

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2022**

**ALEŠ  
PROCHÁZKA**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Procházka** Jméno: **Aleš** Osobní číslo: **492437**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Technologie tekutých kovů pro fúzní reaktory**

Název bakalářské práce anglicky:

**Liquid metal technology for fusion reactors**

Pokyny pro vypracování:

Jaderná fúze je perspektivním energetickým zdrojem, který pro integraci do energetiky vyžaduje rozsáhlý technologický výzkum. Jedním z charakteristických rysů fúzních reaktorů jsou vysoké tepelné toky zatěžující konstrukci reaktoru. Nejzatíženějšími komponentami reaktoru jsou divertorové terče, kde může hustota tepelného toku dosáhnout desítek až stovek MW/m<sup>2</sup>. Jedním z možných konstrukčních řešení těchto terčů je aplikace tekutých kovů. Vlastnosti a technologie tekutých kovů lze zkoumat na netoxických a bezpečných tekutých kovech, jakým je například eutektická slitina Galinstan. Předmětem práce je proto konstrukční návrh malé testovací smyčky s touto slitinou. Testovací smyčka bude určena pro výzkum magnetohydrodynamického čerpání slitiny a magnetohydrodynamického generování elektrického proudu za atmosférického tlaku a pokojové teploty.

Obsah práce:

Teoretická část

- 1) Rešerše současného stavu výzkumu jaderné fúze.
- 2) Rešerše aplikací tekutých kovů pro divertorové terče.

Praktická část

- 1) Popis vlastností slitiny Galinstan.
- 2) Konstrukční návrh testovací smyčky se slitinou Galinstan pro výzkum magnetohydrodynamických jevů.

Seznam doporučené literatury:

S. Entler a kol., Budoucnost energetiky: jaderná fúze, Středisko společných činností AV ČR/ Academia, Strategie AV21, 2019.  
J. Horacek et al., Plans for Liquid Metal Divertor in Tokamak Compass, Plasma Physics Reports 7 (2018), 1–7.  
V. Bednář a kol., Magnetohydrodynamický generátor a jeho účinnost, fyzikální seminář FJFI ČVUT [online]. Praha, 2010 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2009-2010/Leto10/proc/mhd.pdf>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Slavomír Entler, Ph.D. ústav energetiky**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Zácha, Ph.D. ústav energetiky FS**

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Slavomír Entler, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a odborných konzultací.

V Praze dne.....

.....

Aleš Procházka

# Anotační list

Jméno autora:	Aleš Procházka
Název práce:	Technologie tekutých kovů pro fúzní reaktory
Anglický název:	Liquid metal technology for fusion reactors
Akademický rok:	2021/2022
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/Jaderná energetická zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Slavomír Entler, Ph.D., Ing. Pavel Zácha, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 47 Počet obrázků: 15 Počet tabulek: 7 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Jaderná fúze, tekutý kov, Galinstan, MHD, smyčka
Keywords:	Nuclear fusion, liquid metal, Galinstan, MHD, loop
Anotace:	Tato práce přibližuje základní principy jaderné fúze a její technická řešení. Materiály fúzních reaktorů jsou vystavovány energetickým tokům o velikosti až stovek MW/m <sup>2</sup> . Jednou z možných alternativ k pevným materiálům jsou tekuté kovy. Jejich vlastnosti a chování lze zkoumat na slitině Galinstan, která je netoxická a tekutá za pokojových teplot. Předmětem práce je návrh malé smyčky pracující s Galinstanem. Bude určena k výzkumu magnetohydrodynamických jevů, čerpání a generace elektrické energie.
Abstract:	This work introduces the basic principles of nuclear fusion and its technical solutions. Fusion reactor materials are exposed to energy flows of up to hundreds of MW / m <sup>2</sup> . One possible alternative to solid materials is liquid metals. Their properties and behavior can be investigated on Galinstan alloy, which is non-toxic and liquid at room temperature. The subject of the work is the design of a small loop working with Galinstan. It will be designed for research of magnetohydrodynamic phenomena, pumping and generation of electricity.

# **Poděkování**

Děkuji mým vedoucím Ing. Slavomíru Entlerovi, Ph.D. a Ing. Pavlovi Záchovi, Ph.D. za odborné a ochotné vedení, rady a instrukce.

# OBSAH

Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	8
Seznam symbolů a zkratek.....	9
Úvod .....	11
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	12
1.1 Fúze ve vesmíru.....	12
1.2 Fúze na zemi .....	14
1.3 Vhodné reakce .....	16
1.4 Podmínky termojaderné fúze .....	18
1.5 Způsoby udržení .....	19
1.5.1 Inerciální udržení.....	19
1.5.2 Magnetické udržení.....	20
1.6 Výhody jaderné fúze .....	22
1.7 Tokamak.....	23
1.7.1 Magnetické pole.....	25
1.7.2 Pulzní režim .....	26
1.7.3 Ohřev plazmatu.....	26
1.8 Jaderné komponenty .....	28
1.8.1 První stěna a blanket.....	28
1.8.2 Divertor.....	29
1.9 Použití tekutých kovů .....	31
2 PRAKTICKÁ ČÁST .....	33
2.1 Galinstan.....	33
2.2 Testovací smyčka.....	34
2.2.1 Parametry smyčky.....	37
2.2.2 Komerčně dostupné komponenty .....	39
Závěr.....	44
Seznam literatury.....	45

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1	Fúzní reakce na Slunci.....	13
Obrázek 1.2	Izotopy prvků figurujících ve fúzních reakcích.....	14
Obrázek 1.3	Graf vazebné energie na 1 nukleon s vyznačenou energií uvolněnou při fúzi a při štěpení atomových jader.....	15
Obrázek 1.4	Magnetické udržení plazmatu v zařízeních tokamak a stellarátor...	21
Obrázek 1.5	Lawsonova kritéria pro DT reakci při magnetickém udržení.....	22
Obrázek 1.6	Základní schéma reaktoru typu tokamak.....	24
Obrázek 1.7	Geometrické charakteristiky toroidálního reaktoru.....	24
Obrázek 1.8	Tři metody vnějšího ohřevu plazmatu v tokamaku: základní ohmický a dodatečný s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem, respektive se vstříkem svazku vysokoenergetických neutrálních atomů.....	27
Obrázek 1.9	Jaderné komponenty v tokamaku ITER.....	29
Obrázek 1.10	Divertor směřuje povrchovou vrstvu plazmatu na své terče, kde je ochlazována a odčerpávána ven z reaktoru.....	30
Obrázek 1.11	LMD modul z tokamaku COMPASS.....	32
Obrázek 2.1	Základní schéma experimentální smyčky s kovem Galinstan.....	35
Obrázek 2.2	MHD generátor, VUT v Brně.....	37
Obrázek 2.3	Hlavní rozměry potrubí.....	38
Obrázek 2.4	Rozměry tvarovky T a nátrubku pro zásobník.....	40

## Seznam tabulek

Tabulka 1	Srovnání některých fyzikálních vlastností rtuti a několika eutektických slitin GaInSn.....	33
Tabulka 2	Parametry smyčky.....	39
Tabulka 3	Rozměry tvarovky T a nátrubku pro zásobník.....	40
Tabulka 4	Porovnání vhodných oběhových čerpadel.....	41
Tabulka 5	Některé parametry MHD čerpadel od SAAS GmbH.....	42
Tabulka 6	Parametry snímače teploty THST.....	43
Tabulka 7	Srovnání parametrů tří různých průtokoměrů.....	43



