace .....	21
3.1.4 Kryosorpce.....	22
4 Konstrukce vývěv .....	24
4.1 Stavba obecné kryosorpční vývěvy.....	24
4.2 Umístění kryosorpční vývěvy .....	24
4.3 Čerpací proces obecné kryovývěvy .....	25
4.4 Porézní materiály .....	26
4.5 Aktivní uhlí .....	27
4.6 Pracovní režimy tokamaků.....	27
4.7 Regenerace kryosorpční vývěvy .....	27
5 Komerční příklady kryovývěv.....	29
5.1 Kryovývěva značky ULVAC .....	29
5.2 Kryovývěva značky Leybold .....	31
5.3 Vyhodnocení komerčně dostupných kryovývěv .....	33
6 Příklady z tokamaků.....	34
6.1 Ex-vessel kryovývěva pro ITER.....	34
6.2 In-vessel kryovývěva tokamaku HL-2M .....	36
6.3 In-vessel kryovývěva tokamaku DIII-D.....	37
6.4 In-vessel kryovývěva tokamaku ASDEX-Upgrade .....	38



6.5	Vyhodnocení kryogenních vývěv v tokamacích .....	38
7	Izolace.....	39
7.1	Kryogenní izolace .....	39
7.2	Vakuová izolace .....	40
7.3	Vakuová izolace s multivrstvou izolací .....	40
7.4	Komerční příklad multivrstvé izolace.....	40
8	Zdroje chladu.....	41
8.1	Zkapalňování plynu.....	41
	Experimentální část .....	43
9	Okrajové podmínky vyvíjené kryovývěvy a připojení .....	43
9.1	Prostorové podmínky .....	43
9.2	Teplotní podmínky .....	44
9.3	Tepelné podmínky.....	44
9.4	Vakuové podmínky .....	45
10	Tepelné stínění.....	46
10.1	Problematika přenosů tepla .....	46
11	Vstupní clona.....	48
12	Čerpací těleso .....	49
12.1	Aktivní část kryovývěvy – $^4\text{He}$ .....	49
12.2	Stínění aktivní části kryovývěvy – $\text{N}_2$ .....	50
13	Koncepční návrhy.....	51
13.1	První koncepční návrh.....	51
13.2	Modifikace vyvíjeného konceptu kryovývěvy .....	51
13.3	Volba materiálu.....	52
13.4	Koncepční návrhy potrubí.....	53
	13.4.1 První koncepce potrubní části.....	53
	13.4.2 Modifikace koncepce potrubní části .....	54
14	Výpočty a jejich teorie.....	55
14.1	Metodologie výpočtu .....	55
15	Závěr.....	65
15.1	Návrhy pro další zkoumání .....	66
	Seznam použité literatury .....	67

## Seznam vybraných použitých zkratek a symbolů

ITER	Mezinárodní termojaderný experimentální reaktor	
EU DEMO	Evropský demonstrační tokamak	
Tokamak	Toroidální komora s magnetickými cívkami	
NIST	Národního ústavu pro standardy a technologie	
$^3\text{He}$	Helium - 3	
$^4\text{He}$	Helium - 4	
$\text{H}_2$	Vodík	
$\text{D}_2$	Deuterium	
Ne	Neon	
$\text{N}_2$	Dusík	
$\text{H}_2\text{O}$	Voda	
$\text{CO}$	Oxid uhelnatý	
$\text{F}_2$	Fluor	
Ar	Argon	
LHe	Kapalné helium	
$\text{LN}_2$	Kapalný dusík	
GHe	Plynné helium	
$\text{GN}_2$	Plynný dusík	
T	Termodynamická teplota	[K]
r	Poloměr	[m]
Q	Zářivý tok	[W]
l	Délka	[m]
A	Průřez	[m <sup>2</sup> ]
S	Povrch	[m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon_p$	Emisivita povrchu	[-]
$\sigma$	Boltzmannova konstanta	[W/(m <sup>2</sup> ×K <sup>4</sup> )]
$p_{\text{krit}}$	Kritický tlak	[bar]
$T_{\text{krit}}$	Kritická teplota	[K]
p	Tlak	[bar]
t	Teplota	[°C]
r	Měrná plynová konstanta	[J/(kg×K)]
$\rho$ (ró)	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta$ (éta)	Dynamická viskozita	[Pa×s]
$\nu$	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /s]
P	Výkon	[W]
$D_o$	Průměr potrubí	[mm]
t	Tloušťka stěny potrubí	[mm]

$n$	Počet trubek	[ks]
$l_v$	Výparné teplo	[J/kg]
$d$	Průměr	[m]
DN	Světlost potrubí	[mm]
S	Průřez potrubí	[mm <sup>2</sup> ]
$m'$	Hmotností průtok	[g/s]
$V'$	Objemový průtok	[dm <sup>3</sup> /s]
$v_p$	Průměrná rychlost proudění	[m/s]
$D_i$	Vnitřní průměr/Světlost potrubí	[mm]
$l$	Délka úseku	[mm]
$\varepsilon$	Drsnost potrubí	[mm]
$k$	Relativní drsnost potrubí	[mm]
$w$	Rychlost proudění	[m/s]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
$\lambda$	Součinitel tření	[-]
$\Delta p$	Tlaková ztráta	[Pa]

## Seznam obrázků

<b>obr. 2-1</b>	– Základní schéma konstrukce reaktoru typu tokamak .....	16
<b>obr. 2-2</b>	Detailní schéma typické vakuové komory se spodním divertorem .....	18
<b>obr. 3-1</b>	- Teplota varu běžných plynů jako funkce tlaku .....	22
<b>obr. 3-2</b>	– Sorpční rovnováha pro helium na mikroporézním aktivovaném uhlí .....	23
<b>obr. 4-1</b>	– Řez typickou kryogenní vývěvou .....	24
<b>obr. 4-2</b>	– Znázornění procesů v kryosorpční vývěvě .....	26
<b>obr. 5-1</b>	– Fotka kryogenní vývěvy ULVAC – U8H .....	29
<b>obr. 5-2</b>	– Schéma kryogenní vývěvy ULVAC .....	30
<b>obr. 5-3</b>	– Fotka kryogenní vakuová pumpa Leybold COOLVAC 1500 iCL .....	31
<b>obr. 5-4</b>	– Schéma kryogenní vývěvy od společnosti Leybold .....	32
<b>obr. 6-1</b>	– Detailní popis modelu kryovývěvy pro ITER .....	35
<b>obr. 6-2</b>	– Boční pohled na divertorové čerpací potrubí s kryovývěvou pro ITER .....	35
<b>obr. 6-3</b>	– Umístění a popis vnitřního uzpůsobení kryogenní vývěvy HL-2M .....	36
<b>obr. 6-4</b>	– Umístění a schéma kryovývěv v tokamaku DIII-D .....	37
<b>obr. 6-5</b>	– 3D model kryogenní vývěvy pro vrchní divertor v ASDEX Upgrade .....	38
<b>obr. 7-1</b>	– Diagram vlastností různých druhů izolací .....	39
<b>obr. 7-2</b>	– Fotka komerčně dostupné superizolace COOLCAT 2 NW .....	40
<b>obr. 9-1</b>	– Schéma umístění kryovývěvy a vedení potrubní části portem .....	43
<b>obr. 9-2</b>	– Schéma vnitřního uspořádání vyvíjené kryovývěvy s teplotními toky .....	44
<b>obr. 10-1</b>	– Tepelná vodivost plynu v závislosti na tlaku .....	47

<b>obr. 11-1</b> – Schéma různých variací vstupních clon pro odraz IR záření .....	48
<b>obr. 12-1</b> – Ilustrační fotka komerčně dostupného profilu.....	49
<b>obr. 13-1</b> – První zjednodušený koncept vyvíjené kryovývěvy .....	51
<b>obr. 13-2</b> – Modifikace vyvíjené kryovývěvy .....	52
<b>obr. 13-3</b> – První koncepce potrubní části pro přívod LHe a GHe .....	53
<b>obr. 13-4</b> – Modifikace potrubní části .....	54
<b>obr. 14-1</b> –Potrubní okruh vedení helia.....	57
<b>obr. 14-2</b> –Potrubní okruh vedení dusíku.....	57
<b>obr. 14-3</b> – Graf Moodyho diagramu s vyznačenými hodnotami ke kontrole .....	59

# 1 Úvod

V dnešní době, kdy se požadavky na elektrickou energii neustále zvyšují, je klíčové hledat inovativní a efektivní způsoby jejího získávání. S narůstající potřebou energie a současným trendem směrem k udržitelným a ekologicky šetrným zdrojům se výzkum zaměřuje na nové technologie a systémy, které by mohly přispět k budoucímu rozvoji energetických sektorů.

Jedním z hlavních zařízení, které by mohlo hrát klíčovou roli v získávání termonukleární energie, je tokamak. Nicméně, dosažení optimálního provozu tokamaku vyžaduje vysoce efektivní chladicí systémy, které by byly schopny pracovat v extrémním rozmezí teplot.

Bakalářská práce je zaměřena na vývoj nové kryovývěvy, která by byla schopna pracovat ve zmíněném extrémním teplotním rozmezí. Od nejstudenějšího bodu přibližně 4 K na nejvíce vnitřním povrchu kryovývěvy až po teplotu okolí dosahující 770 K. Dosud se na světě nikdo nezabýval vývojem takovéhoho ambientu. Správný provoz kryovývěvy přímo ovlivňuje výkon a stabilitu tokamaku. Proto je pro vytvoření koncepčního návrhu nezbytné nastudování provozu tokamaků s důrazem na ITER a EU DEMO. Koncepční návrh bude zahrnovat volbu potřebných teplotních úrovní, definování materiálu, stanovení okrajových podmínek a s nimi spojenými výpočty. Dále návrh uspořádání vnitřní stavby kryosorpční vývěvy a technologického připojení v místě průchodu tokamakem k umístění kryovývěvy bez nutnosti řešení hrdel a zakončení zvolených potrubí.

Výsledek této práce bude koncepční návrh, který má za cíl nejen přispět k současným potřebám elektrické energie, ale také otevřít dveře k dalším výzkumným a vývojovým možnostem vysokoteplotních tokamaků, či pro budoucí vytvoření elektráren založených na termonukleární energii.

## **Teoretická část**

### **2 Tokamak**

Tokamak je zařízení, které se používá k výzkumu a vývoji termojaderné fúze jako potenciálního zdroje čisté a nevyčerpatelné energie. Výhodou je, že se při reakcích využívají lehké izotopy vodíku, které jsou běžně dostupné ve vodě. Fúzní energie je produkována bez emisí skleníkových plynů a jaderného odpadu, což představuje obrovskou výhodu oproti tradičním jaderným reaktorům, které využívají štěpné reakce. Přejít k jaderné fúzi jako zdroji energie by mohl zásadně snížit naši závislost na fosilních palivech a omezit emise skleníkových plynů, přispívajících ke globálnímu oteplování. Mohla by také pomoci s překonáním výzev spojených s nedostatkem energie a ochranou životního prostředí [1], [2].

#### **2.1 Zrození tokamaku**

Oleg Alexandrovič Lavrentěv byl vynikající vědec, který stál u zrodu státního programu výzkumu řízené fúze v bývalém Sovětském svazu. Lavrentěvova iniciativa v padesátých letech minulého století byla rozhodujícím impulzem pro Sacharova a Tamma, kteří vymysleli tokamak. Lavrentěv se narodil v roce 1926 v Pskově a zemřel 10. února 2011 v Charkově. Zájem o fyziku měl již na střední škole, ale aniž by dokončil studia, narukoval a za druhé světové války sloužil na Sachalinu. Pilné studium dostupné literatury z posádkové knihovny mu stačilo k napsání dopisu nejprve Stalinovi a později až k Ústřednímu výboru Komunistické strany Sovětského svazu, v nichž popsal princip termojaderného reaktoru, který horké plazma udržoval sférickým elektrostatickým polem. Sacharov nahradil elektrostatické pole polem magnetickým a spolu se svým učitelem Igorem Tammem navrhli magnetický termojaderný reaktor, který v roce 1958 pojmenovali tokamak. Tento projekt zde působí již přes 50 let [1].

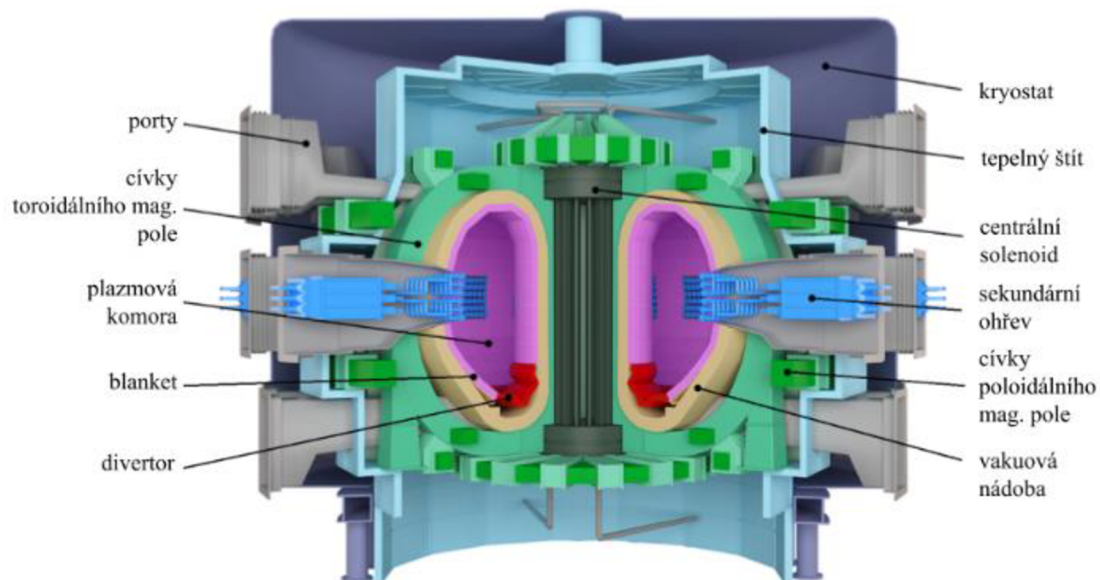
#### **2.2 Termojaderná fúze**

Již nějakou dobu se po celém světě snaží odborníci uskutečnit první termojadernou fúzní elektrárnu. Pro ty, kteří se neorientují v této problematice, lze termojadernou fúzi popsat jako opak jaderného štěpení. Při termojaderné fúzní reakci se dvě atomová jádra spojí do jednoho, odlišného atomového jádra. První fúzní elektrárny budou využívat slučování jader izotopů vodíku deuteria a tritia. Fúzní elektrárny mají mnoho výhod oproti jaderným elektrárnám založeným na štěpení. Například produkují

minimální množství jaderného odpadu a neexistuje riziko nekontrolované štěpné reakce. Navíc se vyznačují nulovými emisemi CO<sub>2</sub> a vynikající energetickou efektivitou. Nicméně dosažení podmínek pro fúzní reakce je velmi obtížné a finančně nákladné [2].

### 2.3 Kontrola a vznik tokamakového plazmatu

Dnes je nejpříslibnějším kandidátem na výrobu fúzní energie zařízení známé jako tokamak (viz **obr. 2-1**). Tyto zařízení používají magnetické pole ke kontrole a manipulaci horkého plazmatu, kde probíhají fúzní reakce. Magnetické pole v tokamaku je vytvářeno cívkami, které jsou rozděleny do dvou typů – poloidálních a toroidálních. Poloidální magnetické pole se vytváří pomocí cívek poloidálního pole a centrálního solenoidu, který slouží jako primární vinutí transformátoru a indukuje elektrický proud v plazmatu (sekundárním vinutí). Tyto cívky mají toroidální tvar a generují magnetické pole s tvarem dipólu, které umožňuje kontrolu tvaru a pozice plazmatu v tokamaku. Toroidální magnetické pole, které je generováno cívkami toroidálního pole, slouží jako primární pole pro udržení plazmatu. Tyto cívky mají vinutí stáčené v poloidálním směru a generují magnetické pole s tvarem toroidu. V budoucnu se očekává, že většina nových tokamaků bude využívat supravodiče pro konstrukci svých cívek [2].



*obr. 2-1 – Základní schéma konstrukce reaktoru typu tokamak [3]*

Plazma se v tokamaku nachází ve vakuové komoře, která má toroidální tvar a je obklopena cívkami toroidálního a poloidálního pole. Po vstříknutí paliva do vakua



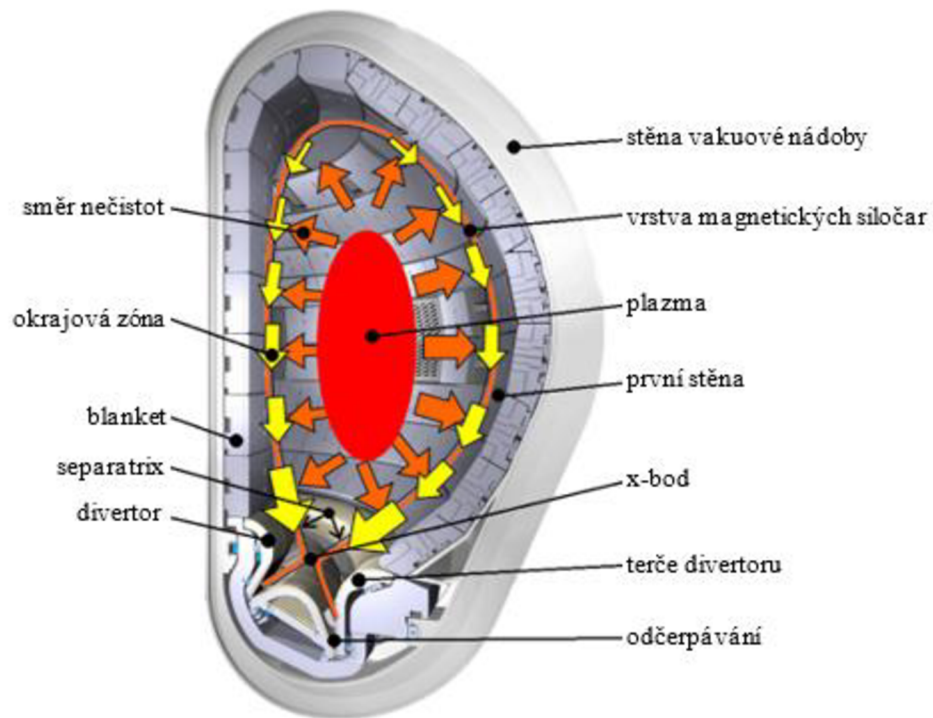
dochází k vytvoření plazmy, která je zahřátá na teplotu přibližně 150 milionů stupňů Celsia. Fúzní reakce se odehrávají hlavně v centru plazmatu, kde se generuje většina užitečného výkonu. Tyto reakce vytvářejí dva typy částic – nabitě alfa částice a neutrální částice (gama záření a neutrony). Alfa částice předávají svou energii plazmatu, čímž ho ohřívají. Neutrální částice většinou opouštějí plazmu a ukládají svoji energii do tzv. blanketů, které obklopují vnitřek vakuové komory tokamaku. V těchto blanketech dochází k přenosu energie do chladicího média uvnitř blanketu a k breedingu paliva. Ohřáté chladicí médium poté slouží ke generování elektrické energie v parních turbínách. Burning plasma je vědecký termín, kdy veškerá energie potřebná k ohřívání plazmatu pochází z produktu fúzních reakcí [2].