## Seznam symbolů a zkratek

$E$	[J]	Energie
$m$	[kg]	Hmotnost
$c$	[m/s]	Rychlost světla
$n$	[m <sup>-3</sup> ]	Hustota slučovaných jader
$\tau_E$	[s]	Doba udržení energie
$T$	[°C, K]	Teplota
$W_P$	[J]	Tepelná energie plazmatu
$P_L$	[W]	Výkon energetických ztrát
$Q$	[–]	Faktor zesílení
$P_F$	[W]	Fúzní výkon
$P_H$	[W]	Výkon ohřevu
$\vec{F}$	[N]	Lorentzova síla
$q$	[C]	Elektrický náboj
$\vec{E}$	[V/m]	Intenzita elektrického pole
$\vec{v}$	[m/s]	Rychlost
$\vec{B}$	[T]	Magnetická indukce
$r_L$	[m]	Larmorův poloměr
$v_{\perp}$	[m/s]	Rychlost v kolmém směru
$Q_{voda}$	[m <sup>3</sup> /s]	Objemový průtok vody
$\rho_{voda}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota vody
$\dot{m}_{voda}$	[kg/s]	Hmotnostní průtok vody
$\rho_{GalInSn}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota Galinstanu
$Q_{GalInSn}$	[m <sup>3</sup> /s]	Objemový průtok Galinstanu
$r$	[m]	Poloměr

$v_{GalSn}$	[m/s]	Rychlost proudění Galinstanu
OZE		Obnovitelné zdroje energie
ITER		International Thermonuclear Experimental Reactor
DEMO		DEMONstration power plant
MHD		Magnetohydrodynamika, magnetohydrodynamické
D		Deuterium
T		Tritium
JET		Joint European Torus
TFTR		Tokamak Fusion Test Reactor
ASDEX		Axially Symmetric Divertor Experiment
PFC		Plasma-Facing Components
SOL		Scrape-Off Layer
CPS		Capillary Porous Structure/System
LMD		Liquid Metal Divertor
NBR		Butadien-akrylonitrilový kaučuk
VUT		Vysoké učení technické
FJFI		Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
PPR		Polypropylen
AC		Střídavý proud

# Úvod

Od fosilních zdrojů se čím dál rychleji a radikálněji ustupuje a nastupuje doba těch obnovitelných. Jenže závislí pouze na OZE, tak jak je chápeme v dnešním smyslu, být pravděpodobně nemůžeme. Je nutné podporovat všechny směry vývoje v energetice a hledat nová řešení, včetně těch nejnáročnějších. Tím je dlouhodobě zdánlivě neovládnutelná, „věčně třicet let vzdálená“ jaderná fúze. Právě ta by se mohla stát energetickým zdrojem budoucnosti.

V první části práce je přiblížen princip jaderné fúze, její význam jako zdroj energie ve vesmíru a dosavadní nejperspektivnější přístupy k její realizaci na Zemi. Nejdůležitějším a nejpokročilejším fúzním zařízením je tzv. tokamak. Na základě této konfigurace pracuje většina fúzních reaktorů na světě a také v současnosti dokončovaný projekt ITER bude tokamak. *International Thermonuclear Experimental Reactor* – Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor, zároveň také *iter* znamená latinsky cesta, bude právě cestou k budoucímu komerčnímu využití fúze. Třicet pět států si předsevzalo za cíl tohoto projektu, největšího fúzního zařízení doposud, přinést důkaz o tom, že je lidstvo schopno fúzi doopravdy využít pro výrobu energie. Měl by být prvním systémem, na kterém se povede vyrovnat výkon potřebný na ohřev a výkon vyprodukovaný fúzními reakcemi. Spuštění je plánováno na rok 2025 [1]. Dalším krokem je projekt demonstrační fúzní elektrárny DEMO (*Demonstrational Fusion Power Plant*). To již má být soběstačné zařízení, které bude produkovat využitelnou energii [2]. Materiály současnosti budou ale omezovat budoucí projekty, a proto je nutné hledat nové alternativy. V teoretické části je nastíněn význam tekutých kovů jako materiálů snášejících extrémní podmínky, které panují v tokamacích. Tekuté kovy by mohly nahradit konvenční pevné materiály.

Výstupem praktické části je návrh testovací smyčky, ve které bude proudit kovová slitina Galinstan, která zůstává tekutou i při pokojových teplotách. Tato vlastnost dává Galinstanu významné postavení v rámci výzkumu magnetohydrodynamických jevů. Magnetohydrodynamika se zabývá chováním vodivých tekutin v prostředí magnetického pole. MHD způsobem lze generovat elektrickou energii a tento způsob je zvažován v budoucích fúzních zařízeních.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Fúze ve vesmíru

Jaderná fúze (syntéza, spojování) je zdrojem energie všech hvězd, tedy i našeho Slunce, a tím pádem jsme fúzi vždy k životu potřebovali a potřebovat budeme. Principem je spojení dvou lehčích atomů v jeden atom těžší. Je to přesným opakem jaderného štěpení, kdy se těžší atom rozdělí na vícero lehčích. Zároveň se při obou mechanismech, ať při spojení lehkých jader nebo dělení těžkých, uvolňuje určité množství energie [3].

*„V Slunci probíhá termojaderná syntéza atomových jader vodíku, vzniká helium a uvolňuje se energie. Takto lze vysvětlit stáří Slunce,“* [4] prohlásil v roce 1920 významný britský astrofyzik Arthur Eddington. V této myšlence spojil zásadní objevy Alberta Einsteina a Francise Astona a to tedy:

Albert Einstein  $E = mc^2$

Nepochybně jedna z nejznámějších rovnic fyziky, kterou v roce 1905 Einstein vyjádřil hmotnost pomocí energie v rámci své speciální teorie relativity. Říká nám: *„Pokud těleso odevzdá energii ve formě záření, jeho hmotnost se zmenší o  $E/c^2$ “* [3].

Francis Aston

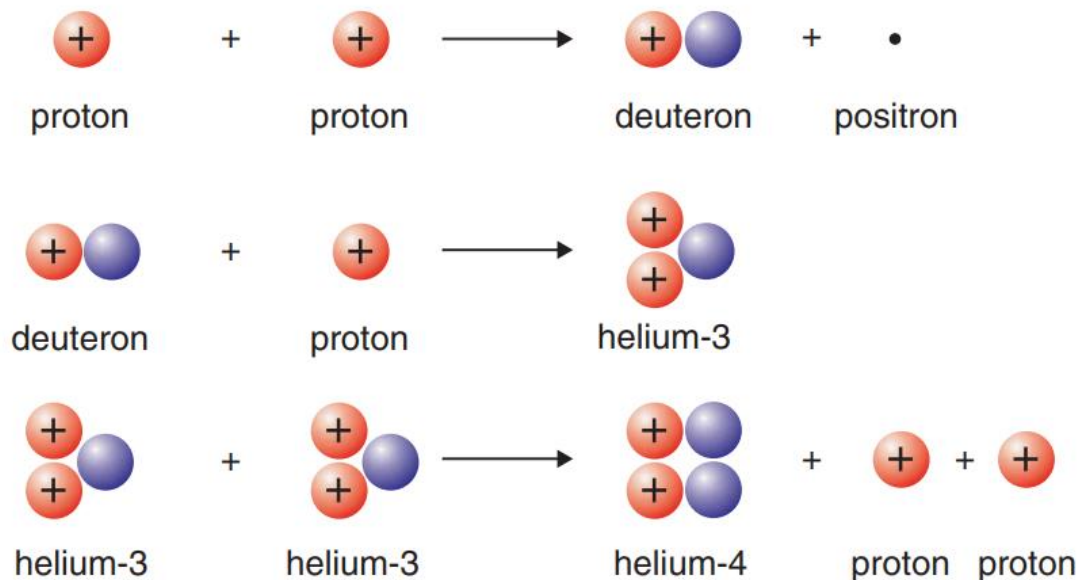
Pomocí svého vynálezu tzv. hmotnostního spektrografu dokázal velmi přesně určovat hmotnosti atomů. Objevil, že atomy stejného prvku mohou mít jinou hmotnost. To bylo později vysvětleno objevením neutronu, tím pádem izotopů prvku. Zároveň došel k překvapivému výsledku, že hmotnost atomu helia je nepatrně nižší než součet hmotností čtyř atomů vodíku helium tvořící. Při slučování tedy dochází k úbytku hmoty [3, 5].

Fúze na Slunci probíhá v následujících fázích (obr. 1.1). Začíná spojením dvou protonů procesem beta rozpadu<sup>1</sup> na jádro izotopu vodíku zvaného deuterium (obr. 1.2) tvořeného protonem a neutronem. To nadále reaguje s dalším protonem a vzniká helium-3. V posledním kroku proběhne syntéza dvou jader helia-3

---

<sup>1</sup> Přeměna beta plus, jeden proton se změní na neutron a zároveň jsou emitovány dvě částice: pozitron a neutrino (elektronové) [6].

a vznikne konečné helium-4 a zároveň dojde k uvolnění dvou protonů. Hmotnost výsledného jádra helia-4 je nižší než součet hmotností čtyř protonů, protože došlo k uvolnění energie [3].

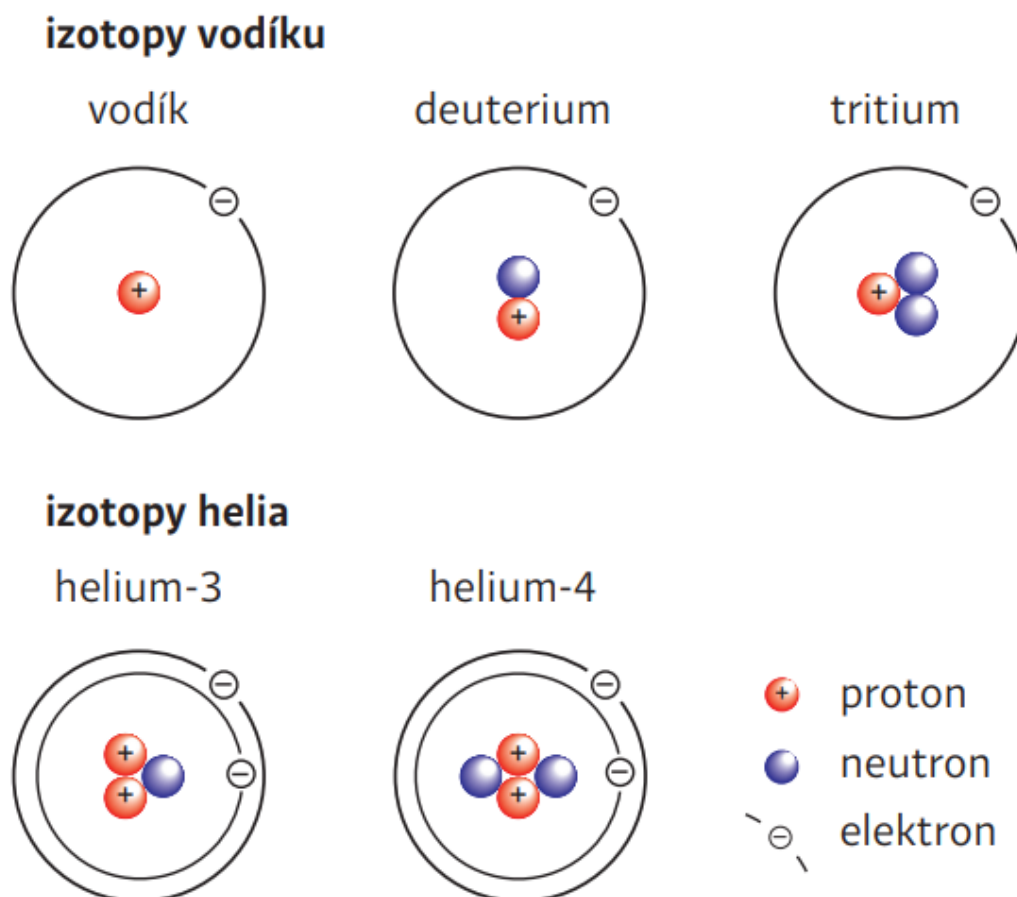


Obrázek 1.1 Fúzní reakce na Slunci [3].

Tyto nukleární reakce probíhají zejména ve jádru Slunce, kde panují teploty okolo 14 milionů °C, hmota je ve skupenství plazmatu o velmi vysoké hustotě a působí obrovskými tlaky, přibližně  $4 \cdot 10^{11}$  baru, na materiál směrem od středu hvězdy. Odstředivý tlak vyrovnává gravitace Slunce a stlačuje hmotu do tvaru koule. Z jádra se energie šíří zářením a vedením až do tzv. fotosféry, ze které vyzařuje sluneční záření dopadající na naši planetu a další okolní vesmírná tělesa [3].

Fúzní reakce mohou probíhat v mnoha fázích, které dávají vzniku dalším těžším prvkům. K tomu dochází ve větších hvězdách, kde panují vyšší teploty a vyšší tlaky, atomy se tedy syntetizují rychleji. Jakmile ze všeho vodíku vznikne helium, reakce skončí, ale gravitace hmotu opět stlačí, hvězda se zahřeje a může začít slučování tří jader helia na uhlík. Jako v předchozí reakci znovu dochází k uvolňování energie a k následnému zahřívání. Tímto opakujícím se vyhoříváním, stlačováním a dalším zažeháváním postupně vznikají další těžší jádra. Jedině v největších hvězdách se mohou syntetizovat nejstabilnější prvky jako železo, kobalt a nikl. Další těžší prvky již fúzí nevzniknou. Poté co vyhasnou i tyto poslední reakce, hvězda exploduje a nazveme ji tzv. *supernovou*. Všechna hmota se rozptýlí do vesmírného prostoru.

Zároveň jsou také vyzářeny neutrony, které mohou být právě železem a dalšími rozptýlenými prvky pohlceny. Tím jsou nadále tvořeny jiné atomy, konče uranem. Vzniklé zbytky hmoty po výbuchu se potom znovu spojují v nová vesmírná tělesa. Jaderná fúze je nejen zásadním zdrojem energie, ale také jedním z mechanismů tvoření hmoty ve vesmíru [3].