## 2.4 Divertor

Jak zmiňuje Novotný (2003), divertor je další eminentní komponentou tokamaku, která slouží jako primární kanál odstraňování nečistot a fúzních produktu z plazmatu. Pomocí tvaru plazmatu je na něj směřována většina tepelného toku z plazmatu, v jeho okolí se proto vyskytují nejvyšší koncentrace neutrálního plynu. V práci se dále uvádí, že efektivní čerpání divertoru je stěžejní pro fungování fúzní elektrárny (Novotný, 2003, s. 50) [4].

Divertor se využívá v důsledku speciálního tvaru magnetického pole, které je vytvořeno pomocí cívek. Celkové pole na okrajích je uspořádáno tak, aby vytvořilo bod s nulovým magnetickým polem, který se nazývá X-bod (viz. **obr. 2-2**). Tento bod určuje polohu tzv. separatrixu, což je konkrétní magnetická plocha, která odděluje magnetické plochy v prostoru. Ty jsou uzavřené a nemají kontakt s magnetickými povrchy, které mají kontakt se stěnou komory. Tato konfigurace má pozitivní dopad na mnoho výkonových parametrů plazmatu, protože rychlost pohybu částic po magnetických površích je o několik řádů vyšší než pohyb napříč magnetickými povrchy (difúze). Tzn, že částice plazmatu a nečistoty difundují z centra plazmatu směrem ke stěnám vakuové nádoby skrze magnetické povrchy a po překročení posledního uzavřeného povrchu rychle sklouznou na divertorové terče. Zde plazma chladne a rekombinuje se. Rekombinace plazmy na divertoru je důležitá, protože to umožňuje odbourávat energii a eliminovat nečistoty v plazmatu. Divertorové terče musí odolávat jedněm z nejvyšších tepelných toků, a proto je nejvhodnějším materiálem pro zařízení wolfram, který má schopnost odolávat vysokým teplotám. Uskupení divertoru navíc

usnadňuje stabilní provoz v režimu high confinement, což je režim s lepším udržením částic a energie. Efektivní chlazení divertorových terčů pomocí zabudovaného potrubí je jedním z největších technologických výzev při konstrukci fúzní elektrárny. Zmíněné chlazení je implementováno i do speciálně vyvíjené kryogenní vývěvy, kterou tato bakalářská práce má za úkol navrhnout [2].



obr. 2-2 Detailní schéma typické vakuové komory se spodním divertorem [5]

## 2.5 Základní principy fungování tokamaku

Tato část práce popisuje sekvence událostí, které se odehrávají při provozu tokamaku. Tyto informace jsou klíčové pro pochopení podmínek, za kterých musí kryogenní vývěva fungovat. Práce se zaměřuje na induktivně (pulzně) operované tokamaky a nezahrnuje otázky související s provozem fúzní elektrárny v stacionárním stavu. Po vyčištění vakuové komory na ultra vysoké vakuum a ochlazení cívek na provozní teplotu se tokamak připravuje na výboj. Nejprve probíhá relativně pomalé naproudění cívek toroidálního pole, které trvá několik sekund až desítek minut podle typu cívek. Tím se indukuje proud do všech poloidálně uzavřených smyček a do ploch s nenulovým průmětem do roviny kolmé k toroidálnímu poli. Poté následuje vstříkování pracovního plynu do vakuové komory a následně rychlá změna proudu v centrálním

solenoidu. Tato změna magnetického toku (proudu) centrálního solenoidu indukuje tzv. smyčkové napětí (loop voltage) v toroidálním směru ve vakuové komoře, které urychluje všechny nabitě částice v toroidálním směru. Za správných podmínek dokáže tímto způsobem neutrální plyn "prolomit" a zapálit výboj. Tento proud v plazmatu generuje dodatečné poloidální magnetické pole (kolmé na toroidální), které se skládá s požadovaným toroidálním polem a zároveň ohřívá plazma. Složením těchto polí vzniká stočené helikální pole, což výrazně stabilizuje plazmatický prstenec. Současně s nárůstem proudu plazmatu slouží proud v cívkách poloidálního pole k "malým" úpravám tvaru pole, které tvarují plazmatický prstenec a kontrolují jeho polohu v rámci vakuové komory tokamaku. Změna proudu v cívkách centrálního solenoidu a poloidálních cívek indukuje ve všech toroidálně uzavřených smyčkách a plochách kolmých na silokřivky poloidálního pole toroidální elektrické napětí. Pokud nedojde k ztrátě kontroly nad plazmatem, může být tokamak provozován stabilně. Za určitých okolností však může dojít k ztrátě kontroly nad plazmatem a rychlému vychladnutí plazmatu, tzv. disrupci. Disrupce jsou jedním z nejdůležitějších konstrukčních limitů dnešních tokamaků [2], [6].

## 3 Vývěvy

### 3.1 Volba typu kryovývěvy

Vývěva je zařízení, které umožňuje odstraňovat plyny z prostoru a vytvářet vysoké podtlaky nebo vakuum. Existuje mnoho různých typů komerčních vývěv, ale v náročných podmínkách tokamaku jsou mnohé z nich nevhodné. Například mechanické vývěvy nejsou vhodné pro tuto aplikaci kvůli nutnosti mazání, turbomolekulární neboli hybnostní vývěvy nejsou použitelné v silných magnetických polích. Sorpční vývěvy jsou přijatelným řešením, ale mají omezenou kapacitu pro čerpání plynu. Vývěvy getrové mají vyhovující čerpací rychlosti, ale jejich životnost je omezená. V současné době neexistuje žádná vývěva, která by byla optimální ze všech hledisek. Po pečlivém zvážení různých faktorů, jako jsou odolnost vůči magnetickému poli, kapacita a možnosti chlazení různými médii, se zdá být nejschůdnějším řešením sorpční vývěva pracující za kryogenních teplot [7].

#### 3.1.1 Kryosorpční vývěvy

Kryosorpční vývěvy jsou zařízení, která se využívají v různých aplikacích, zejména v oblasti termonukleární fúze. Tato vývěva je založena na procesu zachytu plynových částic pomocí kryosorpce a jejich následné kondenzace na površích, které jsou vychlazeny na kryogenní teploty. Při navrhování kryovývěv je nezbytné vzít v úvahu vzájemné vztahy mezi kryogenními a vakuovými technologiemi. Tyto vztahy mají zásadní význam pro úspěšnou konstrukci vývěvy, která bude splňovat náročné požadavky, jako jsou elektromagnetická pole a ionizující záření. V případě tokamaku je navíc nutné brát v úvahu specifické požadavky tohoto zařízení [7].

#### 3.1.2 Charakteristika kryosorpční vývěvy

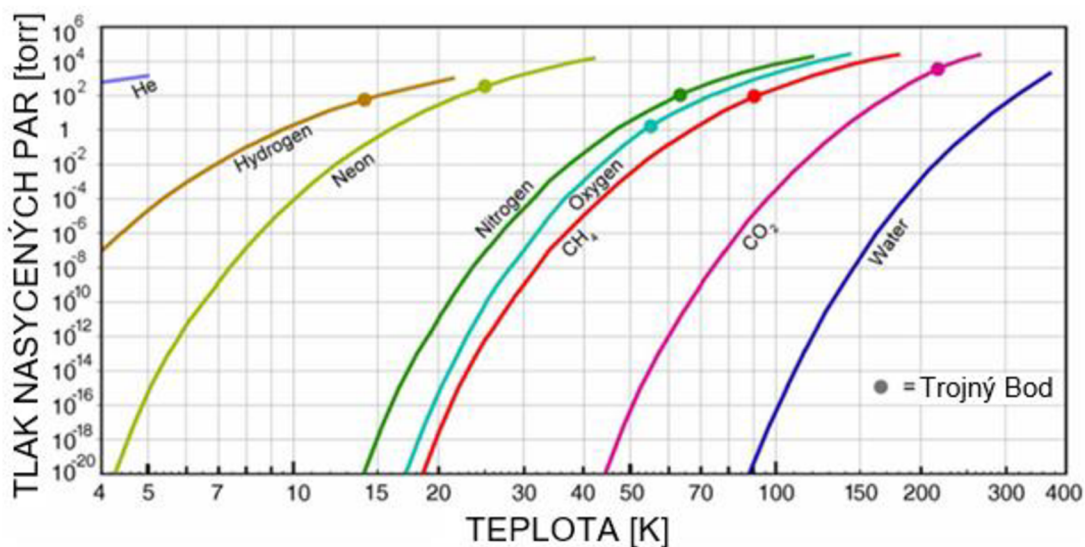
Kryosorpční vývěvy mají schopnost udržet komoru na ultravysoké úrovni vakua, přesněji v rozmezí  $10^{-7}$  až  $10^{-8}$  Pa. Tato vlastnost umožňuje získat čisté vakuum a zajistit správnou funkci fúzního plazmatu uvnitř vakuové nádoby, které je velmi citlivé na nečistoty v palivu. Na druhou stranu, nevýhodou těchto vývěv je, že odsátý plyn zůstává uvězněn uvnitř zařízení, a to musí být pravidelně regenerováno po určité době provozu. Kryosorpční vývěvy jsou schopny čerpat všechny plyny, včetně vzácných plynů, za předpokladu, že je teplota dostatečně nízká. Množství molekul, které lze zachytit, závisí na několika faktorech, jako je teplota plynu a povrchu,

fyzikálně-chemické vlastnosti plynu a povrchu (distribuce povrchové energie) a mikroskopická drsnost povrchu [7].

Jedním z hlavních benefitů kryogenních vývěv založených na kryosorpci, jak již bylo dříve zmíněno, je oddělený prostor, který je uzavřen a izolován od všech chladících médií. To výrazně usnadňuje použití těchto typů vývěv v prostředí budoucích fúzních elektráren, kde je potřeba zajistit radiologickou bezpečnost vzhledem k používání tritia. Vysoká rychlost čerpání je klíčovým faktorem pro kryogenní vývěvy a bývá obvykle omezena pouze vodivostí vstupního otvoru vývěvy. Použití takové vývěvy umožňuje provozovat plazma tokamaku s vysokým objemem pracovního plynu (ve srovnání s jinými způsoby čerpání), což zvyšuje rychlost recirkulace paliva a snižuje koncentraci nečistot v plazmatu při konstantním fúzním výkonu. Nižší koncentrace nečistot znamená menší nároky na ohřev plazmatu a tím zvyšuje efektivitu zařízení. Kromě toho mají kryogenní vývěvy minimální počet pohyblivých částí, což zvyšuje jejich odolnost proti drobným částicím, které jsou uvolňovány během technologických procesů ve vakuové komoře. Tyto vývěvy jsou také méně citlivé na vibrace a rázy, což zlepšuje jejich celkovou odolnost [8].

### 3.1.3 Kryokondenzace

Základním způsobem pro čerpání a zachycení plynů je kryokondenzace. Tento proces zahrnuje ochlazení povrchu na takovou teplotu, aby tlak čerpaného plynu byl nižší než požadovaný tlak v komoře. Abychom mohli snadno porozumět fyzice kryočerpání, můžeme si představit následující tezi: každý plyn má (nasycený) tlak páry, který je funkcí teploty – čím vyšší teplota, tím vyšší je tlak páry. Kondenzace na studeném povrchu snižuje tlak páry okolního plynu. Pokud je teplota dostatečně nízká, pára se změní na pevnou fázi a zkondenzuje. Tlakový rozsah kryovývěv je určen trojným bodem tlaku jednotlivých čerpaných plynů (viz. **obr. 3-1**). Při dosažení tohoto bodu se saturační křivka stane totožnou se sublimační křivkou. To znamená, že při čerpání dochází k přímému fázovému přechodu plynných molekul z plynné do pevné fáze bez jakékoli kapalné fáze [8].



obr. 3-1 - Teplota varu běžných plynů jako funkce tlaku [9]

Kryokondenzace může být použita pro čerpání jakéhokoliv plynu, pokud je povrchová teplota dostatečně nízká zpravidla okolo 77 K. Nicméně, neon, izotopy vodíku a helium vyžadují nižší teploty okolo 4 K pro kryosorpce. Tyto plyny jsou nejtěžší k zachycení a potřebují nejnižší teploty pro přeměnu na pevnou fázi. Během procesu kryokondenzace ve vývěvě se vytvářejí vrstvy kondenzátu z plynné fáze růstem krystalů. Tento jev není vhodný pro čerpání helia. Helium má velmi nízkou polarizaci a neinteraguje dobře s povrchem. Kryokondenzace nemůže být účinně použita k čerpání helia a musí se použít jiných metod, například kryosorpce [8].

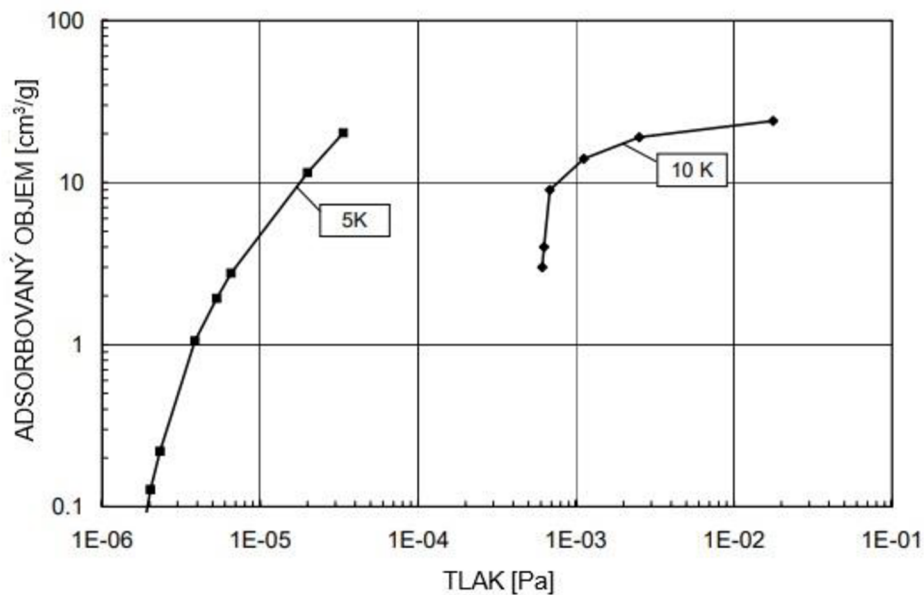
### 3.1.4 Kryosorpce

Kryosorpce se vyskytuje za podmínek vakua a nízkých teplot a označuje fyzikální proces adsorpce. Tento proces zahrnuje zadržování plynu na povrchu pevné látky, přičemž rovnovážný tlak adsorbovaných plynů je nižší než tlak nasycených par pro kryokondenzaci. To je způsobeno tím, že disperzní síly mezi molekulami plynu a povrchem jsou větší než disperzní síly mezi samotnými molekulami plynu v kondenzovaném stavu [8].

Adsorpce umožňuje, aby plyn zůstal zadržen na adsorbentu i v podsyceném stavu, tj. při podstatně vyšších teplotách, než by bylo zapotřebí pro kryokondenzaci. Avšak adsorpční proces se v rovnovážném stavu dostává do rovnováhy s desorpcí, což znamená, že na adsorbovaném povrchu je jen relativně malé množství adsorbovaného plynu [8].

Pro čerpání větších objemů plynů se používají adsorbenty, jako je aktivní uhlí nebo různé zeolity, které jsou pokryty na vnitřních plochách uvnitř čerpacích vývěv. Tyto adsorbenty mají vysokou plochu, řádově tisíce metrů čtverečních, což umožňuje dosáhnout rozumných čerpacích kapacit a rychlostí [8].

Adsorpční izotermy popisují rovnovážný stav mezi adsorbovaným plynem a adsorbentem pro daný plyn. Nejlehčí plyny, jako je vodík, helium a neon, nekondenzují při nízkých teplotách, a proto jsou pro jejich adsorpci potřeba speciální porézní materiály. To je zásadní zejména pro kryočerpání helia, ale také pro vodík a neon, které se obtížně kondenzují. Graf na **obr. 3-2** zobrazuje, že tyto plyny vyžadují nejnižší teploty během kryosorpce. Více informací o tomto tématu lze nalézt v kapitole s názvem 'Porézní materiály' [8].

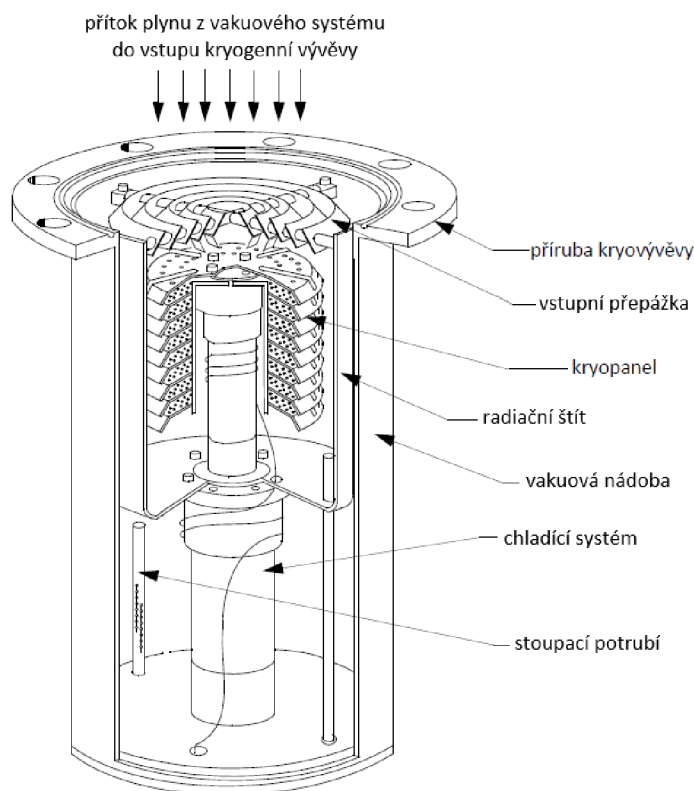


*obr. 3-2 – Sorpční rovnováha pro helium na mikroporézním aktivovaném uhlí [10]*

## 4 Konstrukce vývěv

### 4.1 Stavba obecné kryosorpční vývěvy

Typická kryovývěva se skládá ze tří základních částí viz **obr. 4-1**, a to obvykle z jedné vstupní radiační přepážky neboli clony, několika kryopanelů a z chladicího potrubního systému. Dalšími podpurnými součástmi jsou různé pláště, šrouby a upevňovací segmenty. Konkrétní stavba vývěvy závisí na počtu chladicích úrovní, či stupňů, které má. Většina komerčně dostupných kryovývěv využívá jako chladicí médium helium a jsou chlazeny kryorefrigerátory s uzavřenou smyčkou. I když je vnitřní stavba kryovývěvy relativně jednoduchá, je nutné provést složité úvahy ohledně konkrétních parametrů čerpacích povrchů z fyzikálního hlediska [11].



*obr. 4-1 – Řez typickou kryogenní vývěvou [12]*

### 4.2 Umístění kryosorpční vývěvy

Pro použití kryosorpčních vývěv existují dvě základní konfigurace, ex-vessel a in-vessel. Ex-vessel vývěvy jsou umístěny mimo vakuovou komoru tokamaku a čerpaný plyn k nim proudí potrubím ven z vakuové komory. Tato konfigurace umístění umožňuje snazší a jednodušší konstrukci kryosorpční vývěvy. Z tohoto důvodu



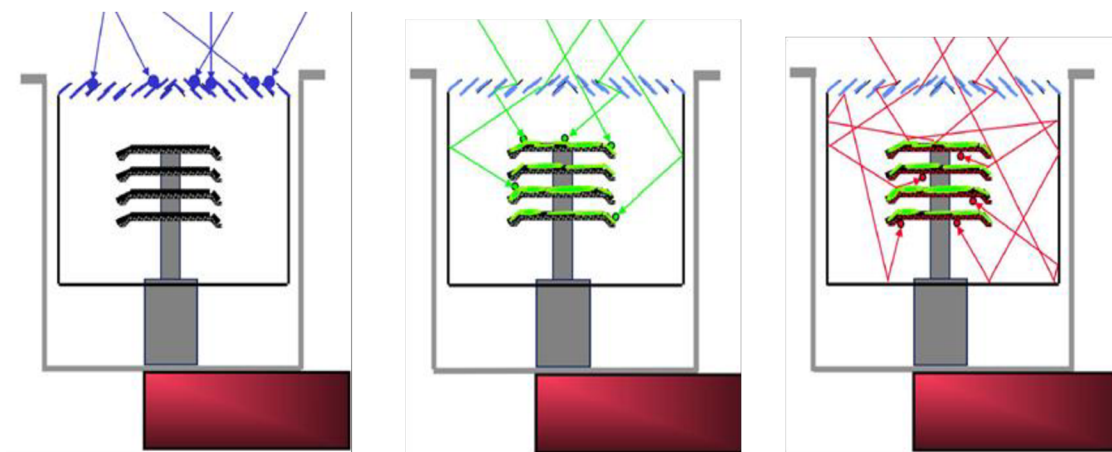
jsou ex-vessel vývěvy často využívány v komerčních aplikacích.

U in-vessel uspořádání se kryogenní vývěva umístí do blízkosti divertoru uvnitř tokamaku. Tento způsob umístění umožňuje dosáhnout vysokých čerpacích rychlostí, které jsou nedosažitelné jakýmkoliv jiným způsobem. Čím blíže je kryosorpční vývěva k vakuové komoře, tím se její efektivní čerpací rychlost přiblíží k dostupné čisté čerpací rychlosti samotné vývěvy. To je dáno tím, že se vývěva nenachází na konci dlouhého přírodního potrubí, které je nutné použít u ex-vessel vývěv.

Nevýhodou in-vessel uspořádání je složitější konstrukce kryogenní vývěvy, protože musí být navržena a postavena tak, aby zvládla extrémní podmínky v této oblasti a zabezpečila správný chod ve všech možných situacích. To zahrnuje například vysoké teploty a radiaci od tokamaku a magnetické pole v této oblasti. Navíc, zatímco ex-vessel vývěvy lze vyměnit snadno, in-vessel vývěvy jsou pevně zabudovány v zařízení a výměna je často velmi náročná a drahá. Přestože oba způsoby umístění vývěv mají své výhody a nevýhody, in-vessel vývěvy jsou pro současné zařízení pro výzkum termonukleární fúze zásadním prvkem a pokrok v jejich konstrukci a vývoji by mohl přinést zlepšení výkonu a efektivity celého zařízení [13].

### 4.3 Čerpací proces obecné kryovývěvy

V této části popisu kryogenního zařízení komerčního typu se vysvětluje proces čerpání a kondenzace viz **obr. 4-2**. Chladicí jednotky ochlazují různé povrchy, což způsobuje, že plyny na těchto površích zamrzají. Při čerpání směsi pracovních plynů přes vstupní clonu se na segmentech přepážky s teplotou cca 65 K začínají tvořit kondenzační vrstvy molekul vody a těžších molekul, zejména molekul oxidů  $\text{CO}_2$  a vodních par. Clony také slouží k ochraně vyšších stupňů vývěvy před tepelným zářením z čerpaného objemu. Molekuly kyslíku, dusíku a argonu projdou clonami prvního stupně a lehčí plyny se zkondenzují na povrchu druhého stupně na radiačních štítech, které jsou zchlazeny na teplotu 12 K. Molekuly, které se nedají zkondenzovat (vodík, helium a neon), narazí na stěny vakuové nádoby, dokud se nedostanou na odvrácenou stranu radiačních štítů, kde jsou pokryty sorbentem a adsorbovány na povrchu s dřevěným uhlím [8].



*obr. 4-2 – Znáznornění procesů v kryosorpční vývěvě: (vlevo) kontakt molekul s prvním stupněm (přepážkou o teplotě 65 K), (veprostřed) druhý stupeň kryopanel zchlazený na 12 K, (vpravo) kontakt molekul se sorbentem/porézním materiálem [14]*

#### 4.4 Porézní materiály

Efektivní adsorpce na porézních materiálech je klíčová pro dosažení maximálních výkonů kryogenní vývěvy. Správná volba sorbentu s povrchovými úpravami a optimálním rozložením pórů je zásadní pro účinnou adsorpci. Fyzikální adsorpce je výsledkem slabých van der Waalsových sil mezi molekulami plynu a adsorbentu. Porézní materiály s vysokou mikroporézností a úzkými póry jsou pro fyzikální adsorpci zvláště efektivní. Při kontaktu molekul plynu s povrchem materiálu dochází k četným srážkám, což zvyšuje pravděpodobnost absorpce. Vysoká poréznost materiálu zvyšuje jeho reálný použitelný povrch [15].

Pro stanovení velikosti použitelného vnitřního povrchu pevného vzorku se využívá měření objemu plynu, který se nasorbuje při daném tlaku. Pro výběr nejkvalitnějšího sorbentu pro kryogenní vývěvy se používají mikroporézní analyzátory, které umožňují měřit adsorpční izotermy na různých typech sorbentu. Informace o adsorpční izotermě se získávají experimenty, při kterých se zaznamenává množství adsorbovaného plynu jako funkce tlaku při konstantní teplotě. Pro získání informací o ploše povrchu, objemu a distribuci pórů se využívají matematické modely BET, které extrahují tyto parametry z adsorpčních izoterm. BET metoda je standardní způsob, kterým se zjišťuje specifická plocha povrchové úpravy pevného porézního vzorku v laboratořích. Teorie BET je založena na principu vícevrstvé adsorpce plynných molekul vodíku na pevný povrch vzorku a byla rozšířena o Langmuirovu adsorpční teorii [15].

## 4.5 Aktivní uhlí

Nejčastěji používaným porézním materiálem je aktivní uhlí. Mimo vakuové aplikace se běžně využívá jako absorbent pro eliminaci anorganických nečistot. Vyniká vysokou mikroporézností s úzkými póry o průměru (0,6 - 0,7) nm, což mu umožňuje mít velkou plochu v porovnání s makroskopickými rozměry (až 1000×). Navíc plyny se z něj snadno uvolňují při zvýšení teploty. Rovnovážný tlak vodíku adsorbovaného na uhlí je funkcí teploty a množství adsorbovaného vodíku. Uhlí má vysokou kapacitu pro vodík, ale jak množství adsorbovaného vodíku narůstá, přechází se z režimu zachytu z kryosorpce do kryokondenzace (pokud to dovoluje teplota povrchu) [15].

## 4.6 Pracovní režimy tokamaků

Termojaderné experimentální zařízení dnes pracují v cyklickém režimu, takže vždy mají k dispozici časový úsek, kdy není do vakuové komory vstřikován pracovní plyn. Během této doby se musí vakuová komora vyčerpát a zbavit nečistot. Tento čas je využit k regeneraci čerpacích povrchů kryosorpční vývěvy. V budoucích generacích fúzních zařízení, jako jsou ITER, DEMO a další, bude nutné provádět regeneraci vývěv za plného provozu plazmatu. To představuje další technologické výzvy [1].

## 4.7 Regenerace kryosorpční vývěvy

Regenerace kryovývěvy je nezbytným procesem pro zajištění její správné funkce. Během provozu se vnitřní plochy vývěvy postupně pokryjí adsorbovanými a kondenzovanými plyny, což snižuje účinnost čerpání. Tyto procesy lze zakomponovat do zmíněných pracovních cyklů experimentálních tokamaků. Regenerace v sobě zahrnuje odplynění nasycených sorbentů a vnitřních ploch vývěvy, a to pomocí zvýšení teploty čerpacích povrchů, což způsobí desorpci zachycených částic z adsorbentu a zvýšení tlaku ve vývěvě. Dále se odčerpává objem kryogenního prostoru pouze nahrubo primární vývěvou a až po odstranění většiny plynu se přechází do režimu čištění, kdy je vývěva vyčerpána na vysoké vakuum. Díky tomuto procesu jsou plyny nutné odstranit z objemu vývěvy jiným typem vývěvy.

Při volbě regenerační vývěvy je nutné vzít v úvahu typické množství adsorbovaných plynů. Pokud dojde k nesprávné volbě regenerační vývěvy nebo nesprávnému nastavení regeneračního procesu, může dojít k destrukci vývěvy. Po úspěšném absolvování regenerace se přistupuje k opětovnému chlazení vývěvy.

V závislosti na konstrukci vývěvy a složení čerpaných plynů lze využít proces parciální regenerace, kdy se regeneruje pouze část vývěvy. Tento postup se osvědčuje zejména u složitějších a vícestupňových konstrukcí vývěv, kde je úplná regenerace nákladná a časově náročná.

Kromě procesu regenerace je také důležité pravidelně kontrolovat stav sorbentů, které se používají k adsorpci plynů v kryogenní vývěvě. Tyto sorbenty je třeba periodicky vyměňovat nebo doplňovat, aby zajišťovaly optimální funkčnost vývěvy. Je třeba mít na paměti, že proces regenerace kryogenního čerpadla je zásadní pro jeho provoz a účinnost. Pokud regenerace není provedena správně, může dojít k narušení struktury vývěvy nebo k degradaci sorbentů. To může mít vliv na schopnost čerpadla zachytit plyn a na jeho výkon [8].

## 5 Komerční příklady kryovývěv

Rešerše dále analyzuje a shromažďuje informace z nabídek komerčních kryosorpčních vývěv. Pro lepší názornost jsou zde uvedeny příklady komerčně dostupných řad kryogenních vývěv. Hlavním cílem je porovnat komerční produkty s vývěvami navrženými na míru pro experimentální fúzní zařízení.

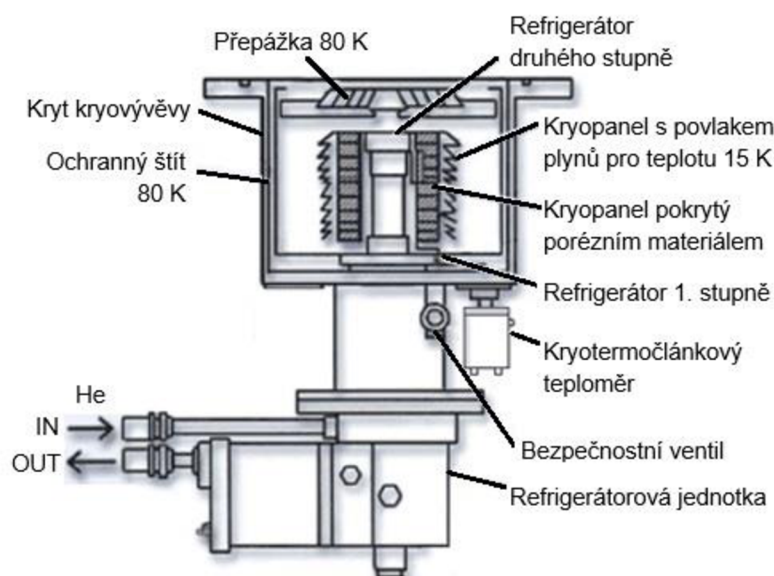
### 5.1 Kryovývěva značky ULVAC

Cryo-U8H je vysoce výkonné kryogenní vysokovakuové čerpadlo, které dokáže dosáhnout extrémně nízkého tlaku v řádu desetin miliardtiny atmosféry, což číselně odpovídá přibližně  $10^{-10}$  Pa. Používá se především v oblasti vysokého vakua pro odstraňování plynných molekul z vakuových komor a systémů. Vývěva obsahuje chladicí mechanismus s nízkou spotřebou energie, který využívá kapalný dusík k dosažení stabilní teploty vnitřního prostoru až na  $-180$  stupňů Celsia. Cryo-U8H viz **obr. 5-1** je navržena pro vysokou spolehlivost a dlouhou životnost, což z ní dělá špičkové čerpadlo pro aplikace vyžadující velmi nízký tlak a vysokou účinnost čerpání



*obr. 5-1 – Fotka kryogenní vývěvy ULVAC – U8H [16]*

[16]. Vnitřní stavbu této kryogenní vývěvy vyobrazuje a podrobně popisuje následující schéma viz **obr. 5-2**.



obr. 5-2 – Schéma kryogenní vývěvy ULVAC [17]

V popředí obrázku schématu vnitřní stavby kryogenní vývěvy ULVAC se nachází Dewarova nádoba, která slouží k uchování kryogenních kapalin a jejich přenosu do různých aplikací. Nádoba má dvě stěny, mezi kterými se nachází vakuum pro minimalizaci tepelných ztrát. Kryogenní kapaliny jsou distribuovány do aplikací pomocí redukčního ventilu, hadic a trubek. V dolní části obrázku je zobrazena část vývěvy, která slouží k odpařování kapalin. Tepelné vodiče umístěné uvnitř Dewarovy nádoby a vedené ven kryogenními hadicemi zajišťují přenos tepla z kapalně fáze do plynné fáze, kdy se kapalina mění na plyn a následně se odpařuje [16].

Tab. 1 – Parametry kryogenních vývěv společnosti ULVAC [18]

Model CRYO-U	Průměr [mm]	Čerpací rychlost (L /s)	Čerpací kapacita (Pa × L)
U6H	152.4	1100	$3.1 \times 10^5$
U8H	203.2	2700	$1.0 \times 10^6$
U10PU	254	3600	$6.7 \times 10^5$
U16	406.4	10000	$2.4 \times 10^6$
U22H	558.8	25000	$8.5 \times 10^6$
U30H	762	43000	$1.5 \times 10^7$

Dle Tab. 1 – Parametry kryogenních vývěv společnosti ULVAC [18] poskytující informace o deklarovaných čerpacích rychlostech části produktové řady kryovývěv

japonské firmy ULVAC. Zde prezentované hodnoty čerpacích rychlostí jsou specifické pro plyny vodík, helium a neon, neboť tyto plyny představují nejvýznamnější složky spalin a vyskytují se v největší koncentraci ve vakuové nádobě v tokamaku. Tyto rychlosti jsou klíčové pro dosažení a udržení vysokého vakuového prostředí, nezbytného pro úspěšný průběh plazmové fúze v tokamaku.

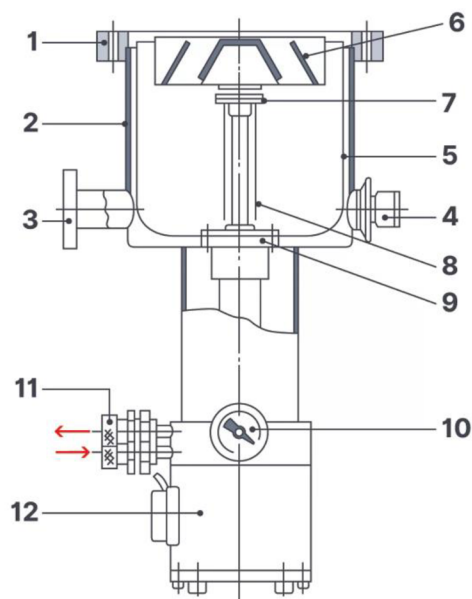
## 5.2 Kryovývěva značky Leybold

Dalším příkladem je zde uvedená část z produktové řady kryogenních vývěv společnosti Leybold viz **obr. 5-3**.



*obr. 5-3 – Fotka kryogenní vakuové pumpy Leybold COOLVAC 1500 iCL [19]*

Kryogenní vakuová pumpa Leybold COOLVAC 1500 iCL je vysoce výkonné zařízení pro dosažení extrémně vysokého vakua v různých aplikacích, jako jsou například výzkum materiálů, nanotechnologie nebo fyzika. Tato pumpa je schopna dosáhnout vakuového tlaku až do řádu  $10^{-10}$  Pa a je vybavena inovativním chlazením pomocí kapalného dusíku, které zajišťuje vysokou účinnost a stabilitu při práci. Díky vysokému průtoku a nízkému hluku je tato pumpa ideální pro použití v laboratořích a průmyslových aplikacích, které vyžadují spolehlivost a vysoký výkon [19].



*obr. 5-4 – Schéma kryogenní vývěvy od společnosti Leybold [20]*

*Popis komponent 1) Příruba vysokého vakua; 2) Obal vývěvy; 3) Připojení předčerpávání; 4) Bezpečnostní ventil pro vypouštění plynu; 5) Tepelný radiační štít; 6) Clona; 7) Druhý stupeň kryogenerátoru (10 K); 8) Kryopanely; 9) První stupeň kryogenerátoru ((50-80) K); 10) Měrka tlaku a teploty; 11) Připojení heliové linky; 12) Motor kryogenerátoru s obalem a elektrickým připojením*

Konstrukce kryopumpy se skládá z několika klíčových komponentů, které jsou číselně označeny na **obr. 5-4**. Přes přírubu vysokého vakua se uskutečňuje připojení kryopumpy k vakuové komoře, ze které se má odstranit plyn. Obal vývěvy chrání kryopanely a další komponenty kryopumpy. Připojení předčerpávání umožňuje připojení dalšího vakuového čerpadla, které má za úkol odstranit většinu plynu před vstupem do kryopumpy. Bezpečnostní ventil pro vypouštění plynu umožňuje uvolnění plynu v případě nouze nebo poruchy. Tepelný radiační štít omezuje přenos tepla z okolního prostředí do kryogenerátoru. Clona umožňuje průchod spalin plynu z vakuové komory do kryopumpy. Druhý stupeň kryogenerátoru s teplotou 10 K slouží k chlazení kryopanelů. Kryopanely jsou hlavními chladicími komponenty k odstranění plynu z vakuové komory. První stupeň kryogenerátoru s teplotou (50-80) K je pro chlazení tepelného radiačního štítu. Měrka tlaku a teploty je určena k monitorování teploty a tlaku uvnitř kryopumpy. Připojení heliové linky má za úkol plnění kryopumpy heliem, které se používá jako chladicí médium. Motor pohání kryogenerátor, který je hlavním chladícím prvkem kryopumpy. Kryogenerátor se skládá ze dvou stupňů – první stupeň dosahuje teplot 50-80 K druhý stupeň dospívá teploty okolo 10 K [19].