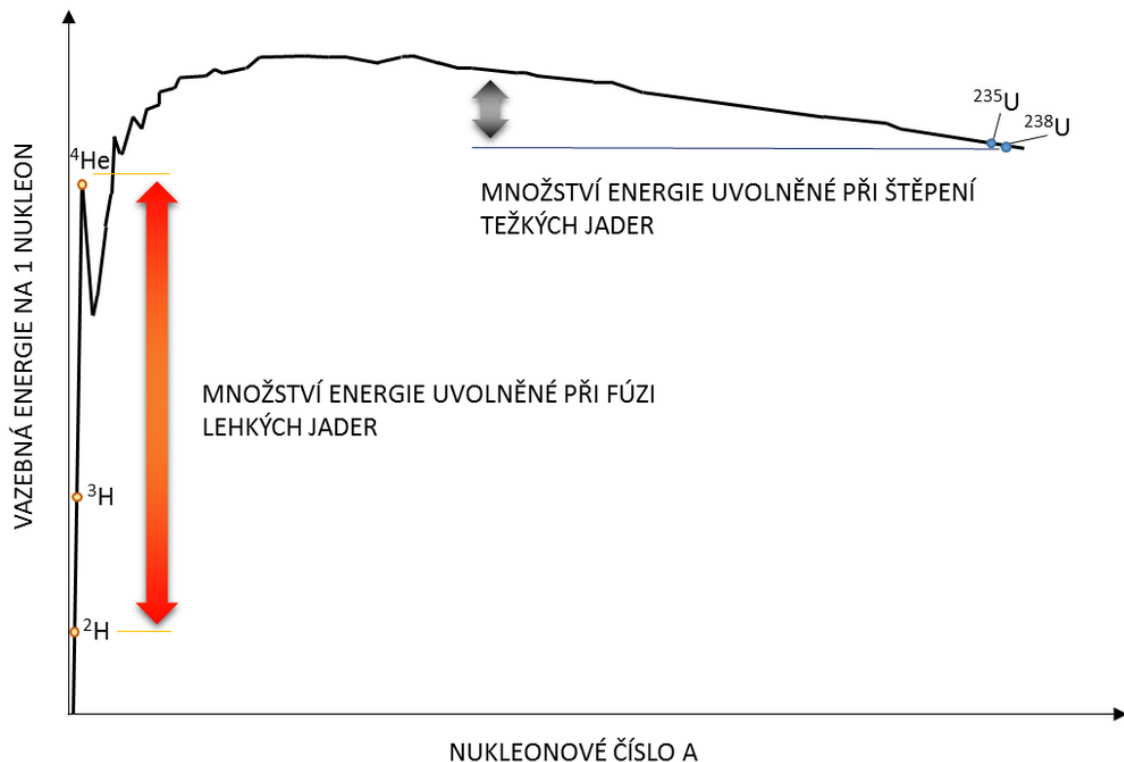


Obrázek 1.2 Izotopy prvků figurujících ve fúzních reakcích [3].

## 1.2 Fúze na zemi

Pokud je fúze tak významným zdrojem energie, je zřejmé, že bychom ji chtěli a měli začít využívat. Jenže dosažení na Zemi takových nebo podobných, srovnatelných podmínek jako ve hvězdách, tedy podmínek potřebných pro průběh fúzní reakce, se dlouho považovalo za nemožné. Zpočátku se pochybovalo o jakémkoli využití vazebné energie atomových jader. Jaderné štěpení se však ukázalo jako efektivní zdroj, jak z vojenského, tak mírového hlediska. Štěpnou reakcí lze uvolňovat velké

množství energie uložené v jádrech atomů těžkých prvků. Fúze lehkých jader je však ještě účinnější (obr. 1.3) [4, 6].



Obrázek 1.3 Graf vazebné energie na 1 nukleon s vyznačenou energií uvolněnou při fúzi a při štěpení atomových jader [7].

Jádra se skládají z protonů, kladně nabitých částic, a neutrálních neutronů. To znamená, že jádra jako celek mají kladný náboj. Pro úspěšnou jadernou fúzi je nutno jádra přiblížit na dostatečně malou vzdálenost, asi  $10^{-14}$  m [6], aby začaly působit přitažlivé jaderné síly působící na malé vzdálenosti. Souhlasné kladné náboje přiblížení jader brání. Elektrostatické síly, působící na velké vzdálenosti, je od sebe odpuzují. K překonání této elektrostatické, nazývané coulombovské bariéry je nutné jádrům dodat dostatečné množství energie. Můžeme je například urychlovat na urychlovači, ale touto cestou nedojdeme ke kladné energetické bilanci. Vstupní výkon bude vždy větší než generovaný. Pouze při jedné ze sta milionů srážek dojde k úspěšné fúzi [3], a tedy urychlování nepatrného množství paliva nevede k průmyslovému využití. Existují a v minulosti byly zkoušeny různé metody, ale v současnosti nejpoužívanějším přístupem je zahřívání na velmi vysoké teploty. Teplo můžeme dodávat většímu objemu hmoty a tím zvýšit šanci úspěšných srážek

a spojení. Pro jadernou fúzi za vysokých teplot je používán výraz termojaderná fúze [3, 4, 6].

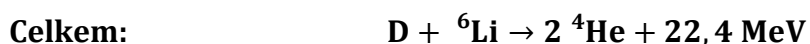
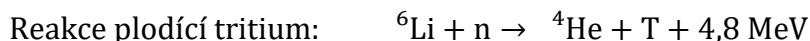
Termojaderná fúze probíhá za teplot tak vysokých, že se při nich všechna hmota nachází ve stavu čtvrtého skupenství plazmatu. Pohybujeme se v řádech stovek milionů °C. Hledaným cílem je dosažení tzv. zápalné teploty, při které reakce produkují dostatečný výkon na to, aby si palivo samo udržovalo reakční teplotu. Dojde k vyrovnání ztrátového a fúzního výkonu ohřívajícího plazma. Plazma se nadále zahřívá samo a stačí jen přidávat palivo. Při teplotách těchto řádů hovoříme o plazmatu plně ionizovaném. To znamená, že kladná jádra atomů a záporné elektrony jsou odděleny a pohybují se nezávisle na sobě. Zároveň však plazma zůstává kvazineutrálním, tedy při pohledu z vnějšku má neutrální náboj, počet kladných a záporných nábojů je vyrovnaný. Vykazuje kolektivní chování a celkový objem plazmatu je možné určitými způsoby ovládat, spoutat, dát mu tvar [6, 8].

### 1.3 Vhodné reakce

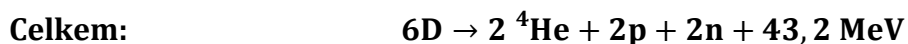
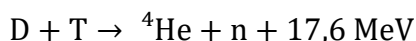
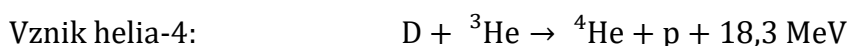
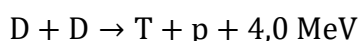
Fúzních reakcí, jak již bylo naznačeno, může probíhat celá řada, ale pro praktickou realizaci je nejvhodnější fúze izotopů vodíku. Z nich lze dosáhnout energetického zisku nejnádhěji užitím tzv. DT-reakce, která by se používala v prvních elektrárnách. To je sloučení jader izotopů vodíku deuteria a tritia (obr. 1.2), produktem je pak jádro atomu helia-4 a jeden neutron. Zároveň se také uvolňuje vazebná energie, ze které 80 % připadne neutronu a zbylých 20 % jádru helia [6]. DT-reakce má nejnižší optimální teplotu (přibližně 163 milionů °C [2]) a nejvyšší pravděpodobnost úspěšného spojení jader ze všech fúzních reakcí. Zároveň má také nejvyšší energetický potenciál (obr. 1.3). Deuterium je na Zemi hojně rozšířené, lze získávat z běžné vody, ve které je ho prakticky nevyčerpatelné množství. Tritium na naší planetě najdeme jen vzácně. Je radioaktivní s poločasem rozpadu 12,3 roku [3]. Nachází se nejčastěji ve vrchních vrstvách atmosféry, kde vzniká vlivem ionizujícího kosmického záření. Také vzniká v jaderných reaktorech. Tritium musíme vyrobit a příhodně se dá získávat přímou návazností na spojování deuteria a tritia probíhající ve fúzním reaktoru. Uvolněný neutron bude reagovat s lithiem a tím vznikne potřebné tritium, zároveň je dalším produktem znovu helium-4. Lithium je také široce dostupným prvkem, palivo tedy nepředstavuje pro chod budoucí



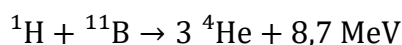
elektrárny žádný problém. Vzniklé helium je inertním plynem, kterého je na Zemi nedostatek. Je odvedeno ven z reaktoru a může být jinak průmyslově použito, například na chlazení součástí reaktoru [2–4].