**Tab. 2** – Parametry kryogenních vývěv společnosti Leybold [19]

	<b>COOLVAC 1500</b>	<b>COOLVAC 2000</b>	<b>COOLVAC 18000</b>	<b>COOLVAC 60000</b>
<b>Rychlost čerpání (l/s)</b>				
N <sub>2</sub>	1500	10000	30000	57000
H <sub>2</sub> O	4600	30000	93000	180000
Ar	1200	8400	25000	47000
H <sub>2</sub>	2500	10000	30000	60000
<b>Kapacita (bar × l)</b>				
Ar/N <sub>2</sub>	1000	5500	6500	9000
H <sub>2</sub> (10 <sup>-4</sup> Pa)	15	45	100	150

Vyobrazená **Tab. 2** umožňuje porovnat výkonnost a schopnost různých typů vakuových čerpadel v odčerpávání různých typů plynů. Kupříkladu kapacita vakuového čerpadla COOLVAC 1500 pro odčerpávání vodíku při tlaku 10<sup>-4</sup> Pa lze vyjádřit jako 15 bar × l za sekundu, což odpovídá 1,5 litru za sekundu [19].

### 5.3 Vyhodnocení komerčně dostupných kryovývěv

Podle uvedených příkladů komerčních kryogenních vývěv lze pozorovat, že jejich design se v zásadě podobá, s rozdíly pouze v detailech. Tyto vývěvy nabízejí širokou škálu možností s velkým rozsahem čerpacích rychlostí, od přibližně 1 až po 100 m<sup>3</sup>/s. Nicméně pro chlazení se výhradně používá mechanický chladič, který je přímo integrovaný do těla vývěvy a nedosahuje dostatečně nízkých teplot, které jsou potřebné pro tokamaky.

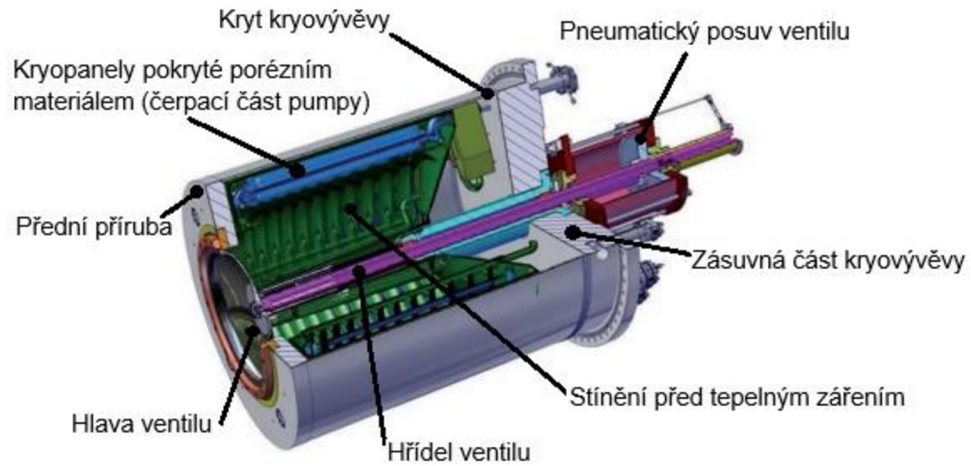
Z poskytnutých informací je zjevné, že žádná z běžně dostupných komerčních kryogenních vývěv není vhodná pro použití v in-vessel konfiguraci, ani po úvaze o vylepšení a následné náročné přestavbě. To znamená, že provozovatelé fúzních experimentů se často uchylují k vlastním konstrukcím kryosorpčních vývěv.

## 6 Příklady z tokamaků

V této části jsou prezentovány konstrukce kryosorpčních vývěv používaných v různých experimentálních zařízeních. Pro získání odborných zkušeností je možné se inspirovat již existujícími kryosorpčními vývěvami z jiných tokamaků, které splňují alespoň část požadavků na navrhovanou vývěvu. Tyto informace lze využít pro rychlé ověření konceptů, které by se dále rozvíjely v rámci následujících kroků při návrhu konstrukce vyvíjené kryogenní vývěvy, kterou má tato práce za úkol.

### 6.1 Ex-vessel kryovývěva pro ITER

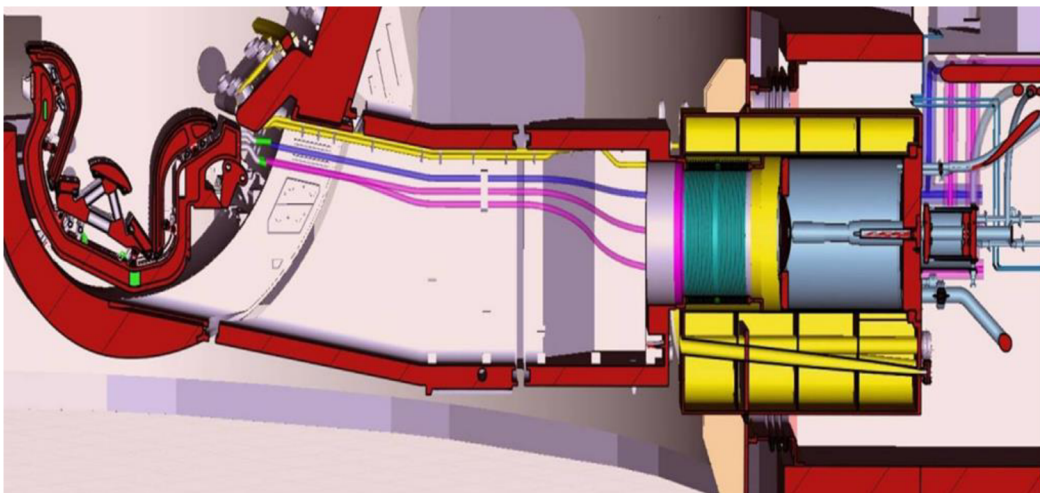
Téma bakalářské práce jasně ukazuje, že studie zaměřená na projekt ITER je klíčová pro pochopení problematiky. Proto by se při této studii neměla opomenout ani kryosorpční vývěva, která se v rámci tohoto projektu vyvíjí. ITER tokamak je hlavní projekt v oblasti fúzního výzkumu na celém světě. Jeho hlavním cílem je demonstrovat technologie využití fúze k výrobě elektrické energie. Státy, které zastupují většinu světové populace, se podílejí na jeho konstrukci. V ITER tokamaku se používá směs paliva deuteria a tritia, a proto jsou nutné speciální vývěvy k odčerpávání radioaktivního tritia. Jsou zavedeny speciální bezpečnostní předpisy pro práci s tritiem. Reaktor ITER bude pracovat v cyklickém režimu s daným časovým úsekem cyklu, kdy dochází k několika procesům. Pro tokamak ITER jsou k dispozici 8 kryovývěv, každá o délce 3,4 metru a hmotnosti 8 tun. Ty jsou chlazeny superkritickým heliem při 0,4 MPa a vstupní teplotě asi 4,4 K. Plyn z komory tokamaku se čerpá čtyřmi vývěvami najednou po dobu 150 sekund v cyklu trvajícím 600 sekund. Poté je nutné regenerovat pumpu a odplynit nahromaděné plyny z kryosorbentu dřevěného uhlí. Regenerační fáze trvá 450 sekund, při které se kryogenní systém vývěv ohřeje na 470 K při tlaku helia 3 MPa. Poté se uvolní plyn z kryosorbentu a odčerpá se. Nakonec následuje ochlazení na provozní teplotu. Celý plazmatický cyklus pro 8 kryogenních vývěv tokamaku ITER trvá 1200 sekund [21].



*obr. 6-1 – Detailní popis modelu kryovývěvy pro ITER [21]*

Na **obr. 6-1** je znázorněna hlavní čerpací komponenta, kterou tvoří nerezové kryopanely pokryté aktivním uhlím. Tyto panely jsou chlazené na velmi nízké teploty – pouze 4,5 Kelvinů. Díky této teplotě kondenzují všechny plyny, kromě nejlehčích, tedy helia a vodíku, které jsou čerpány kryosorpcí. Čerpací rychlost této vývěvy je  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  a závisí především na vakuové vodivosti přívodního potrubí a vstupního otvoru kryovývěvy. Tepelný štít, označený zelenou barvou, obsahuje komponenty pro odsávání těžších plynů, jako například vodní páry nebo  $\text{CO}_2$  [21].

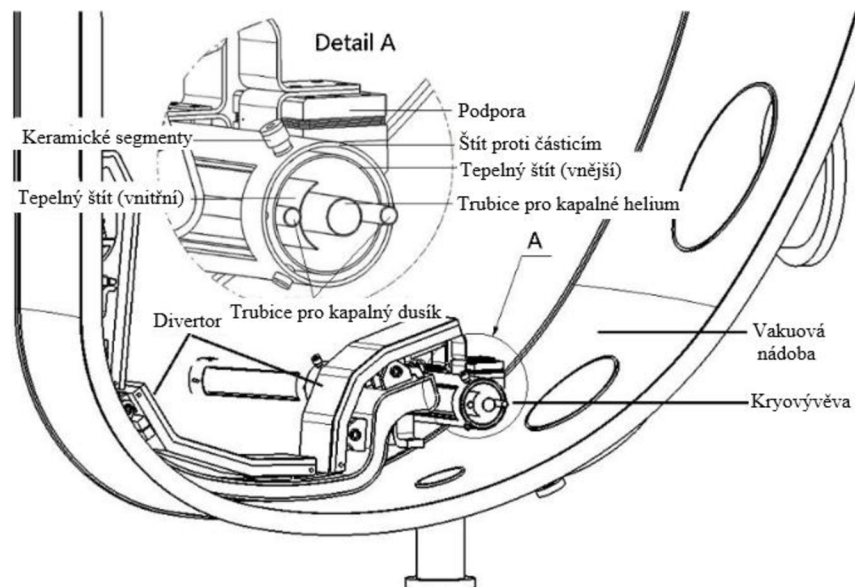
Umístění kryogenní vývěvy v tokamaku ITER je znázorněno na **obr. 6-2**.



*obr. 6-2 – Boční pohled na divortorové čerpací potrubí s kryovývěvou pro ITER [22]*

## 6.2 In-vessel kryovývěva tokamaku HL-2M

Dne 4. prosince 2020 byl v Southwestern Institute of Physics, China National Nuclear Corporation (CNNC-SWIP) uveden do provozu experimentální měděný tokamak střední velikosti s názvem HL-2M. Tento nový stroj je modifikací tokamaku HL-2A, ale kvůli velkým změnám se jedná prakticky o nový reaktor, který bude využívat mnoho subsystémů z tokamaku HL-2A. Díky využití silného magnetického pole o hodnotě až 2,2 T k fúzi horkého plazmatu o proudu 2,5 MA, je tento čínský fúzní reaktor nazýván "umělé slunce" a má velký potenciál uvolnit silný zdroj čisté energie. Kryogenní systém HL-2M poskytuje nízkoteplotní a vakuové prostředí pro chlazení extrakční kryopumpy v blízkosti divertoru a supravodivých magnetů. Reaktor byl navržen s demontovatelnými toroidními cívkami a celosvařovanou vakuovou nádobou v toroidální konfiguraci. Pro plazmové experimenty HL-2M využívá demontovatelné cívky, což zvyšuje jeho dostupnost a flexibilitu. Předpokládané rychlosti čerpání kryopumpy jsou pro  $H_2$  20  $m^3/s$ , pro  $D_2$  15  $m^3/s$  a pro He 12,5  $m^3/s$ . Tyto rychlosti značně ovlivňují vodivost divertoru [23].



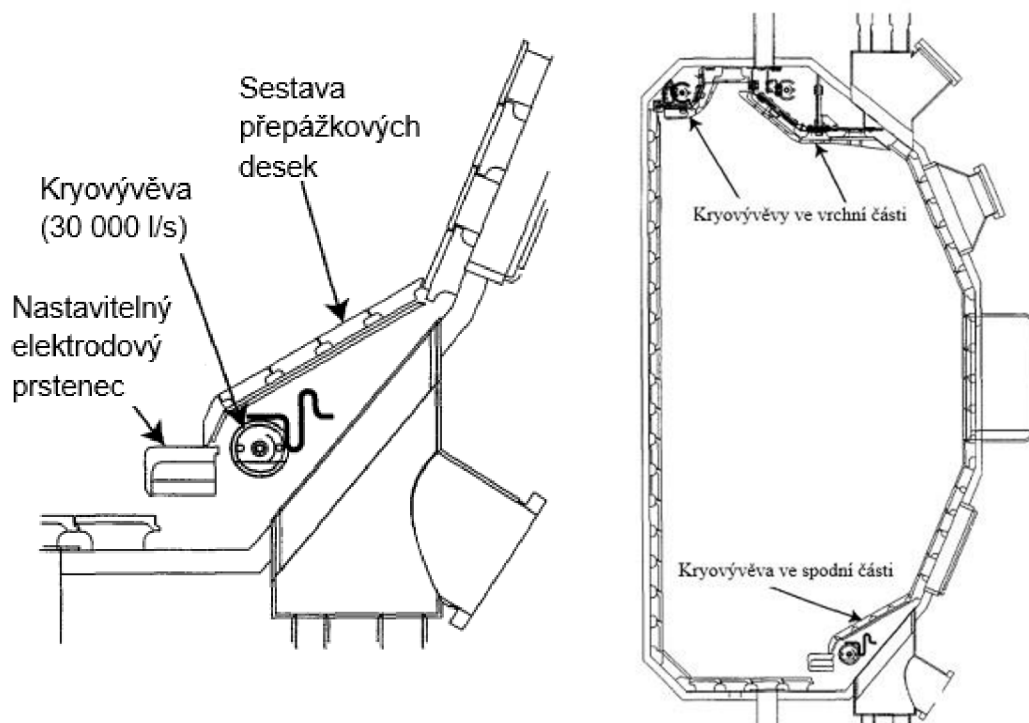
obr. 6-3 – Umístění a popis vnitřního uzpůsobení kryogenní vývěvy HL-2M [23]

Kryopumpa v reaktoru HL-2M je složena z čtyř soustředných trubic, jak ukazuje **obr. 6-3**. Nejvnitřnější čerpací plocha o průměru 25 mm je vyrobena z materiálu Inconel 625 a chlazená kapalným heliem. Tuto plochu chrání dvě vrstvy štítů chlazených kapalným dusíkem, z nichž každá je svařena s chladicí trubicí o průměru 12,7 mm. Nejvíce vnější je radiační a částicový štít. Kryopumpa má vnější průměr 96

mm a je toroidně spojena s poloměrem 1890 mm. Studie základní konfigurace byla prováděna na základě kryopumpy DIII-D [23].

### 6.3 In-vessel kryovývěva tokamaku DIII-D

Tokamak DIII-D, umístěný v General Atomics v Kalifornii, využívá kryovývěvy naplněné kapalným héliem, které se nacházejí v blízkosti divertoru, k udržení stabilního stavu plazmatu. Tento tokamak má magnetické pole s maximální hodnotou 2,2 T a plazma v něm dosahuje teploty až 100 milionů stupňů Celsia. Rozměry tokamaku DIII-D jsou 1,7 metru vnitřního průměru, 3,4 metru vnějšího průměru a celkové délky 15 metrů [24].

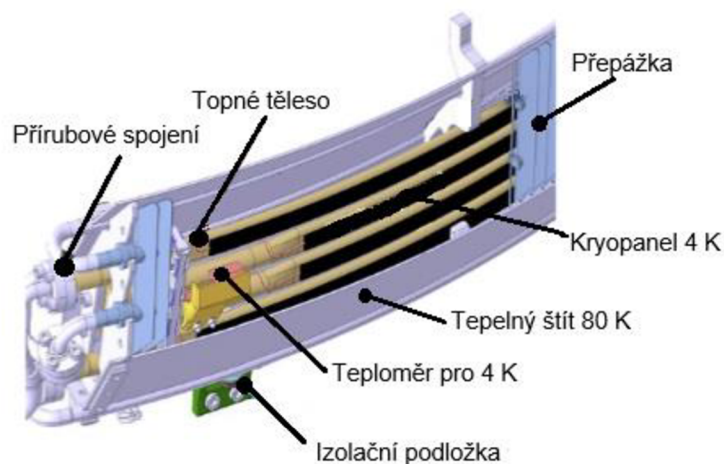


*obr. 6-4 – Umístění a schéma kryovývěv v tokamaku DIII-D [25]*

Kryovývěvy DIII-D viz **obr. 6-4** dosahují čerpacích rychlostí 15-30 m<sup>3</sup>/s pro helium a jsou navrženy pro výboje tokamaku až do 3 MA proudu plazmatem při toroidálním poli velikosti 2,2 T. Celý tokamak má k dispozici tři kryovývěvy umístěné v komoře tokamaku, které se skládají ze série soustředných trubek sestavených do jednoho celku. Díky robustní, jednoduché, levné a spolehlivé konstrukci čerpadel v DIII-D byl obdobný design adaptován pro použití na dalších tokamacích [25].

## 6.4 In-vessel kryovývěva tokamaku ASDEX-Upgrade

Kryogenní vývěva pro tokamak ASDEX Upgrade se od ostatních vývěv konstrukčně liší a využívá složitější tvar pro vnější obal kryovývěvy. Místo jedné trubky pokryté aktivním materiálem má tyto trubice 4 a jsou chlazeny na teplotu okolo 4 K. Vstup do vývěvy je opatřen vstupní radiační clonou a chlazen tekutým dusíkem na teploty kolem 80 K. Vývěva dosahuje čerpacích rychlostí kolem  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  a je navržena pro prostředí s disrupcemi a s proudem plazmatu 2 MA při magnetickém poli 3,1 Tesla. Vypékací teploty vývěvy jsou kolem  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  a vypnutý stav vývěvy snese pouze, když je teplota vakuové komory blízko pokojové teplotě [26].



*obr. 6-5 – 3D model kryogenní vývěvy pro vrchní divertor v ASDEX Upgrade [26]*

U uvedeného **obr. 6-5** vyobrazující část divertoru a kryogenní vývěvy u tokamaku ASDEX Upgrade je patrné, že využití kryogenních vývěv v tokamaku není neobvyklé.

## 6.5 Vyhodnocení kryogenních vývěv v tokamacích

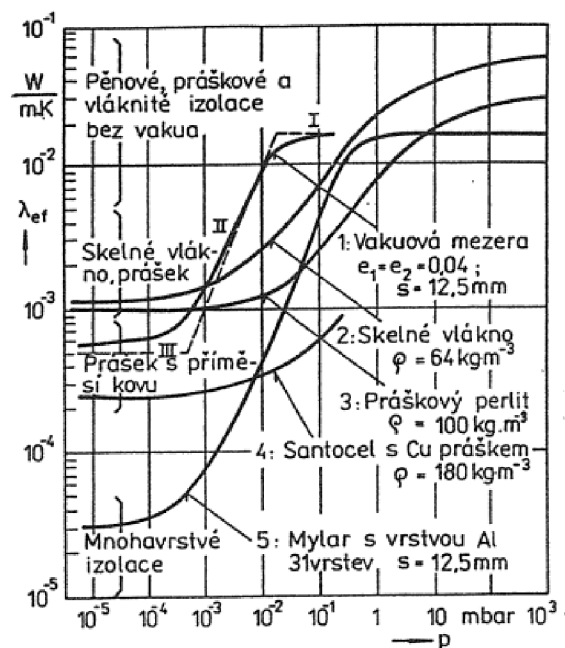
Výsledky ukazují, že individuálně navrhované vývěvy dosahují vyšších výkonů, než jaké by byly schopny dosáhnout komerční vývěvy. Navíc, kvůli své konstrukci, by komerční vývěvy nemohly být použity u divertoru a nebyly by schopny odolat působení sil a neutronů. Pozitivem je, že kryogenní vývěvy, jako například ta vyvíjená pro ITER, mají potenciál být v budoucnosti úspěšné. Nicméně, stále zůstává otevřený problém s provozem při vysokých teplotách okolo  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , což zatím nebylo vyřešeno ani v tokamacích ani v jiných komerčně dostupných vývěvách.

## 7 Izolace

Izolace hrají v této technologii zásadní roli, jak pro těleso kryovývěvy, tak pro konstrukci potrubního vedení chladicích médií k vývěvě. Kryogenní plyny musí být udržovány na ideální teplotě pro jejich použitelnost v kapalné formě. Přeprava kapalných plynů (viz kapitola prostorové podmínky), může být do velkých vzdáleností, přes stěny či skrze jiné překážky, porty do chladicího systému. Při nežádoucím zahřátí plynu dochází ke ztrátám efektivity. I malé ztráty tepelného výkonu mohou mít významný dopad na proces. Optimální kryogenní izolace je mimořádně důležitá.

### 7.1 Kryogenní izolace

V kryogenním prostředí se uplatňuje několik typů izolací. Příkladem jsou rozšířené pěnové izolace s uzavřenými buňkami, plynně plněné prášky a vláknité materiály, aerogelové a vakuové izolace, izolaci s mikročásticemi a MLI izolace. Každý typ izolace má své charakteristické vlastnosti a nejčastěji se uplatňují v různých kombinacích. V tokamakových zařízeních jsou nejvíce používanými izolacemi vakuová izolace samostatně nebo v kombinaci s MLI izolací jako součástí vakuové izolace. Diagram na **obr. 7-1** zobrazuje souhrnný přehled dosahovaných hodnot efektivní tepelné vodivosti různých typů izolací při různých tlacích v izolační mezeře. Tento přehled ukazuje, jak se tato vlastnost mění v závislosti na tlaku [28],[29].



obr. 7-1– Diagram vlastností různých druhů izolací [28]

## 7.2 Vakuová izolace

Princip vakuové izolace spočívá v odstranění co největšího množství plynu z prostoru mezi dvěma stěnami. Vakuum nevede teplo a samo o sobě se nemůže ohřát nebo ochladit, protože neobsahuje žádnou hmotu. Díky této vlastnosti udržuje v okolních prostorech extrémně nízké teploty a minimalizuje tepelné ztráty ve srovnání s konvenčními izolačními materiály až o 95 %. Pro správnou funkci vakuové izolace je nutné vakuum trvale udržovat těsností systému nebo pomocí vývěv [28].

## 7.3 Vakuová izolace s multivrstvou izolací

Mnohavrstvá izolace MLI (Multi-Layer-Insulation) je další známou izolací v oblasti kryogeniky. Tato izolace má několik vrstev tenké metalizované izolační fólie by se zabránilo tepelnému kontaktu mezi sousedními vrstvami, materiál bývá často žebrovaný nebo mezi vrstvy je vložena tenká vrstva skelného vlákna. [28].

## 7.4 Komerční příklad multivrstvé izolace

COOLCAT 2 NW viz **obr. 7-2** je skvělý materiál na superizolaci. Tento materiál se skládá z 10 vrstev polyesterové fólie, která je z obou stran aluminizovaná a perforovaná, díky tomu vydrží teploty až do 423 K. Mezi vrstvami je netkaný polyesterový materiál, který slouží jako výplň. Nominální tloušťka komprese je 1,4 mm na 10 vrstev. Pokud je materiál správně nainstalován, může zaručit skvělou izolační výkonnost. Oproti jiným superizolacím tato nabízí více robustní tepelnou výkonnost, zejména v rohových a stlačených oblastech. Tato MLI obsahuje dimenzionálně stabilní netkané prostorové materiály, které umožňují snadnou manipulaci a instalaci [31].



*obr. 7-2 – Fotka komerčně dostupné superizolace COOLCAT 2 NW [31]*



## 8 Zdroje chladu

V kryogenickém odvětví se pro různé technologie používají jako zdroje chladu kryogenní kapaliny tedy zkapalněné plyny. Mezi nejčastější kryogenní kapaliny na chlazení komponent patří kapalný dusík a kapalné helium. Aby se zachovala jejich kapalná forma, musí být kapalné plyny skladovány, přepravovány a používány při velmi nízkých teplotách. Veškeré tepelné ztráty způsobují nežádoucí odpar kryokapalin. Dosahované teploty se mění podle používané kryogenní kapaliny a podle tlakové úrovně využití kryokapalin. V **Tab. 3** jsou uvedeny teploty varu látek při tlaku 101 300 Pa.

**Tab. 3** – Teploty varu látek při tlaku 101 300 Pa podle [28]

Látka	Chem. označení	Označení jako chladivo	Normální teplota varu [K]	[°C]
Helium - 3	<sup>3</sup> He	-	3,191	-269,959
Helium - 4	<sup>4</sup> He	R704	4,215	-268,935
Vodík	H <sub>2</sub>	R702n	20,3	-252,77
Deuterium	D <sub>2</sub>	-	23,6	-249,55
Neon	Ne	R720	27,09	-246,06
Dusík	N <sub>2</sub>	R728	77,35	-195,8
Vzduch	-	R729	78,8	-194,35
Oxid uhelnatý	CO	-	81,61	-191,54
Fluor	F <sub>2</sub>	-	84,95	-188,2
Argon	Ar	R740	87,29	-185,86

### 8.1 Zkapalňování plynu

Před použitím kryokapalin je nutné dané plyny zkapalnit. Běžné jsou velké průmyslové zkapalňovače pro plyny s výparnou teplotou kapalného dusíku nebo vyšší. S poklesem teploty varu jednotlivých látek narůstá energetická náročnost zkapalňování. U kryokapalin, které jsou využívány v menších objemech nebo jsou vzácné, připadá v úvahu aplikace v uzavřeném okruhu, který je doplněn o kryogenní zkapalňovač. Toto je typické provedení pro heliový kryogenní okruh. V tomto případě je z dlouhodobého pohledu hlavním zdrojem chladu expanze plynu a jeho zkapalnění. Kryogenní kapalina je poté pouze prvkem pro transport chladu. Expanze plynu ve zkapalňovačích je nejčastěji prováděna expanzí s odvodem práce pro efektivnější získání části potřebného chladu a následné expanze v Joul-Thomsonově ventilu, kde dochází k finálnímu zkapalnění podchlazeného plynu.

Z hlediska správné funkce expanze plynu s cílem získat chlad je nutné tuto

expanzi realizovat pod tzv. inverzní teplotou daného plynu. Inverzní teplota určuje teplotu, pod kterou při expanzi začíná docházet k poklesu teploty (získání chladu). Pokud k expanzi plynu dochází nad inverzní teplotou, tak dochází naopak k ohřevu plynu. V **Tab. 4** jsou uvedeny inverzní teploty vybraných látek.

**Tab. 4** – Inverzní teploty vybraných látek [28]

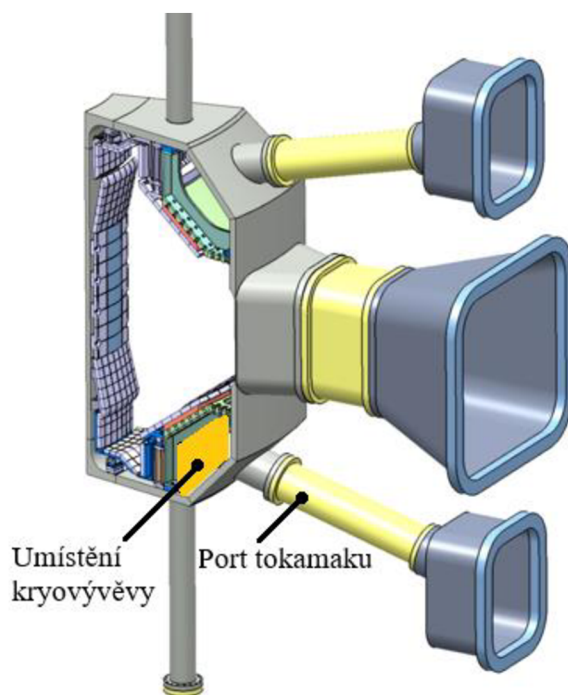
<b>Plyn</b>	<b><math>T_{inv}</math> [K]</b>
Xenon	1476
Krypton	1079
Methan	953
Oxygen	771
Argon	765
Air	650
Dusík	604
Neon	230
Vodík	204
Helium-4	46
Helium-3	39

## Experimentální část

### 9 Okrajové podmínky vyvíjené kryovývěvy a připojení

#### 9.1 Prostorové podmínky

V koncepci poddivertorových vývěv figuruje hlavně omezený prostor. Místa sloužící k uložení a ke správnému uspořádání samotné kryovývěvy a přívodního potrubí pod divertorem jsou technologicky omezená, a proto je konstrukce s dodržением všech podmínek náročný úkol. V navrhované koncepci bude cílem minimalizovat rozměrové charakteristiky na co nejnižší úroveň. Tokamakové konstrukce mají porty viz **obr. 9-1**, v nichž jsou vedeny potrubí, kterými proudí chladicí média dovnitř ke kryovývěvě a zpět ven z tokamaku. Dále těmito kanály vedou potrubí s odsátými nečistotami a spaliny, v době regenerace kryoprostoru uvnitř kryovývěvy. Pro návrh přívodního potrubí je důležitá délka a průměr portu, přes který musí procházet. Port má čistý vnitřní průměr 150 mm. Vzdálenost mezi předpokládaným umístěním vývěvy a přírubou s vakuovou průchodkou byl stanoven na cca 1 m.



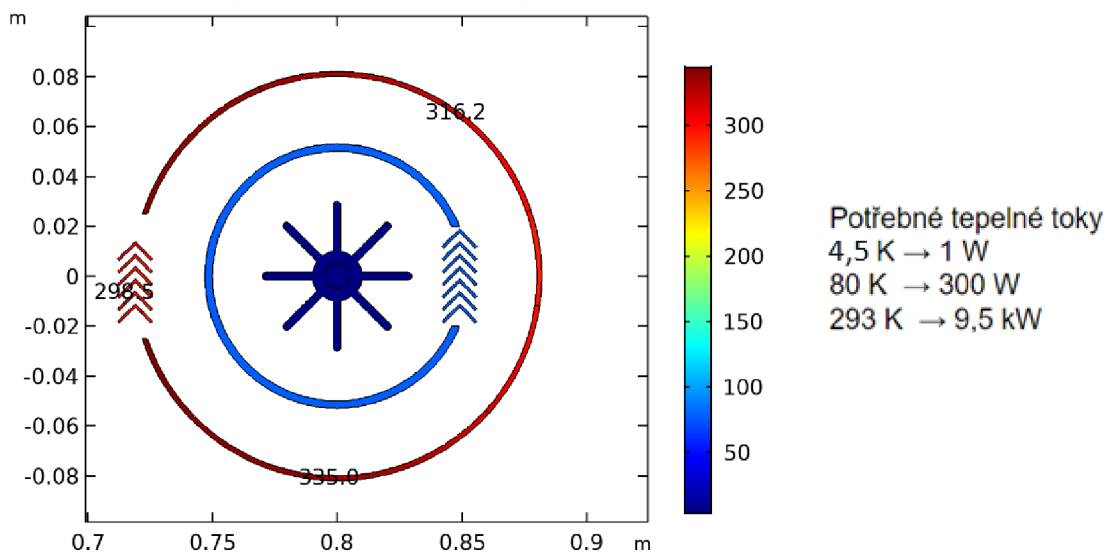
*obr. 9-1 – Schéma umístění kryovývěvy a vedení potrubní části portem [27]*

## 9.2 Teplotní podmínky

Protože instalace kryogenní vývěvy v tokamaku je náročný a zdlouhavý proces, musí navrhovaná kryogenní vývěva zvládat všechny tepelné situace, které mohou v tokamaku nastat za normálního provozu. Maximální provozní teplota pro vakuovou komoru ITERu je 220 °C, pro některé koncepty fúzní elektrárny DEMO se počítá s teplotou až 500 °C. Pro provoz se počítá s krátkými provozními režimy při vyšších teplotách, kterým musí kryogenní vývěva odolat bez poškození, ale není nutné za nich garantovat plný výkon. Tepelné rozpětí tedy zahrnuje teploty od cca 4 K do cca 773 K.

## 9.3 Tepelné podmínky

Tepelný tok na prvním vnějším stupni kryovývěvy je navrhován na max. 4 kW. První provedené výpočty na zjednodušeném koncepčním návrhu kryovývěvy viz kapitola “Koncepční návrhy“ pro dvouplášťovou konfiguraci definují tepelné toky vyšší než ~9 kW (viz **obr. 9-2**) při teplotě prvního stupně cca 330 K. Pro snižování tepelných toků je důležitý výběr vhodného způsobu odstínění pro odraz viz kapitola “Vstupní clona“, či absorpci infračervených paprsků ze záření a použití správné tepelné izolace kolem vnějšího průměru celku kryovývěvy. Pro dosažení požadovaného maxima tepelného toku prvního stupně kryovývěvy, bude nutné doplnit uvedenou koncepci o dodatečné vnější odstínění viz kapitola “Vstupní clona“. Toto odstínění bude pravděpodobně provedené formou vysokoteplotní multivrstvé izolace.



*obr. 9-2 – Schéma vnitřního uspořádání vyvíjené kryovývěvy s teplotními toky*

## 9.4 Vakuové podmínky

Za běžného provozu tokamaku se pohybuje tlak ve vakuové komoře v rozsahu (0,01-10) Pa po dobu několika sekund výboje. Mimo výboj je potřeba vakuovou komoru tokamaku odčerpát na co nejnižší tlak. Čerpáním mezi výboji se snažíme dosáhnout ve vakuové komoře co největší čistoty pro následující výboje. Z dnes zkoumaných provozních scénářů fúzní elektrárny se může počítat s tlakem v divertoru řádově několik pascal. Odpadní plyny ve vakuu se odhadují ve složení majoritně z izotopů vodíku s minoritním zastoupením He a stopovým množstvím dalších plynů ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO^2$ , Ne, Ar).

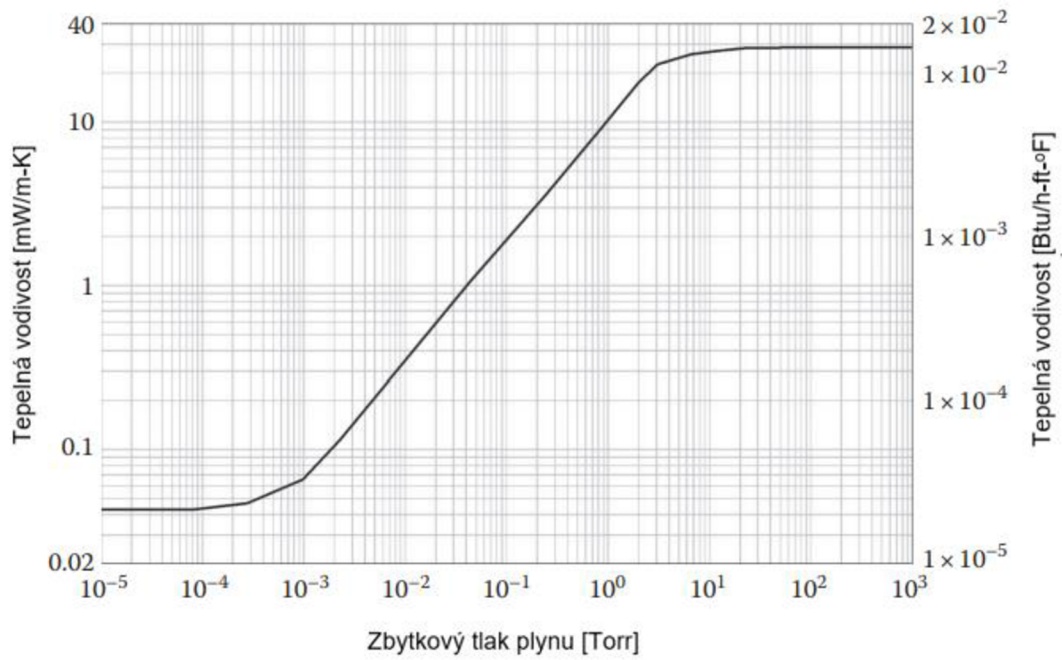
## 10 Tepelné stínění

Tato část práce se zaměřuje na minimalizaci tepelného namáhání neboli zabránění tepelných toků z horkých částí na vnitřní komponenty kryovývěvy. V této souvislosti se jedná výhradně o vstupní clonu, radiační štíty, čerpací těleso a potrubní vedení chladících médií.

### 10.1 Problematika přenosů tepla

Hlavními způsoby přenosu tepla jsou tepelné sdílení zářením (radiace), sdílení tepla vedením materiálem, či tělesem a pracovním médiem (kondukce), či sdílením tepla přestupem mezi tělesem a pracovním médiem (konvekce). Záření přenáší teplo elektromagnetickými vlnami do prostoru, kde se tyto vlny mohou absorbovat nebo odrazit od jiných těles. Tento druh přenosu tepla může probíhat i v prostoru bez hmoty, tedy i ve vakuu. Sdílení tepla vedením je přenos tepla pevnými látkami či kapalinami, kde teplejší část systému odevzdává svou teplotu chladnější části, dokud se teploty nevyrovnají. Konvekce je pro zopakování přestup tepla mezi tělesem a pracovním médiem. Cílem je tedy minimalizovat všechny tyto druhy přenosů tepla.

Očekávaným převládajícím způsobem přenosu tepla na kryovývěvu je infračervené záření. Méně dominantním přenosem tepla je kondukce. Oproti záření je vedení plynou fází omezeno nízkými provozními tlaky, které se v tokamaku vyskytují. Při nízkých tlacích se hustota plynu snižuje a tím se zmenšuje i množství tepla, které lze tímto způsobem přenést, respektive když je provozní tlak plynu nízký, znamená to, že je plyn řidší a má menší hustotu, což omezuje množství tepla, které může být přeneseno. Jelikož v této aplikaci se tlaky pohybují kolem hodnoty 10 mPa ( $7,5 \times 10^{-5}$  Torr), tedy dle **obr. 10-1** vyobrazujícím vedení tepla plynou fází se v těchto řádech nepřenáší teplo kondukcí [28],[29].



*obr. 10-1 – Tepelná vodivost plynu v závislosti na tlaku [29]*

Na minimalizaci radiačního tepelného toku se využívají koncepty tepelných štítů, ať pasivních či aktivně chlazených. Aktivní štíty využívají všechny kryovývěvy uvedené v rešerši výše. Verze pasivních štítů je např. Multi-Layer-Insulation (MLI), kde se střídají vrstvy vysoko odrazivých plátů s distančními vrstvami.