Běžně se v současných operujících fúzních zařízeních pracuje s reakcí deuterium – deuterium, tedy tzv. DD-reakcí. I přesto, že dosáhnout zisku využíváním této reakce je daleko obtížnější, pravděpodobnost jejího úspěšného průběhu je nižší a optimální teploty se pohybují mezi 400 až 500 miliony °C [9], tak se s ní počítá i do budoucna v elektrárnách druhé generace. Nebylo by nutné vyrábět tritium, tím pádem není potřeba lithia a snížili bychom možnosti aktivace materiálů reaktoru. To usnadňuje údržbu, modifikace, budoucí odstavení fúzních zařízeních, není nutné náročné manipulace s tritiem. Plazmata DD a DT reakcí jsou si velmi podobná, a to usnadňuje současný výzkum jejich chování a vlastností [10]. Celá DD-reakce se skládá ze čtyř reakcí, dohromady spolu reaguje šest jader deuteria a vznikají dvě jádra helia-4, dva protony, dva neutrony a uvolní se energie [2–4].



Vize do budoucna spočívají i v použití tzv. bezneutronové fúze, kterou by se zamezilo veškeré sekundární aktivaci konstrukce reaktoru neutrony a umožnila by generovat elektrickou energii přímo magnetohydrodynamickým způsobem bez použití, v současnosti běžného řešení, parní turbíny. Tím by se celý proces zjednodušil a zvýšila by se jeho účinnost. Bude se jednat například o fúzi jader vodíku (tedy jednoho protonu) a boru při které vznikají jádra helia-4 [2, 3].



## 1.4 Podmínky termojaderné fúze

Klíčovou podmínkou termojaderné fúze je dostatečně vysoká teplota, ale abychom dosáhli kladného energetického zisku, musíme také znát s jakým množstvím paliva a po jakou dobu s ním pracovat. Přesněji řečeno, musíme zajistit potřebnou hustotu reaktantů po určitý čas za daných optimálních teplot, abychom docílili dostatečné četnosti fúzních reakcí a tím tedy dostatečného množství uvolněné energie. Takto lze zjednodušeně slovně formulovat tzv. Lawsonovo kritérium. To lze zapsat následující rovnicí: součin hustoty slučovaných jader (iontů) a určitého časového intervalu (doby udržení) musí být větší nebo roven hodnotě závislé na teplotě [2–4].

$$n\tau_E \geq f(T)$$

Hustotu paliva nebo také hustotu plazmatu definujeme jako počet slučovaných jader na jednotku objemu. Doba udržení získáme jako podíl tepelné energie plazmatu a výkonu energetických ztrát [8].

$$\tau_E = \frac{W_P}{P_L}$$

Doba udržení charakterizuje, jak rychle se energie ztrácí z plazmatu, tedy jak rychle se plazma ochlazuje. Prakticky nám říká, jak dobře je nutné plazma „izolovat“ [3, 8].

Lawsonovo kritérium ukazuje, jaké musí být splněny podmínky ve fúzním reaktoru, abychom dosáhli dostatečného energetického zisku potřebného k určité energetické rovnováze. Takovéto rovnovážné stavy jsou pro termojadernou fúzi definovány tři. Prvním je tzv. vědecké vyrovnání (vědecký zlom, *scientific breakeven*). To spočívá ve vyrovnání fúzního výkonu a výkonu ohřevu plazmatu. Pro termojaderná zařízení se zavádí charakteristika Q definovaná jako podíl fúzního výkonu a výkonu vnějšího ohřevu plazmatu. Nazývá se faktor zesílení výkonu. Je zřejmé, že pro vědecké vyrovnání bude Q rovno jedné [2, 4].

$$Q = \frac{P_F}{P_H}$$

Přelomovým stavem je již dříve zmíněné zapálení plazmatu (*ignition*). S rostoucí teplotou se zvyšuje rychlost fúzních reakcí a v případě vodíkové fúze se plazma čím dál více zahřívá samo produkovanými alfa částicemi. Zapálením je pak okamžik, od

kterého nadále není třeba žádného jiného vnějšího ohřevu, jádra helia zajišťují všechny nutný výkon pro ohřev plazmatu. Dojde tedy k vyrovnání ztrátového a fúzního výkonu absorbovaného v plazmatu. Výkon vnějšího ohřevu je nulový a zesílení Q je pak prakticky nekonečně veliké [2–4].

Reálně se však stále určitý vnější ohřev využívat bude jako možnost řízení plazmatu, a to i v případě zapáleného plazmatu. Klíčovou rovnováhou tedy bude vyrovnání fúzního výkonu s veškerou vlastní spotřebou fúzní elektrárny. Poté se jedná o tzv. inženýrské vyrovnání (inženýrský zlom, *engineering breakeven*). Teprve tehdy bude elektrárna schopna produkce využitelné energie. Dosažení této rovnováhy je silně závislé na účinnostech metod ohřevu plazmatu a všech procesů konverze energie ve fúzní elektrárně [2–4].

## 1.5 Způsoby udržení

V současnosti se pracuje zejména na dvou možných přístupech ke splnění nutných kritérií fúze. Nazývají se magnetickým a inerciálním udržením. Jednoduše řečeno spočívají buď v udržení paliva o nižší hustotě po delší dobu (přibližně  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  a několik sekund), anebo stlačení paliva na velmi vysokou hustotu po extrémně krátký čas ( $10^{31} \text{ m}^{-3}$  a méně jak miliardtina sekundy) [6].

### 1.5.1 Inerciální udržení

Při inerciálním udržení je palivo stlačeno a ohřáto tak rychle, že fúzní reakce proběhne ještě dříve, než se vytvořené plazma rozptýlí do prostoru. Okamžitému úniku brání pouze vlastní inerce – setrvačnost paliva, žádné jiné vnější síly nepůsobí. Při každém zapálení plazmatu tímto způsobem vlastně sledujeme explozi miniaturní vodíkové bomby, proto se z bezpečnostních hledisek pracuje s velmi malým množstvím paliva, řádově miligramy. Přesto se však každou reakcí uvolní stovky megajoulů energie. Množství paliva je také omezeno tím, jak rychle jsme schopni ho dostatečně zahřát. Pro fúzní elektrárnu pracující tímto způsobem je tedy nutné najít řešení ohřevu a přívodu paliva a také pracovní prostor takový, aby bylo možné nepřetržitě opakovat malé výbuchy a tím zabezpečit kontinuální výrobu elektrické energie [3, 6].