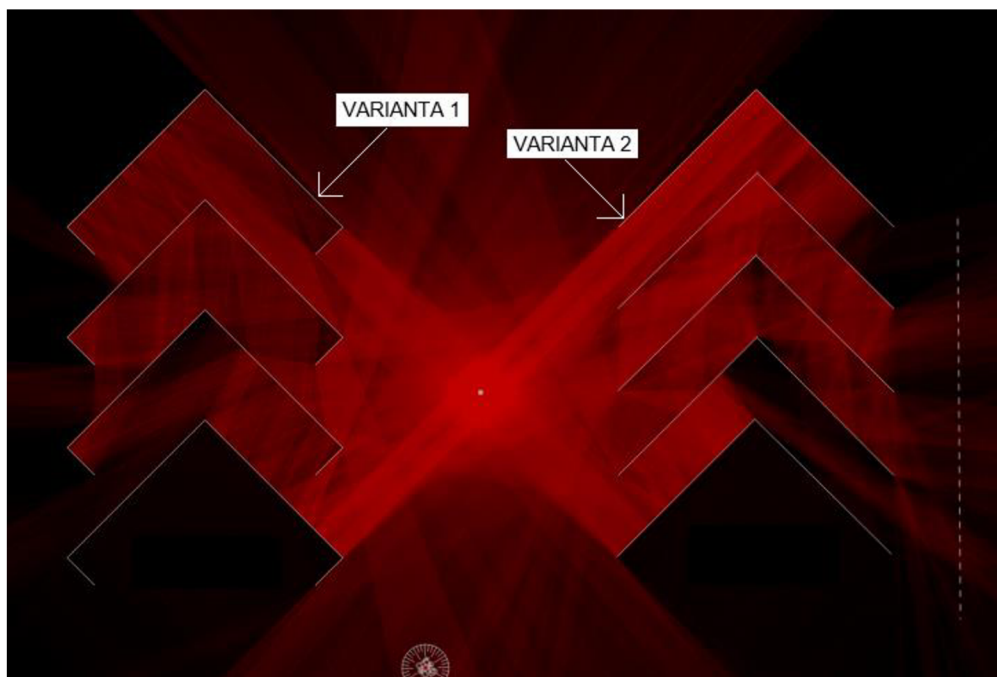
## 11 Vstupní clona

Primárním úkolem vstupní clony je zabránit vstupu IR záření do tělesa vývěvy a zároveň umožnit propustnost molekul plynů. Na druhou stranu musí být její snahou snížit jejich teplotu. Tradičně je toho docíleno pomocí relativně blízko u sebe naskládaných rohových profilů. Ty jsou vyrobeny z materiálu s dobrou tepelnou vodivostí, který je aktivně chlazený a opatřený vrstvou s nízkou reflektivitou pro infračervené záření.

Další funkcí, kterou je vhodné integrovat do vstupní clony je možnost částečného nebo úplného oddělení vnitřního prostoru vývěvy od čerpaného objemu pomocí natáčení lamel. Není však cíleno na provedení, které by bylo vakuově těsné. Zmíněné oddělení prostorů není zahrnuto do vývoje této práce, nýbrž tato myšlenka může sloužit jako podmínka pro následující výzkum.

Aplikací dodatečné vnější vrstvy odstínění (multivrstvé izolace) a s pomocí speciálně vytvarovaných radiačních clon kombinující radiačně odrazivé a radiačně pohlcující plochy se srazí tepelný výkon vstupující do kryovývěvy na 4 kW, čímž se tato hodnota wpisuje do vstupních parametrů této práce.

V rámci vývoje byly zkoumány různé tvary lamel a nejvhodnějším se zdá být forma “stromečkovitá“. Podrobnější vývoj uzpůsobení lamel není dále předmětem této práce.



*obr. 11-1– Schéma různých variací vstupních clon pro odraz IR záření*



## 12 Čerpací těleso

Povrch aktivní vývěvy musí splňovat několik požadavků, jako je co největší plocha v omezeném objemu, nízká konstantní teplota v čase a prostoru a optimální tepelná kapacita. Nízká tepelná kapacita umožňuje rychlé změny pracovního režimu a vysoká kapacita poskytuje větší odolnost vůči přechodovým jevům, což je výhodné pro aplikace ve fúzních elektrárnách. Povrch musí také umožňovat vysokou propustnost pro molekuly plynu a splňovat všechny ostatní požadavky. Tělesa ve tvaru hvězdic se jeví jako nejvhodnější, protože mají vysoký poměr plochy k objemu, umožňují snadnou integraci chladicího kanálu a mají vysokou tuhost vzhledem k objemové hustotě. Příklad uzpůsobení komerčně dostupného profilu viz **obr. 12-1**, se kterým by bylo možno počítat.



*obr. 12-1 – Ilustrační fotka komerčně dostupného profilu*

Sorpční materiál deponovaný v prostoru aktivního povrchu kryogenní vývěvy je jednou z nejdůležitějších komponent, z hlediska dosahovaného výkonu. Z rešerší vyplývá, že z fúzních zařízení je nejběžnější použití aktivovaného uhlí. Tento komerčně dostupný profil, či aspoň jeho tvar bude dále použitý v navrhované koncepci.

### 12.1 Aktivní část kryovývěvy – $^4\text{He}$

Pro aktivní část kryovývěvy bylo zvoleno jako zdroj chladu LHe neboli kapalné skupenství helia z důvodu dosažení nízké výparné / kondenzační teploty. Pro volbu tlakové úrovně vycházíme z **Tab. 5**. Vstupní potrubí do kryovývěvy volíme na základě výpočtu viz **Tab. 7** trubku o průměru 6 mm a tloušťce stěny 1 mm z nerezové oceli s označením 1.4541. Tento typ oceli dle katalogu SCHWER disponuje tlakovou třídou

s označením PN400, což znamená, že je schopný odolat maximálnímu provoznímu tlaku 400 barů. Z hlediska tlakových ztrát, je toto potrubí vhodné pro tuto aplikaci. Stejnou úvahu nese i výstupní potrubí viz **Tab. 8**, které bylo zvoleno v rozměrech vnějšího průměru 10 mm s tloušťkou stěny 1,5 mm s PN365. Větší průměr na výstupu volíme pro případ selhání stínění a prudký var helia uvnitř aktivní části kryovývěvy. Před skutečnou realizací by byla provedena kontrola volby průměru výstupní trubky a připojeného pojišťovacího ventilu – na základě analýzy rizik.

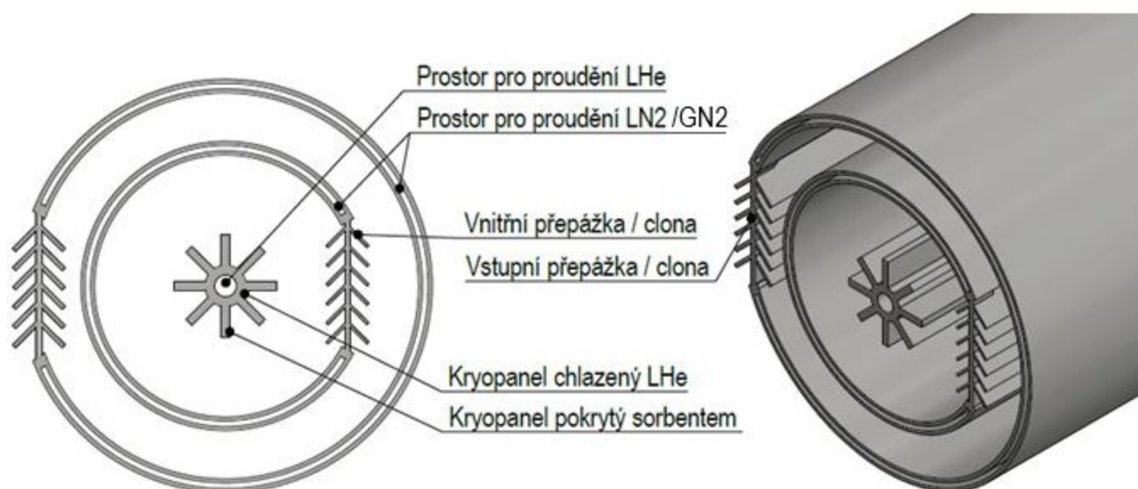
## **12.2 Stínění aktivní části kryovývěvy – N<sub>2</sub>**

Pro stínění aktivní části kryovývěvy volíme jako zdroj chladu LN<sub>2</sub> z důvodu dobrého poměru dosažitelné kryoteploty / cena chladu. Pro volbu tlakové úrovně vycházíme z **Tab. 5**. Obdobným postupem popsaným v kapitole 12.1 bylo vybráno vstupní potrubí o průměru 8 mm s tloušťkou stěny 1 mm s PN310 z hlediska tlakových ztrát postačí. Výstupní potrubí bylo zvoleno potrubí o rozměrech 28x2 (PN185), násobně větší průměr volíme pro případ havarijního varu celého objemu LN<sub>2</sub>. Výpočty k těmto potrubím viz **Tab. 9** a **Tab. 10**. Před skutečnou realizací by byla provedena kontrola volby průměru výstupní trubky a připojeného pojišťovacího ventilu – na základě analýzy rizik. Pro výstupní potrubí s teplotou cca 330 K není potřeba vnější izolace.

## 13 Koncepční návrhy

### 13.1 První koncepční návrh

Z rešerše byly shromážděny informace, na jejichž základě byl navržen první koncept zobrazen na **obr. 13-1**. Tvar konceptu byl inspirován již známými funkčními uspořádáními kryovývěv, takových jako figurují v tokamaku DIII-D a HL2M. Koncept sestává z vnějšího štítu, kterým prochází GN<sub>2</sub> neboli chladný plyn o teplotě cca 330 K. Vnitřním štítem prochází kryokapalina v podobě LN<sub>2</sub>, oba štíty jsou opatřeny vstupními přepážkami, či clonami. V centru se nachází čerpací těleso popsané podrobněji v kapitole “Čerpací těleso“, kterým prochází kapalné helium. Obálka kryovývěvy byla navržena s délkou 1 metr a maximálním vnějším průměrem 150 mm. Následně byl zjednodušený koncept podroben matematickým a numerickým výpočtům v programu Molflow. Kruhový tvar komponent umožnil použít jednoduché výrazy pro výpočet geometrického faktoru viditelnosti a tím i přenosu tepla záření. Výpočty odhalily odhadované tepelné toky, jak je uvedeno v kapitole 9.3 a znázorněno na **obr. 9-2**, spolu



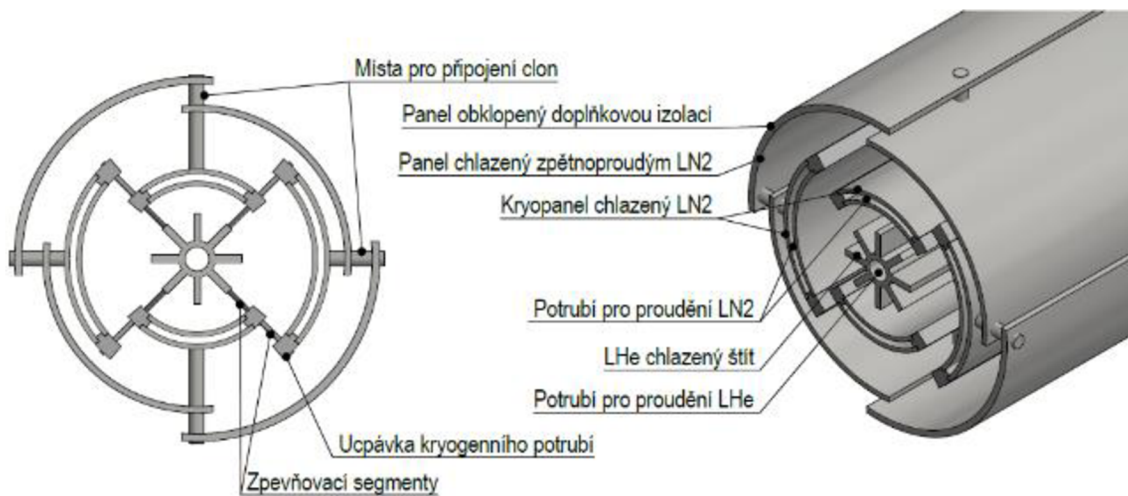
*obr. 13-1 – První zjednodušený koncept vyvíjené kryovývěvy*

s dalšími vstupními parametry pro následnou modifikaci.

### 13.2 Modifikace vyvíjeného konceptu kryovývěvy

Jako hlavní směr práce byl zvolen ideový návrh uzavřít kryovývěvu do další vrstvy tepelného štítu. Tento přístup se liší od klasického návrhu kryovývěvy, který využívá pouze jednoho tepelného štítu na teplotě blízké tekutému dusíku. Přidáním

tepelného štítu na pokojové teplotě do interní části kryovývěvy viz **obr. 13-2** byl dosažen výrazně nižší sled tepelných toků směrem k čerpacímu tělesu.



*obr. 13-2 – Modifikace vyvíjené kryovývěvy*

Koncepční proudění kryogenních kapalin je založené na nejméně 4,5 K teplotou cca 4,5 K protékáním kapalného helia vnitřním průřezem čerpacího tělesa, kde přenos tepla je uskutečněn prostřednictvím vedení v našem případě chladu přímým kontaktem přes stěnu. Tím bude ochlazen porézni materiál na žebrech, aby plnil kryosorpční funkci. U průtoku helia středem kryovývěvy bude docházet k fázové změně. Zpevňovací segmenty jsou ve stavbě důležité z hlediska geometrické soudržnosti a zpevnění konstrukce.

Pro zajištění správného provozu tokamaku je nezbytná čistota prostředí, konkrétně čistota vakua ve vakuové komoře. Bylo zjištěno, že v daných zařízeních je běžné mít těchto komponent více, což bylo ověřeno v tokamaku HL2M a DIII-D. Na základě těchto zkušeností bylo rozhodnuto, že v tokamaku, dle této navrhované koncepce, bude instalováno celkem čtyři takové komponenty. Je důležité poznamenat, že v tokamaku je vždy aktivní pouze jedna kryovývěva, zatímco ostatní se nacházejí v režimu regenerace, jak je popsáno v kapitole “Pracovní režimy tokamaků”. Geometrické vlastnosti jsou totožné s prvním koncepčním návrhem popsaným výše.

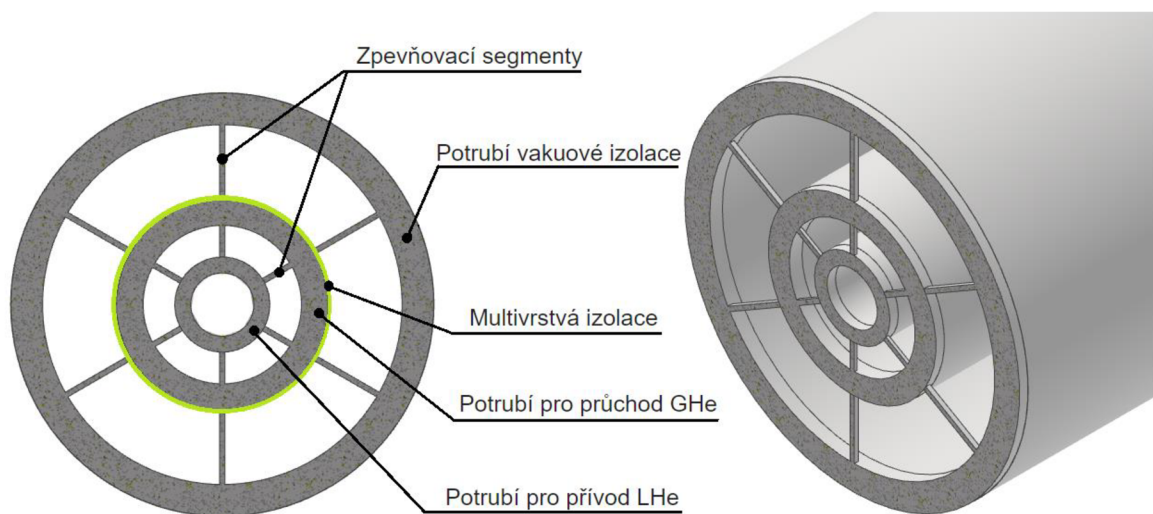
### 13.3 Volba materiálu

K uskutečnění výpočtů je nezbytné vybrat správný materiál. Pro vakuové systémy se obvykle používají materiály s nízkou permeací, což znamená, že jsou

schopny minimalizovat průchod plynu přes materiál. Mezi takové materiály patří obecně kovy jako například hliník, měď nebo nerezová ocel případně i speciální keramické materiály. Tyto materiály umožňují dosažení vysoké vakuové úrovně. Zvolená nerezová ocel s označením 1.4301 je běžně používaný materiál, který je dle ČSN EN 13 445 atributivně vhodný pro aplikace v kryogenních teplotách. Tyto vlastnosti umožňují použít 1.4301 pro vakuové prostředí. Při volbě materiálu pro kryogenní systémy je také velmi důležitou veličinou tepelná vodivost a teplotní roztažnost. Bylo rozhodnuto, že tento materiál bude použit na koncepční potrubní navrhované části a na některé části vyvíjené kryovývěvy [29]. Části jako jsou zpevňovací segmenty budou zhotoveny z titanu kvůli své nízké tepelné vodivosti a vysoké pevnosti a tuhosti vůči hmotnosti. Jiné úseky pro dobrou vodivost tepla budou ze speciálních slitin hliníku, kupříkladu z duralu

### 13.4 Koncepční návrhy potrubí

#### 13.4.1 První koncepce potrubní části



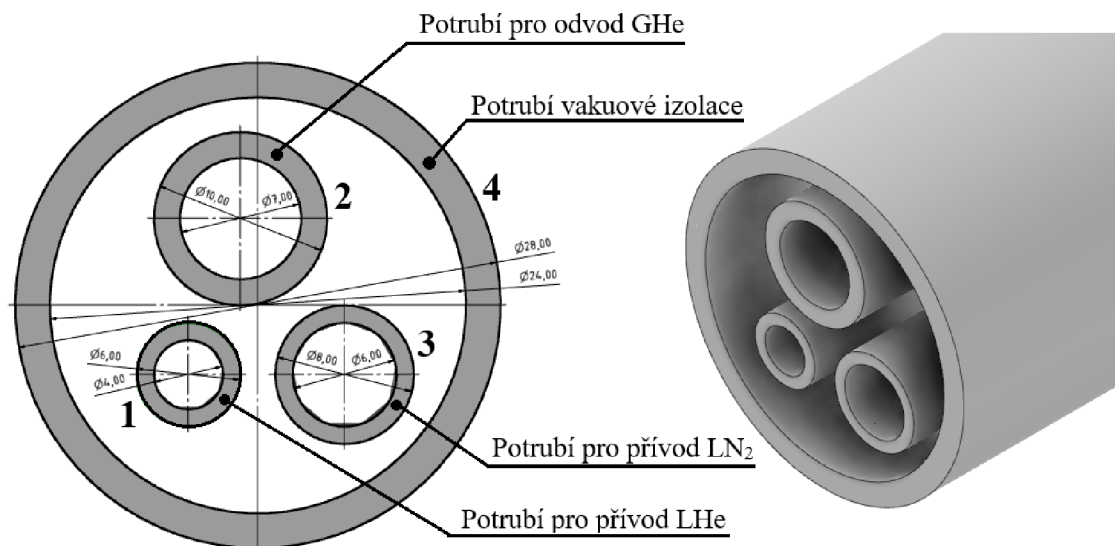
*obr. 13-3 – První koncepce potrubní části pro přívod LHe a GHe*

První výpočty prokázaly, že prvotní koncepce viz **obr. 13-3** potrubního připojení je příliš předimenzovaná a byla by vhodná pro výrazně větší průtoky chladicího média. Pomocí výpočtů tlakových ztrát dle **Tab. 7** a **Tab. 8** byly definovány malé požadované průměry potrubí, a proto byl prvotní návrh upraven a byly provedeny modifikace, které vedly k vytvoření nového designu.