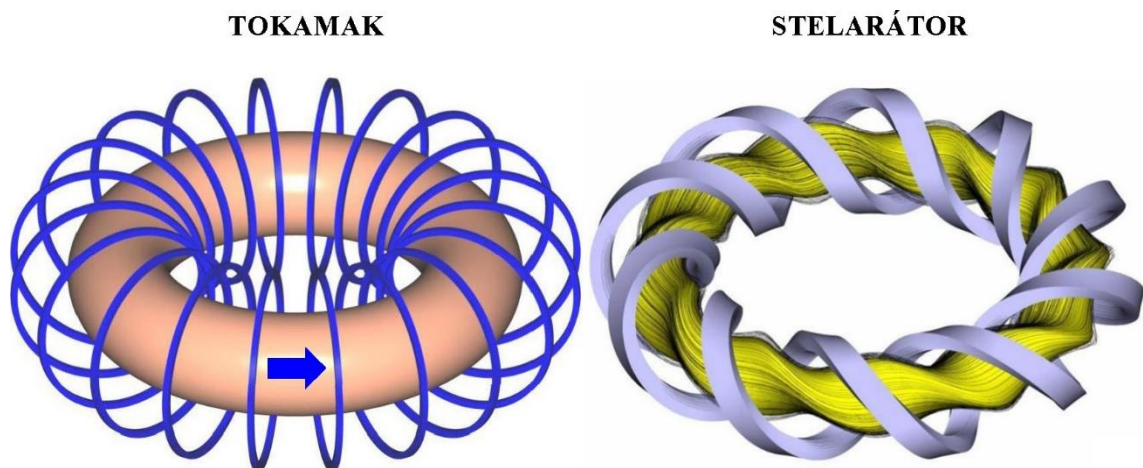
Palivo, směs deuteria a tritia, je ve formě malých kulových terčků neboli pelet o průměru několika milimetrů. Tyto pelety je pak nutné stlačit na hustotu přibližně tisíckrát větší, než je hustota paliva v pevném skupenství, asi  $200 \text{ gcm}^{-3}$  [6]. Rovnoměrným zahřátím terčku ze všech stran dochází k odpařování slupky, vznikají velké reakční síly mezi odpařenými plyny a dosud neodpařenou částí pelety, které vytváří potřebný tlak (asi stamilionkrát vyšší než atmosférický) a urychlují neodpařenou část slupky ke středu terčku rychlostmi až několika tisíc kilometrů za sekundu [6]. Stlačované palivo se zahřívá a pokud v momentě stlačení na maximální hustotu přesáhne teplota teplotu zápalnou, dochází ke vznícení paliva a šíření termojaderné reakce až do vyhoření nezreagovaného zbytku. Lawsonovo kritérium pro inerciální udržení je pak vhodné zapsat jako součin hustoty a poloměru terčku, hodnota tohoto součinu je závislá na účinnosti přeměny fúzní energie na ohřev peletky. Tato účinnost je omezoována technologiemi zahřívání paliva [3, 6].

K energetickému vyrovnání pak dojde, pokud se zisk energie z fúzních reakcí rovná energii nutné na ohřev terčku. Doposud nejlepšího a velmi významného výsledku se podařilo dosáhnout 8. srpna 2021 v americké *National Ignition Facility* v *Lawrence Livermore National Laboratory*, kde bylo dosaženo energetického zisku více než 1,3 MJ z potřebných 1,9 MJ ( $Q \sim 0,7$ ) na ohřev terčku lasery [11]. Lasery jsou v současnosti obvyklou technologií používanou na ohřev a stlačování fúzního paliva. Kvůli jejich nízké energetické účinnosti a opakovatelnosti laserových pulzů však není energetické využití zatím možné. Stlačování paliva brání také jakákoli asymetrie a imperfekce terčků, které zesilují nestability ve stlačovaném palivu. I přesto ale výsledek z podzimního experimentu ukazuje, že má smysl se inerciální způsobem nadále zabývat [3, 6].

### **1.5.2 Magnetické udržení**

Daleko úspěšnějším a slibnějším přístupem je spoutat plazma magnetickým polem. Magnetické udržení využívá faktu, že při termojaderných teplotách je jakákoli látka ve skupenství plně ionizovaného plazmatu. Částice s nábojem se pohybují podél siločar magnetického pole a tím je možné usměrňovat separované ionty a elektrony. Z různých pokusů vzešlo průlomové řešení magnetické siločáry uzavřít a spoutat plazma do tvaru prstence, toroidu. Tím také vznikly dvě nejúspěšnější konfigurace fúzních reaktorů nazývané tokamak a stelarátor (obr. 1.4), ve kterých se pracuje se

šroubovicovým (helikálním) magnetickým polem. To je v tokamaku tvořeno kombinací toroidálního pole vnějších magnetických cívek a poloidálního pole generovaného elektrickým proudem, který protéká plazmatem. Šroubovicového pole ve stelarátoru je dosaženo pouze samotnými vnějšími cívkami. Kvůli tomu je ale geometrie cívek a také vlastní komory daleko složitější než u tokamaků. Právě také díky relativní jednoduchosti se tak tokamakům dostalo daleko více pozornosti a stelarátory až v současnosti zažívají renesanci zapříčiněnou dnešními možnostmi v modelování, simulacích i výrobě poskytovanými moderní výpočetní technikou. Hlavním důvodem, proč tokamaky předstihly stelarátory, je právě indukovaný elektrický proud v plazmatu. Nejenže je nutný k vytváření helikálního pole, ale zároveň ohřívá plazma Jouleovým teplem. V tokamacích bylo vždy dosahováno lepších výsledků než ve stelarátorech. Ty pracovaly se studeným plazmatem. K postupnému překonávání tohoto nedostatku stelarátorů ale vede rozvoj nových systémů ohřevu plazmatu. Stelarátory pak mají kvůli absenci proudu v plazmatu naopak výhodu a to takovou, že se v plazmatu neobjevují různé nestability zapříčiněné právě protékajícím proudem. Stelarátor je také oproti tokamaku schopen pracovat stacionárně, zatímco tokamaky (bez dodatečných opatření) pracují v pulzech [4, 6, 12].



Obrázek 1.4 Magnetické udržení plazmatu v zařízeních tokamak a stelarátor. Modré kruhy a šedé šroubovice znázorňují magnetické cívky. Modrá šipka znázorňuje elektrický proud v plazmatu [4].

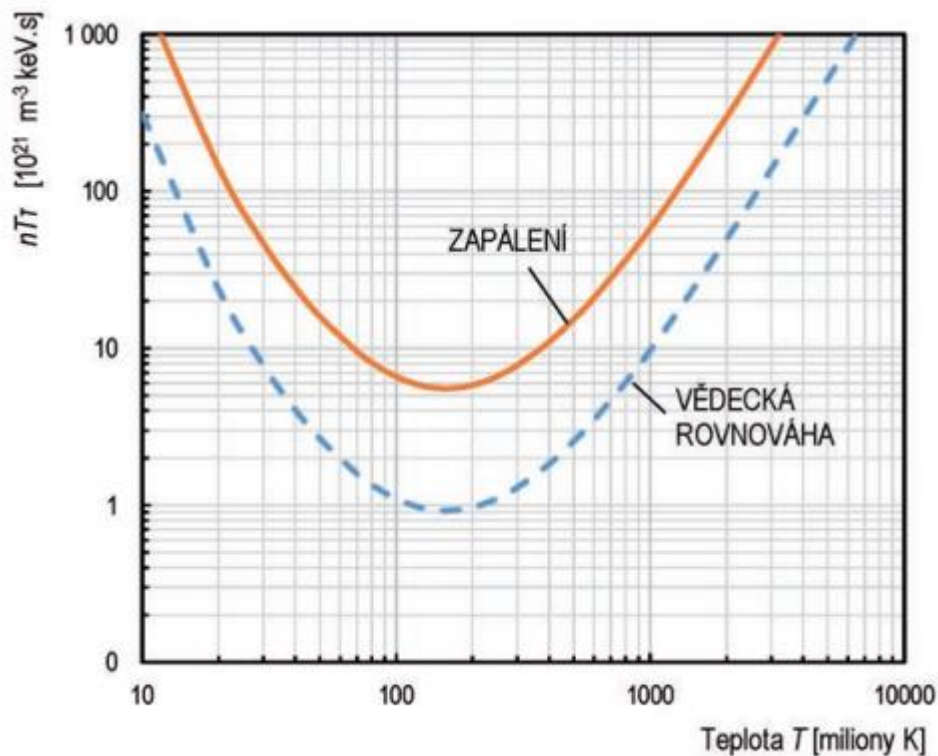
Lawsonovo kritérium pro magnetické udržení je vhodné psát ve formě tzv. trojného (fúzního součinu), kde součin hustoty a teploty představuje tlak plazmatu, který je