### 13.4.2 Modifikace koncepce potrubní části

Díky provedení nového návrhu se celá koncepce stala méně náročnou na výrobu. Navrhované řešení zahrnuje uzavření tří trubek různých rozměrů do jedné potrubní obálky, která bude vložena do portu tokamaku. V souladu s mezními okrajovými podmínkami uvedenými v kapitole "Prostorové podmínky" byl stanoven vnější průměr obálky tak, aby nepřesáhl 150 mm. Tato požadovaná hodnota byla splněna, protože navržená obálka má vnější průměr 28 mm a stěnu o tloušťce 2 mm. Rozměry ostatních potrubních částí jsou popsány výše v kapitole "Aktivní část kryovývěvy --  ${}^4\text{He}$ " a "Stínění aktivní části kryovývěvy – N ${}^2$ ".

Finální tloušťky stěn bude nutné optimalizovat nejen z pohledu mezní tlakové odolnosti, ale také z pohledu vlivu elektromagnetického pole. Vliv působení elektromagnetického pole na konstrukci je nad rámec tohoto návrhu.



obr. 13-4 – Modifikace potrubní části

## 14 Výpočty a jejich teorie

### 14.1 Metodologie výpočtu

Vybírání vstupních parametrů pro helium bylo omezeno kritickou hodnotou teploty a tlaku. Na selekci dalších vlastností pro helium figurovala potřebná teplota okolo 4 K, pro správnou funkci speciálních jevů v jádru kryovývěvy. Interakcí s provedenými výpočty dle **Tab. 7** byla pomocí iterační metody vybrána odpovídající tlaková úroveň viz **Tab. 5**. Dle Národního ústavu pro standardy a technologie (NIST) dle [32] byly pomocí těchto vstupních parametrů určeny vybrané další důležité veličiny jako jsou například hodnoty hustot, entalpií, či různých tepelných kapacit, ze kterých výpočet sestává.

Podobným postupem byly zjištěny vybrané hodnoty veličin na výpočet pro dusík. Po provedení výpočtů dle **Tab. 9** byla pomocí iterační metody vybrána odpovídající tlaková úroveň viz **Tab. 5**.

Hlavním úkolem výpočtu bylo zjistit, jak velký tlakový spád bude od vstupní příruby potrubí viz **obr. 14-1** pro helium a viz **obr. 14-2** pro dusík, skrz kryovývěvu a dále do místa umístění zkapařovače. Na základě okrajových podmínek byla stanovena délka přívodního potrubí přibližně 1 metr. Průměr potrubí, které musí akceptovat všechna dílčí potrubí, byl určen na základně čistého vnitřního průměru potrubí a má hodnotu 150 mm. Funkce zkapařovacího systému je vysvětlen v kapitole výše s názvem “Stínění aktivní části kryovývěvy – N2“. Tato výsledná hodnota tlakového spádu by byla dále regulována čerpadlem, na kterém by se vypočítaná hodnota s danou rezervou nastavila.

Pro určení tlakového spádu byla potřeba vypočítat vzájemné ovlivnění tepelného vedení zařízením mezi potrubími, které každé nese jiné médium viz popis uzpůsobení potrubní části dle **obr. 13-4**. Pro výpočet ovlivňujících zářivých toků viz **Tab. 6** bylo důležité vybrání správného materiálu pro trubky jimiž proudily kryokapaliny. Dle kapitoly “Volba materiálu“ bylo rozhodnuto o celonerezovém provedení, tudíž například hodnota emisivity materiálu mohla být pro všechny totožná.

Znalost ovlivňujících tepelných toků mezi potrubími a hodnotami z programu Molflow dle kapitoly “Tepelné podmínky“ a **obr. 9-2** vykazující vlastní tepelné toky potřebné na uchlazení vnitřku kryovývěvy, přinesla výslednou hodnotu celkového požadovaného chladicího výkonu, které musí uchladit vybrané médium o konkrétním skupenství.

Dále bylo provedeno určení průměrů potrubních částí pro helium viz kapitola “Aktivní část kryovývěvy –  ${}^4\text{He}$ ” a pro dusík viz kapitola “Stínění aktivní části kryovývěvy –  $\text{N}_2$ ”.

**Tab. 5** – Vlastnosti použitých médií [32]

Na základě požadovaných teplot a rozměrových charakteristik dílčích potrubí umístěných relativně blízko sebe pro ochlazování vnitřní části kryovývěvy byly provedeny výpočty jednotlivých zářivých tepelných toků podle popisu na **obr. 13-4**. Jednotlivé toky pro konkrétní potrubí nesoucí dané médium jsou vyobrazeny v **Tab. 6**.

Výpočet byl proveden pro každé potrubí ve srovnání s ostatními potrubími pomocí vztahů dle [33]:

$$Q_{12} = S \times \varepsilon_{12} \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4), \quad (14.1)$$

kde  $\varepsilon_{12}$  [-] je součinitel vzájemné emisivity pro povrchy, které se obklopují [34]

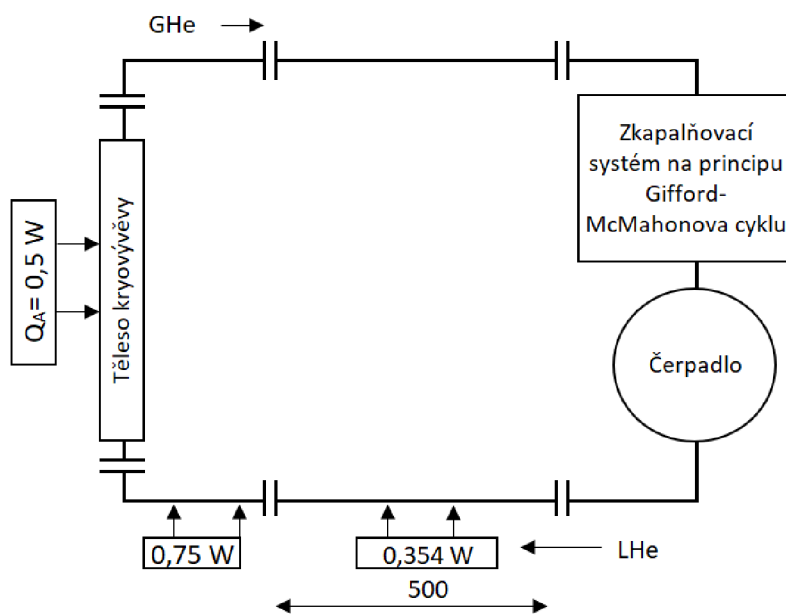
$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (14.2)$$

jelikož je potrubní vedení celonerezové a dalo by se opatřit hliníkovým pokovením vnějšího průřezu každé jedné trubky byla stanovena emisivita povrchu dle [33]:

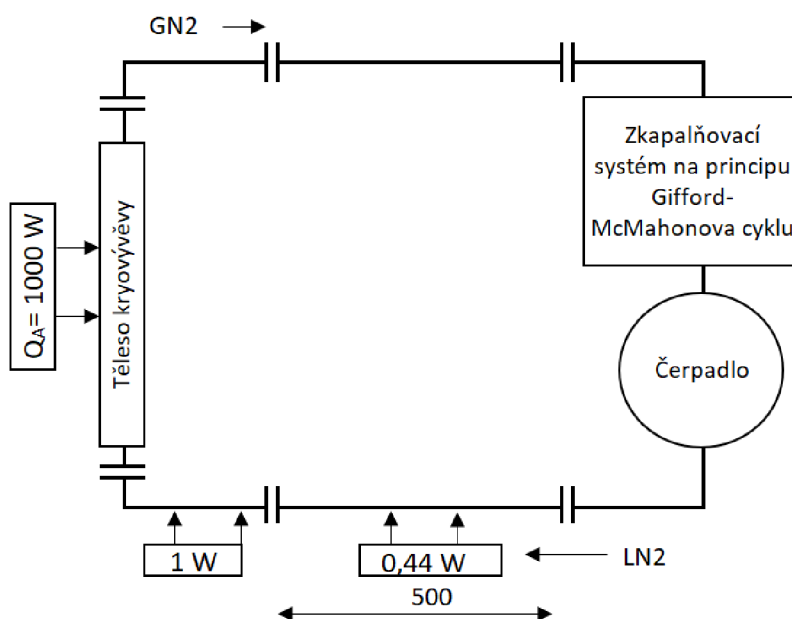
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,1. \quad (14.3)$$

Celkový výkon získáme součtem dílčích výkonů jednotlivých okruhů schematicky vyobrazených dle **obr. 14-1** pro helium a podle **obr. 14-2** pro dusík:





obr. 14-1 –Potrubní okruh vedení helia



obr. 14-2 –Potrubní okruh vedení dusíku

$$P(\text{celkový}) = P\left(\frac{1}{4}\text{ celku}\right) + P(\text{připojovací části}) + \text{Výsledný tepelný tok} \quad (14.4)$$

, kde  $P\left(\frac{1}{4}\text{ celku}\right)$  odpovídá výkonu jedné kryovývěvy v chodu, ostatní jsou ve stavu regenerace viz kapitola “Pracovní režimy tokamaků“.

Výparné teplo získáme

$$l_v = (h_1 - h_2) \quad (14.5)$$

Vztah pro výpočet hmotnostního průtoku:

$$m' = \frac{l_v}{P(\text{celkový})} \quad (14.6)$$

Objemový průtok pomocí vztahu:

$$V' = \frac{m'}{\rho} \quad (14.7)$$

Ze zjištění objemového průtoku určíme rychlost proudění daného média:

$$V' = w \times S \rightarrow w = \frac{V'}{S} = \frac{V'}{\frac{\pi \times Di^2}{4}} \quad (14.8)$$

Určení Reynoldsova čísla a stanovení typu proudění.

$$Re = \frac{w \times Di}{\eta} \quad (14.9)$$

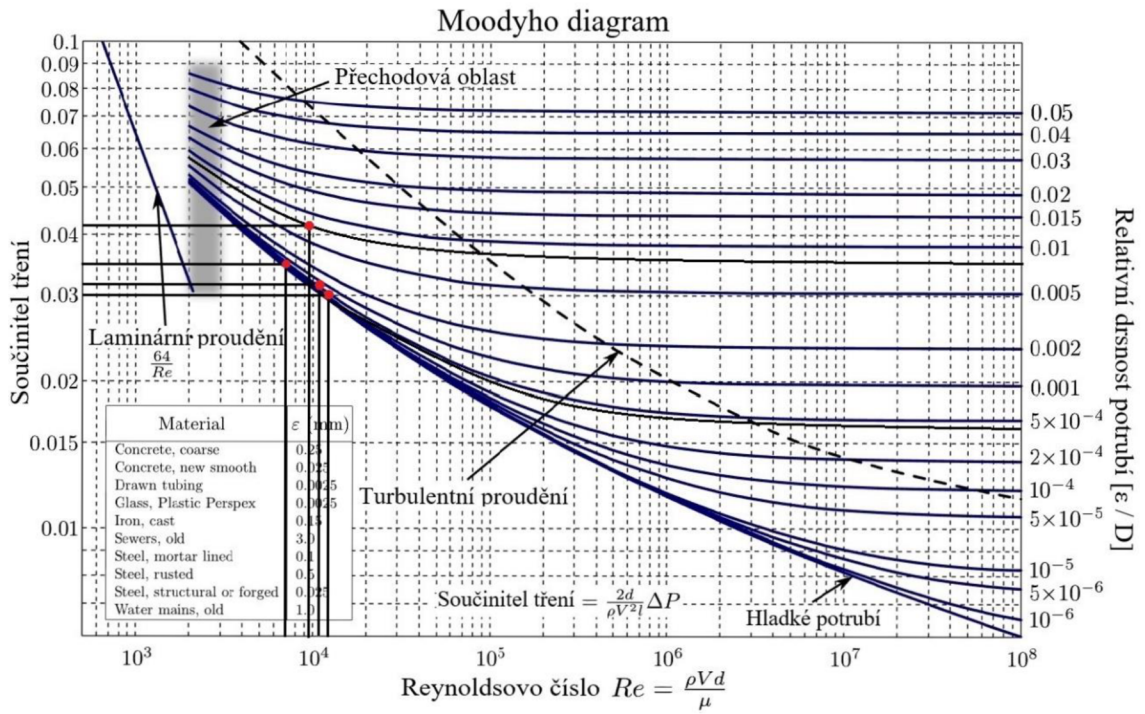
Součinitele tření byl zjištěn pomocí Blasiova vztahu pro turbulentní proudění a hydraulicky hladké potrubí.

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (14.10)$$

Pro kontrolu v diagramu bylo třeba vypočítat relativní drsnost potrubí dle:

$$k = \frac{\varepsilon}{Di} \quad (14.11)$$

Kontrola hodnot výše, byla provedena dle Moodyho diagramu viz **obr. 14-3**.



obr. 14-3– Graf Moodyho diagramu s vyznačenými hodnotami ke kontrole [35]

Tlaková ztráta se vypočte dle:

$$\Delta p = \lambda \times \frac{l}{Di} \times \frac{\rho \times u^2}{2} . \tag{14.12}$$

**Tab. 6 – Výpočet sdílení tepla zářením**

První stěna 1	Médium	LHe		
Teplota 1	$T_1$	4,5	K	
Průměr 1	$d_1$	0,006	m	
Zářivý tok Q mezi 1-2	$Q_{12}$	-8,61E-10	W	
Zářivý tok Q mezi 1-3	$Q_{13}$	-0,000494	W	
Zářivý tok Q mezi 1-4	$Q_{14}$	-0,353348	W	
Výsledný tepelný tok		-0,353842	W	
Druhá stěna 2	Médium	GHe		
Teplota 2	$T_2$	4,7	K	
Průměr 2	$d_2$	0,01	m	
Zářivý tok Q mezi 2-1	$Q_{21}$	1,43E-09	W	
Zářivý tok Q mezi 2-3	$Q_{23}$	-0,000649	W	
Zářivý tok Q mezi 2-4	$Q_{24}$	-0,524669	W	
Výsledný tepelný tok		-0,525317	W	
Třetí stěna 3	Médium	LN <sub>2</sub>		
Teplota 3	$T_3$	83,5	K	
Průměr 3	$d_3$	0,008	m	
Zářivý tok Q mezi 3-1	$Q_{31}$	0,000658	W	
Zářivý tok Q mezi 3-2	$Q_{32}$	0,000519	W	
Zářivý tok Q mezi 3-4	$Q_{34}$	-0,441286	W	
Výsledný tepelný tok		-0,440109	W	
Čtvrtá stěna 4	Médium	Vakuum		
Teplota 4	$T_4$	300	K	
Průměr 4	$d_4$	0,024	m	
Zářivý tok Q mezi 4-1	$Q_{41}$	1,413393	W	
Zářivý tok Q mezi 4-2	$Q_{42}$	1,259205	W	
Zářivý tok Q mezi 4-3	$Q_{43}$	1,323858	W	
Výsledný tepelný tok		3,996457	W	
Délka trubky	$l$	0,5	m	
Podélný průřez trubky	$A_1$	0,003	m <sup>2</sup>	
Podélný průřez trubky	$A_2$	0,005	m <sup>2</sup>	
Podélný průřez trubky	$A_3$	0,004	m <sup>2</sup>	
Povrch první stěny trubky	$S_1$	0,0094	m <sup>2</sup>	
Povrch druhé stěny trubky	$S_2$	0,0157	m <sup>2</sup>	
Povrch třetí stěny trubky	$S_3$	0,012566	m <sup>2</sup>	
Povrch čtvrté stěny trubky	$S_4$	0,037699	m <sup>2</sup>	
Emisivita materiálu potrubí 1,2,3,4	$\epsilon_m$	0,1	[-]	
Součinitel vzájemného ozařování (emisivity) 12 <sub>A</sub>		0,06494	[-]	
Součinitel vzájemného ozařování (emisivity) 13 <sub>A</sub>		0,05970	[-]	
Součinitel vzájemného ozařování (emisivity) 23 <sub>A</sub>		0,04706	[-]	
Součinitel vzájemného ozařování (emisivity) 14 <sub>S</sub>		0,08163	[-]	
Součinitel vzájemného ozařování (emisivity) 24 <sub>S</sub>		0,07273	[-]	
Součinitel vzájemného ozařování (emisivity) 34 <sub>S</sub>		0,07692	[-]	
Boltzmannova konstanta	$\sigma$	5,67E-08	W/m <sup>2</sup> ×K <sup>4</sup>	

**Tab. 7 – Vstupní parametry pro výpočet tlakových ztrát potrubí s LHe**

Termofyzikální vlastnosti		Medium	LHe		
Kritický tlak	$p_{krit}$	2,27	bar		
Kritická teplota	$T_{krit}$	5,19	K		
Tlak	$p$	1,4	bar	140 000	Pa
Teplota	$t$	-268,7	°C	4,5	K
Měrná plynová konstanta	$r$	3 979,00	J/(kg×K)		
Hustota	$\rho$	119,470	kg/m <sup>3</sup>		
Dynamická viskozita	$\eta$	3,03E-06	Pa×s	Dané hodnoty	
Kinematická viskozita	$\nu$	2,54E-08	m <sup>2</sup> /s		
Zadané hodnoty					
Požadovaný chladicí výkon	P vývěvy	2	W		
	P1/4celku	0,5	W		
Zářivý tok Q mezi 1-2	$Q_{12}$	8,6E-10	W		
Zářivý tok Q mezi 1-3	$Q_{13}$	4,94E-04	W		
Zářivý tok Q mezi 1-4	$Q_{14}$	0,35384	W		
Výsledná tepelný tok	$Q_1$	0,354334	W		
Tepelný tok připoj. části	P (části)	0,75	W		
Celkový požadovaný výkon	P (celkový)	1,604334	W	dle schématu okruhu He	
Průměr potrubí	$D_o$	6	mm		
Tloušťka stěny potrubí	$t$	1	mm		
Počet trubek	$n$	1	ks		
Výparné teplo	$l_v$	17804,3	J/kg		
Hmotnostní Průtok	$m'$	9,01E-05	kg/s	0,32	kg/h
Světlost potrubí	DN	4	mm	0,004	m
Průřez potrubí	S	12,56	mm <sup>2</sup>	0,00001256	m <sup>2</sup>
Hmotností průtok (1Tr)	$m'$	0,0901	g/s	9,01E-05	kg/s
Objemový průtok (1Tr)	$V'$	7,54E-04	dm <sup>3</sup> /s	7,54E-07	m <sup>3</sup> /s
Průměrná rychlost proudění	$v_p$	0,06005114	m/s		
Rovný úsek potrubí					
Vnitřní průměr/Světlost potrubí	$D_i$	4	mm	0,0040	m
Délka úseku	$l$	500	mm	0,5	m
Drsnost potrubí	$\epsilon$	0,0032	mm	3,20E-06	m
Relativní drsnost potrubí	$k$	0,0008	mm		
Rychlost proudění	$w$	0,0600207	m/s		
Reynoldsovo číslo	Re	9453	[-]		
Typ proudění	9453	>	4000	=> TURBULENTNÍ	
Součinitel tření	$\lambda$	dle diagramu		0,042	[-]
Tlaková ztráta úseku				<b>1,1298</b>	Pa