nutný udržet magnetickým polem. Zápis ve formě trojného součinu platí pro teploty v intervalu 100 až 200 milionů °C (obr. 1.5) [2, 3].

$$nT\tau_E \geq g(T)$$

Pro splnění Lawsonových kritérií při DT reakci v okolí hodnoty optimální teploty přibližně 163 milionů °C jsou pak hodnoty trojného součinu následující [2]:

kritérium vědecké rovnováhy	$nT\tau_E \geq 0,926 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$
kritérium zapálení	$nT\tau_E \geq 5,554 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$



Obrázek 1.5 Lawsonova kritéria pro DT reakci při magnetickém udržení. Kritéria jsou nejnáze splnitelná při teplotě 163 mil. K [4].

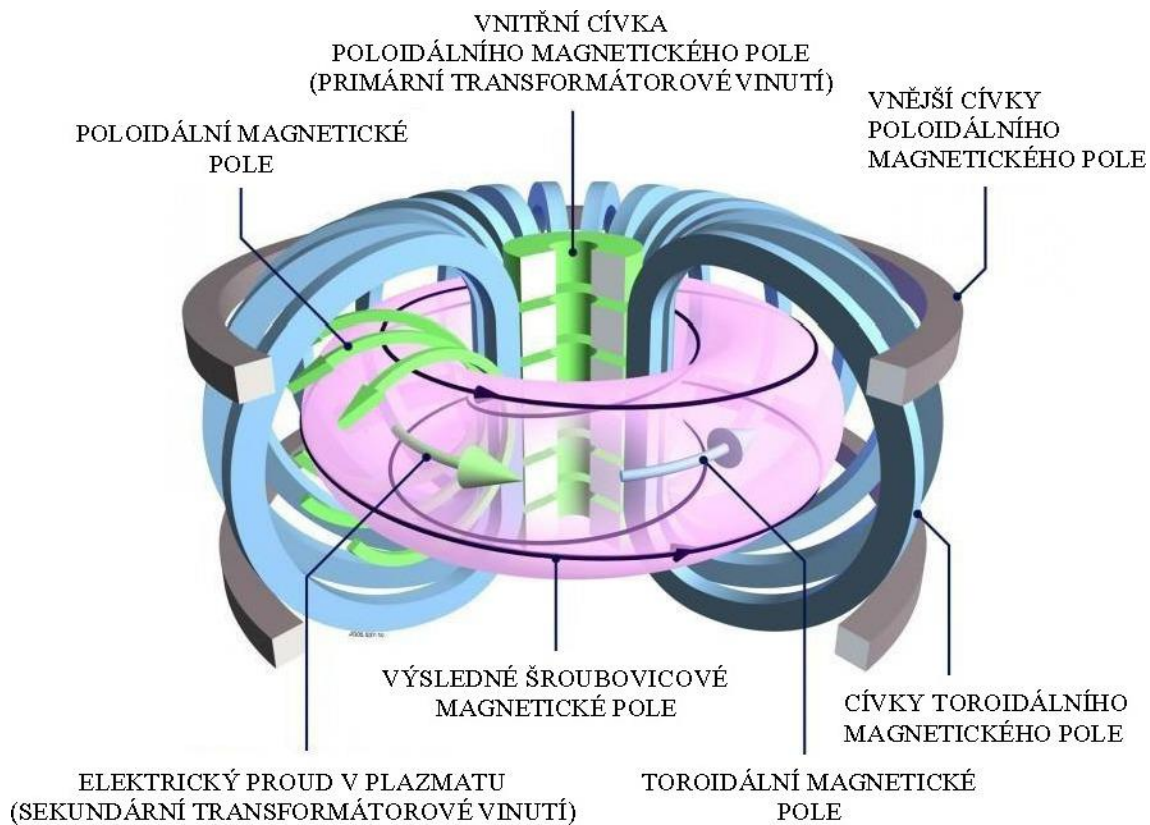
## 1.6 Výhody jaderné fúze

Zásoby paliva pro tento proces jsou v podstatě nevyčerpatelné. Na Zemi ho dle odhadů máme tolik, že by lidstvu vystačilo až do vyhasnutí Slunce a zániku naší planety. Palivem je voda a lithium. Z poloplné vany vody a lithia potřebného pro notebookovou baterii se získá stejně energie jako ze 40 tun uhlí [3]. Zároveň je fúze bezemisním zdrojem, neznečišťuje životní prostředí a atmosféru, nepřispívá ke globálnímu oteplování [2, 3].

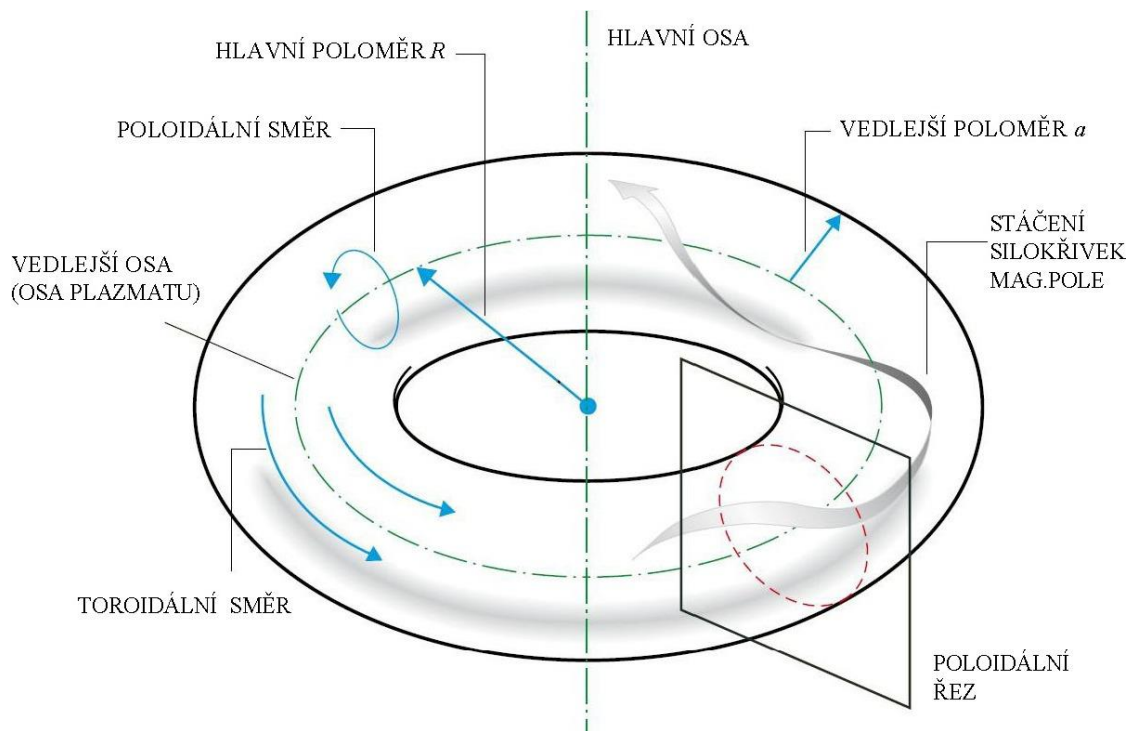
Fúze je bezpečná. Cokoliv společného se slovem „jádro“ velmi často vzbuzuje v lidech strach, vybavují si jména Černobyl a Fukušima nebo Hirošima a Nagasaki. Fúzní elektrárna nezačne žít vlastním životem, nekontrolovaná řetězová reakce není principiálně možná. Elektrárna nemůže „vybuchnout“. Jaderná fúze neprobíhá na zemském povrchu samovolně a je nutné pro ni vytvořit vhodné prostředí. Dosažení podmínek takových, aby fúzní reakce v těchto zařízeních mohli probíhat, je tak technicky náročné, že jakékoli narušení vede k okamžitému zániku celého procesu. Nevzniká problém s vyhořelým palivem a aktivované materiály reaktoru mohou být použity takové, u kterých radioaktivita rychle klesá na přijatelné hodnoty. To umožňuje jejich recyklaci již po přibližně padesáti letech. Zařízení, pro výrobu elektřiny fúzní cestou, mohou být postaveny téměř kdekoli. Nejsou závislé na ložiscích paliv. Je tím tak zaručena nezávislost provozovatele, z politického i ekonomického hlediska. Oproti obnovitelným zdrojům se dají koncentrovat do relativně malých prostorů, nezabírají velké plochy a nijak zásadně nenarušují krajinný ráz [2–4].