**Tab. 8** – Vstupní parametry pro výpočet tlakových ztrát potrubí s GHe

Výpočet tlakové ztráty					
Vstupní parametry pro výpočet					
Termofyzikální vlastnosti					
Medium		GHe		Pokles tlaku	
Tlak	p	1,2	bar	120 000	Pa
Teplota	t	-268,5	°C	4,7	K
Měrná plynová konstanta	r	5 215,30	J/(kg×K)	Ohřátí média	
Hustota	ρ	17,019	kg/m <sup>3</sup>		
Dynamická viskozita	η	1,374E-06	Pa×s	Dané hodnoty	
Kinematická viskozita	ν	8,072E-08	m <sup>2</sup> /s		
Zadané hodnoty					
Průměr potrubí	D <sub>o</sub>	10	mm		
Tloušťka stěny potrubí	t	1,5	mm		
Počet trubek	n	1	ks		
Hmotnostní Průtok	m'	9,01E-05	kg/s	0,32	kg/h
Světlost potrubí	DN	7,00	mm	0,007	m
Průřez potrubí	S	38,465	mm <sup>2</sup>	3,85E-05	m <sup>2</sup>
Hmotností průtok (1 TRUB-KOU)	m'	0,090	g/s	9,01E-05	kg/s
Objemový průtok (1 TRUB-KOU)	V'	0,0052946 3	dm <sup>3</sup> /s	5,29463E-06	m <sup>3</sup> /s
Průměrná rychlost proudění	v <sub>p</sub>	0,1376	m/s		
Rovný úsek potrubí					
Vnitřní průměr/Světlost potrubí	D <sub>i</sub>	7	mm	0,0070	m
Délka úseku	l	500	mm	0,5	m
Drsnost potrubí	ε	0,0032	mm	3,20E-06	m
Relativní drsnost potrubí	k	0,00046	mm		
Rychlost proudění	w	0,1376	m/s		
Reynoldsovo číslo	Re	11 931	[-]		
Typ proudění	11 931	>	4000	=> TURBULENTNÍ	
Součinitel tření	λ	dle diagramu		0,032	[-]
Tlaková ztráta úseku potrubí				<b>0,368</b>	Pa

**Tab. 9** – Vstupní parametry pro výpočet tlakových ztrát potrubí s LN<sub>2</sub>

Termofyzikální vlastnosti		Medium	LN <sub>2</sub>		
Tlak	p	2,00	bar	200 000	Pa
Teplota	t	-189,6	°C	83,6	K
Měrná plynová konst.	r	1 029,60	J/(kg×K)		
Hustota	ρ	776,920	kg/m <sup>3</sup>		
Dynamická viskozita	η	1,274E-04	Pa×s	Dané hodnoty	
Kinematická viskozita	ν	1,639E-07	m <sup>2</sup> /s		
Zadané hodnoty					
Požadovaný chladicí výkon	P vývěvy	4000	W		
	P1/4celku	1000	W		
Zářivý tok Q mezi 3-1	Q <sub>31</sub>	6,5822E-04	W		
Zářivý tok Q mezi 3-2	Q <sub>32</sub>	5,1883E-04	W		
Zářivý tok Q mezi 3-4	Q <sub>34</sub>	0,441286	W		
Výsledná tepelný tok	Q <sub>3</sub>	0,440109	W		
Požadovaný tlak připojovací části	P	1	W		
Celkový požad. výkon	P <sub>celkový</sub>	1001,440109	W	Dle schéma okruhu N <sub>2</sub>	
Var LN2		429,80	W		
Ohřev GN2		571,64	W		
Průměr potrubí	D <sub>o</sub>	8	mm		
Tloušťka stěny potrubí	t	1	mm		
Výparné teplo	l <sub>v</sub>	190 557	J/kg		
Teplo na ohřev plynu z teploty varu na 293 K		253 440	J/kg		
Hmotnostní průtok	m'	0,005255	kg/s	18,92	kg/h
Světlost potrubí	DN	6,00	mm	0,006	m
Průřez potrubí	S	28,26	mm <sup>2</sup>	2,83E-05	m <sup>2</sup>
Hmotností průtok 1(Tr)	m'	5,255	g/s	0,005255	kg/s
Objemový průtok 1(Tr)	V'	0,006764314	dm <sup>3</sup> /s	6,76E-06	m <sup>3</sup> /s
Průměrná rychlost proudění	v <sub>p</sub>	0,239360022	m/s		
Rovný úsek potrubí					
Vnitřní průměr/Světlost potrubí	D <sub>i</sub>	6	mm	0,0060	m
Délka úseku	l	500	mm	0,5	m
Drsnost potrubí	ε	0,0032	mm	3,20E-06	m
Relativní drsnost potrubí	k	0,00053	mm		
Rychlost proudění	w	0,2392387	m/s		
Reynoldsovo číslo	Re	8 757	[-]		
Typ proudění	8 757	>	4000	=> TURBULENTNÍ	
Součinitel tření (dle typu proudění)	λ	dle diagramu			0,036
Tlaková ztráta úseku potrubí				<b>66,701</b>	Pa

**Tab. 10** – Vstupní parametry pro výpočet tlakových ztrát potrubí s GN<sub>2</sub>

Výpočet tlakové ztráty					
Vstupní parametry pro výpočet					
Termofyzikální vlastnosti					
Medium		GN2		Pokles tlaku	
Tlak	p	1,5	bar	150 000	Pa
Teplota	t	26,9	°C	300,0	K
Měrná plynová konstanta	r	298,81	J/(kg×K)	Ohřátí média	
Hustota	ρ	1,685	kg/m <sup>3</sup>		
Dynamická viskozita	η	1,790E-05	Pa×s	Dané hodnoty	
Kinematická viskozita	ν	1,062E-05	m <sup>2</sup> /s		
Zadané hodnoty					
Průměr potrubí	D <sub>o</sub>	28	mm		
Tloušťka stěny potrubí	t	2	mm		
Počet trubek	n	1	ks		
Hmotnostní Průtok	m'	0,005255	kg/s	18,92	kg/h
Světlost potrubí	DN	24,00	mm	0,024	m
Průřez potrubí	S	452,16	mm <sup>2</sup>	4,52E-04	m <sup>2</sup>
Hmotností průtok (1 TRUB-KOU)	m'	5,255	g/s	0,005255	kg/s
Objemový průtok (1 TRUB-KOU)	V'	3,119	dm <sup>3</sup> /s	0,003118706	m <sup>3</sup> /s
Průměrná rychlost proudění	v <sub>p</sub>	6,89734986 2	m/s		
Rovný úsek potrubí					
Vnitřní průměr/Světlost potrubí	D <sub>i</sub>	24	mm	0,0240	m
Délka úseku	l	500	mm	0,5	m
Drsnost potrubí	ε	0,0032	mm	3,20E-06	m
Relativní drsnost potrubí	k	0,00046	mm		
Rychlost proudění	w	6,8938532	m/s		
Reynoldsovo číslo	Re	15 579	[-]		
Typ proudění	15 579	>	4000	=> TURBULENTNÍ	
Součinitel tření	λ	dle diagramu		0,032	[-]
Tlaková ztráta úseku potrubí				<b>25,026</b>	Pa



## 15 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout koncept kryovývěvy a její potrubní spojovací části dle daných velmi charakteristických okrajových podmínek.

V první části práce byla stručně popsána historie, vývoj a konstrukce zařízení tokamak a jeho hlavní chladicí komponenty kryovývěvy.

Druhá část se zabývá návrhem samotné kryovývěvy a přípojného potrubí, ze znalostí vyplývajících z hlavních celosvětových projektů jako je ITER a EU DEMO a z již fungujících kryovývěv v tokamacích HL2M a DIII-D. Byly vytvořeny dvě koncepce vyvíjené kryovývěvy. První byla zaměřena hlavně pro matematické a numerické výpočty v programu Molflow, které slouží k určení teplotních úrovní. Druhá koncepce byla směřovaná pro modifikace vnitřní stavby, rozměrů komponent, či správnou funkci jevů kryokondenzace a kryosorpce. Je důležité zdůraznit, že při vytváření návrhu kryovývěvy bylo bráno v úvahu dosažení co nejmenšího možného modelu. Bylo také dodrženo omezení rozměrových parametrů pro potrubní část.

Byly určeny nejprůvlektivější zdroje chladu, tedy kapalné helium a kapalný dusík a stanoveny podmínky, aby daná média vyhovovala systému bez následných havárií vyvolaných například prudkým varem celého objemu kapalného helia, či dusíku.

Pečlivě byl analyzován a zvolen materiál, jak pro hlavní vyvíjenou kryovývěvu, tak pro přípojovací části a samotné potrubí. Výběr uskutečněn dle ověřených kvalitních dodavatelů z oblasti kryogeniky s radou odborníků v daném odvětví. Byly nalezeny komerčně dostupné komponenty, které by mohli být se speciálními úpravami použity v sestavě celku kryovývěvy.

Modifikované návrhy vznikly podle určených okrajových podmínek a výsledky výpočtů jsou dále interpretovány v **Tab. 7**, **Tab. 8**, **Tab. 9** a **Tab. 10**. Dle výstupů z tabulek lze konstatovat, že tlakové ztráty jsou zanedbatelné. Tím jsou navržené rozměrové a tlakové charakteristiky pro každé jedno potrubí přijatelné a za daných podmínek by měly bez problému zvládat vlivy extrémního intervalu teplot. V případě potřeby dalšího redukování tlakových ztrát lze přistoupit ke zvětšení průměrů použitých potrubních částí, či snížení vybraného tlaku z NIST.

V rámci práce byl navržen celý okruh vedení pro kapalné helium a dusík společně se získáváním těchto finančně nepřívlektivých médií zpět, přes zkapalňovací zařízení. Práce je zakončena návrhy budoucího rozšíření a zlepšení spojené s vyvinutou kryosorpční vývěvou.

## 15.1 Návrhy pro další zkoumání

I přesto, že se dosáhlo významných výsledků a zjištění v rámci této práce, stále existují nezodpovězené otázky a prostor pro další rozvoj. To zahrnuje parametrizaci 3D modelů navrhovaných konceptů v CAD a import do MKP softwaru. Výpočty by umožnily shromáždit informace užitečné pro úpravu návrhu vývěvy v případě změny okrajových podmínek (větší cílové zařízení, chladnější prostředí, vyšší pracovní tlak atd.), či do celé problematiky započítat vlivy elektromagnetického pole, které výpočty a samotné řešení posune na vyšší úroveň. Dále by se dalo přistoupit ke konstrukčním pracím na tělese vývěvy a dále rozvíjet koncepty pomocí konstrukčních detailů vývěvy (vstupní clona, uchycení vývěvy ke komoře, podpěry jednotlivých tep. štítů atd.), který by byly podpořeny MKP výpočty. Cílem následující práce by také mohlo být zahájení návrhu řízení kryovývěvy.

## Seznam použité literatury

- [1] ŘÍPA, Milan. Řízená termojaderná fúze pro každého. 1. vyd. Praha: Academia, 2010. 179 s. ISBN 978-80-200-1845-5.
- [2] ŘÍPA, Milan. Řízená termojaderná fúze – minulost, současnost a budoucnost. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2019. 157 stran. ISBN 978-80-01-06685-9.
- [3] Turbosquid. Tokamak Fusion Reactor [online]. 2015 [citováno 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.turbosquid.com/3d-models/tokamak-fusion-reactor-3d-model/885530>
- [4] NOVOTNÝ, Tomáš. Fúzní reaktory. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02787-3.
- [5] Radiation hardness in ITER Diagnostics. SlideServe [online]. 2014 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/cybele/radiation-hardness-in-iter-diagnostics>
- [6] Chen, F. F. (1984). Introduction to plasma physics and controlled fusion (2nd ed.). Springer. Dostupné z <http://www.nucleares.unam.mx/~martinel/plasma19/Chen-Plasmas-1984-2ed.pdf>
- [7] FIALOVÁ, Monika. Vakuová fyzika II - získávání nízkých tlaků [online]. 2012 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6265985-Monika-fialova-vakuova-fyzika-ii-ziskavani-nizkych-tlaku.html>
- [8] C. Day. Basics and Applications of Cryopumps. Springer Science & Business Media, 1999. ISBN 978-0-7503-0633-7
- [9] Ross, R. G. (2016). Refrigeration Systems for Achieving Cryogenic Temperatures. California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory. Dostupné z: [https://www2.jpl.nasa.gov/adv\\_tech/coolers/Cool\\_ppr/Chap%206-Refrig%20Sys%20for%20Achiev%20Cryo%20Temps\\_2016.pdf](https://www2.jpl.nasa.gov/adv_tech/coolers/Cool_ppr/Chap%206-Refrig%20Sys%20for%20Achiev%20Cryo%20Temps_2016.pdf)
- [10] J. Payet, P. Vande Vyvre a B. Vandorpe, " Experience with a 1500 m3 warm-water tank for the cooling of the SPS experimental area," in Proceedings of the 8th International Conference on High-Energy Accelerators, Serpukhov, Rusko, 1979, s. 241-244. [Online]. Dostupné z: <https://cds.cern.ch/record/1047069/files/p241.pdf>
- [11] SynSysCo. Basics of Cryopumping [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://synsysco.com/pdf/Basics-of-Cryopumping-Booklet.pdf>
- [12] Cryo-Torr® High-Vacuum Pump Installation, Operation and Maintenance Instructions [online]. 2001, 45 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <http://uhv.cheme.cmu.edu/manuals/cryopump.pdf>
- [13] Sedgley, D.W., Tobin, A.G., Batzer, T.H., a Call, W.R. Cryopumping for fusion reactors. Nuclear Engineering and Design. Fusion, 4(2), 149-163 (1987). ISSN 0167-899X. doi: 10.1016/0167-899X(87)90002-4.

- [14] Bertolini, L. (2002). Cryosorption Pumps. In The US Particle Accelerator School (pp. 1-15). Lawrence Livermore National Laboratory. June 10-14, 2002. Dostupné z [https://uspas.fnal.gov/materials/02Yale/08\\_CryoPumpsCompr.pdf](https://uspas.fnal.gov/materials/02Yale/08_CryoPumpsCompr.pdf)
- [15] R. Gangradey, S.S. Mukherjee, V. Gupta, P. Panchal, P. Nayak, J.S. Mishra, A. Dewasi, and S.K. Verma, "Design and development of a liquid nitrogen cooled test cryopump for application in Steady-state Superconducting Tokamak-1," *Vacuum*, vol. 200, 2022, article no. 110986, ISSN 0042-207X. Available: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.110986>
- [16] ULVAC CRYOGENICS. CRYO-U8H [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://showcase.ulvac.co.jp/cn/products/high-vacuum-pump/cryo-pump/cryo-u-series/cryo-u8h.html>
- [17] [howto\\_cryo3.png](https://showcase.ulvac.co.jp/en/how-to/images/howto_cryo3.png). [online] ULVAC CRYOGENICS. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: [https://showcase.ulvac.co.jp/en/how-to/images/howto\\_cryo3.png](https://showcase.ulvac.co.jp/en/how-to/images/howto_cryo3.png)
- [18] ULVAC CRYOGENICS. Pumping Speed for Hydrogen, Helium, and Neon (Non-condensable Gas). [online] [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://showcase.ulvac.co.jp/en/how-to/product-knowledge02/cryo-pump.html>
- [19] Leybold. Kryogenní ultravysoká vakuová pumpa COOLVAC 1500 iCL [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://vacma.ru/catalog/vakuumnye-nasosy/sverkhvysokovakuumnye-nasosy/coolvac/coolvac-1500-cl/>
- [20] Leybold. Kryogenní vakuová pumpa COOLVAC [online]. Dostupné z: <http://www.anboyuan.com/leybold/coolvacpumps356.html>
- [21] ENTLER, Slavomír, FICKER, Ondřej, HAVLÍČEK, Josef, HORÁČEK, Jan, HRON, Martin, MLYNÁŘ, Jan, PÁNEK, Radomír, ŘÍPA, Milan, STÖCKEL, Jan, VARJU, Jozef a WEINZETTL, Vladimír. *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*. Praha: Alfa nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-87197-62-7
- [22] Pearce, R. J., Antipenkov, A., Boussier, B., Bryan, S., Dremel, M., Levesy, B., Mayaux, C., & Wykes, M. (2013). The ITER divertor pumping system, design evolution, simplification and performance. *Fusion Engineering and Design*, 88(6–8), 809–813. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.01.050>
- [23] Lu, Y., Li, Y., Zha, F., Tan, S., Qiu, Y., Zhai, J., Yuan, Y., Cai, L., & Li, Q. (2019). Structural assessment of HL-2M in-vessel cryopump under EM loads. *Fusion Engineering and Design*, 143, 121-129. ISSN 0920-3796. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.134>
- [24] BAXI, C. B. Supercritical helium as a coolant for DIII–D cryopumps. *Fusion Engineering and Design*, [online]. 2005, vol. 75-79, no. 3, pp. 633-636 [cit. 2023-03-07]. ISSN 0920-3796. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.062>
- [25] Bozek, A. S., Baxi, C. B., Callis, R. W., Mahdavi, M. A., O'Neill, R. C. a Reis, E. E. (1999). Charakteristiky odčerpávání kryopumpy zařízení DIII-D [Konferenční příspěvek]. In 18. symposium o fúzní inženýrství IEEE/NPSS, 25.-29. října 1999,

Albuquerque, Nové Mexiko, USA. General Atomics, San Diego, Kalifornie, USA.  
Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/766802>

[26] Schall, G., Berger, N., Bösser, D., Herrmann, A., Rohde, V., Sochor, M., & Weißgerber, M. (2021). Design and operation of the in-vessel cryopump for the new upper divertor in ASDEX Upgrade. *Fusion Engineering and Design*, 166, 112316. ISSN 0920-3796. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112316>

[27] VONDRÁČEK, P., PÁNEK, R., HRON, M., HAVLÍČEK, J., WEINZETTL, V., TODD, T. a kol. Preliminary design of the COMPASS upgrade tokamak. *Fusion Engineering and Design*, 2021, roč. 169, č. 112490. ISSN 0920-3796. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112490>

[28] OTA, Josef. Kryogenní technika a její aplikace: učební text pro posluchače strojní fakulty studující obor energetických strojů a zařízení. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 184 s., 2 diagramy. ISBN 80-01-02904-2

[29] BARRON, R. F. a G. F. NELLIS. *Cryogenic Heat Transfer*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4822-3174-4. doi: 10.1201/b20225

[30] Ventura, Guglielmo a Lara Risegari. *The Art of Cryogenics: Low-Temperature Experimental Techniques*. 1. vydání. Elsevier Science, 2007. ISBN 9780080554365 (eBook), ISBN 9780080444796 (Hardcover)

[31] Thermal Insulation Products. [online]. 2014 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://manualzz.com/doc/39598973/thermal-insulation-products>

[32] NIST. [online]. NIST Chemistry WebBook: Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

[33] MACHÁČKOVÁ, Adéla. *Sdílení tepla a proudění: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2576-2.

[34] Slovenský hydrometeorologický ústav. [online]. *Tabuľky emisivity vybraných materiálov*. Dostupné z: [https://www.sos.sk/pdf/emissivity\\_tables\\_sk\\_2148.pdf](https://www.sos.sk/pdf/emissivity_tables_sk_2148.pdf)

[35] Wikimedia Commons. File:Moody EN.svg. [online]. 2020. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Moody\\_EN.svg&oldid=507990503](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Moody_EN.svg&oldid=507990503)