## 1.7 Tokamak

V padesátých letech minulého století se v Sovětském svazu zrodil nový typ fúzního reaktoru, který v následujícím desetiletí předčil všechny ostatní dosavadní pokusy a zažehnul tokamakovou euforii na celém světě. Většina existujících zařízení začala být rychle přestavována a dodnes je tokamak stále nejslibnější konfigurací. Proto je ITER stavěný jako tokamak a také první elektrárny jsou uvažovány s těmito reaktory. V tokamaku jsou rozeznávány dva hlavní směry, toroidální a poloidální (obr 1.7). Tokamak (obr 1.6) je tvořen prstencovou (toroidální) vakuovou komorou, okolo které jsou navinuty cívky toroidálního pole. Komora je umístěna na transformátorovém jádru, nebo v současnosti obvykle na centrálním solenoidu, který tvoří vnitřní cívku poloidálního pole a je primárním vinutím transformátoru. V plazmatu uvnitř vakuové komory je transformátorem indukován vysoký elektrický proud (v největších zařízeních řádově megaampéry), který pak tvoří sekundární vinutí o jednom závitě. Vytváří v tokamaku poloidální magnetické pole a zahřívá plazma. Šroubovicové (helikální) pole vzniká součtem toroidálního a poloidálního a izoluje plazma od stěn vakuové komory [3, 4, 6].



Obrázek 1.6 Základní schéma reaktoru typu tokamak [13].



Obrázek 1.7 Geometrické charakteristiky toroidálního reaktoru [13].



Poloidální pole je slabší než toroidální a šroubovice stoupá velmi mírně. V tokamaku jsou obvykle i vnější cívky poloidálního pole, které slouží k polohování plazmatu, a také další korekční cívky potlačující různé nestability plazmatu [3, 4, 6].

Největším a nejvýkonnějším tokamakem, postaveným již v osmdesátých letech, je evropský JET. Nachází se v britském Culhamu nedaleko Oxfordu. Drží rekord z roku 1997 kdy bylo vygenerováno 16,1 MW fúzního výkonu a docíleno  $Q = 0,67$ . Nejnovější úspěch byl oznámen 9. února 2022. V jednom pětisekundovém pulzu bylo uvolněno 59 MJ energie. V průběhu let byl různě přestavován a modernizován. Na JETu jsou testovány technologie a materiály pro stavěný ITER. Dnes už je to jediný tokamak, který operuje s DT plazmatem. Druhým byl, již dnes odstavený, americký TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*) v Princetonu [3, 14].

### 1.7.1 Magnetické pole

Na nabitou částici v elektrickém a magnetickém poli působí Lorentzova síla, která je kolmá na vektory rychlosti a magnetické indukce [4].

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Vektor rychlosti můžeme rozdělit na složku rovnoběžnou se směrem siločar magnetického pole a na složku k nim kolmou. Magnetické pole nemá vliv na směr rovnoběžný, částice se tímto směrem může pohybovat volně. Ve směru kolmém je však kvůli Lorentzově síle trajektorie částice zakřivována do kružnice o tzv. Larmorově poloměru [4].

$$r_L = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

Výsledný pohyb v homogenním poli se pak skládá z rovnoměrného přímočarého pohybu podél pole a Larmorovy rotace neboli gyrace [17]. Celkově se částice pohybuje po šroubovici, přičemž se neustále sráží s jinými částicemi. Následkem srážek je příčná difúze, pohyb částic v kolmém směru na magnetické siločáry. Střed gyrace se náhodně posouvá, maximální délka posuvu je dvojnásobek Larmorova poloměru. Toroidální geometrie je však nehomogenní, a proto je proměnné i magnetické pole. Magnetická indukce je přibližně nepřímo úměrná vzdálenosti od osy symetrie. Ve slabším poli se zvětšuje velikost Larmorova poloměru, následkem je tzv. grad-B drift, posuv gyračních středů směrem k horní či dolní části vakuové

komory. Jedním směrem se posunou záporné elektrony, opačným kladné ionty. Částice jsou také urychlovány ve směru elektrického pole, kvůli tomu vzniká  $E \times B$  drift, odstředivý posun středů gyrace. Právě kvůli těmto driftům je nutné toroidální pole doplnit o poloidální a vzniklé helikální magnetické pole příčné driftы omezuje [3, 4, 6].

### 1.7.2 Pulzní režim

Tokamaky pracují v pulzech, a to komplikuje jejich využití pro kontinuální výrobu energie. Proud v plazmatu (sekundárním vinutí) se indukuje jen při růstu stejnosměrného proudu v primárním vinutí a po čase (ve velkých tokamacích obvykle 10 až 20 sekund [7]) je dosaženo maximální hodnoty proudu. Dochází k přerušování indukovaného proudu, změně magnetického pole (mizí poloidální složka) a ochlazení plazmatu. Výboj vyhasne. Pracuje se na různých variantách, které umožní odstranit pulzní režim. V současnosti se pro budoucí fúzní elektrárny uvažuje zejména neinduktivní generování elektrického proudu pomocí vlečení elektronů elektromagnetickými vlnami, svazků neutrálních atomů a využití samovolně vznikajícího *bootstrap* proudu. Ten vzniká kvůli rostoucímu tlaku plazmatu ve směru do středu komory. Jiné řešení se mohou hledat i vně reaktoru v podobě uzpůsobených chladících okruhů, které by dodávali teplo do turbíny kontinuálně, nebo použití dvou reaktorů ve vzájemné protifázi. Návrhová elektrárna DEMO bude mít pulzy dlouhé 120 minut [6, 7].

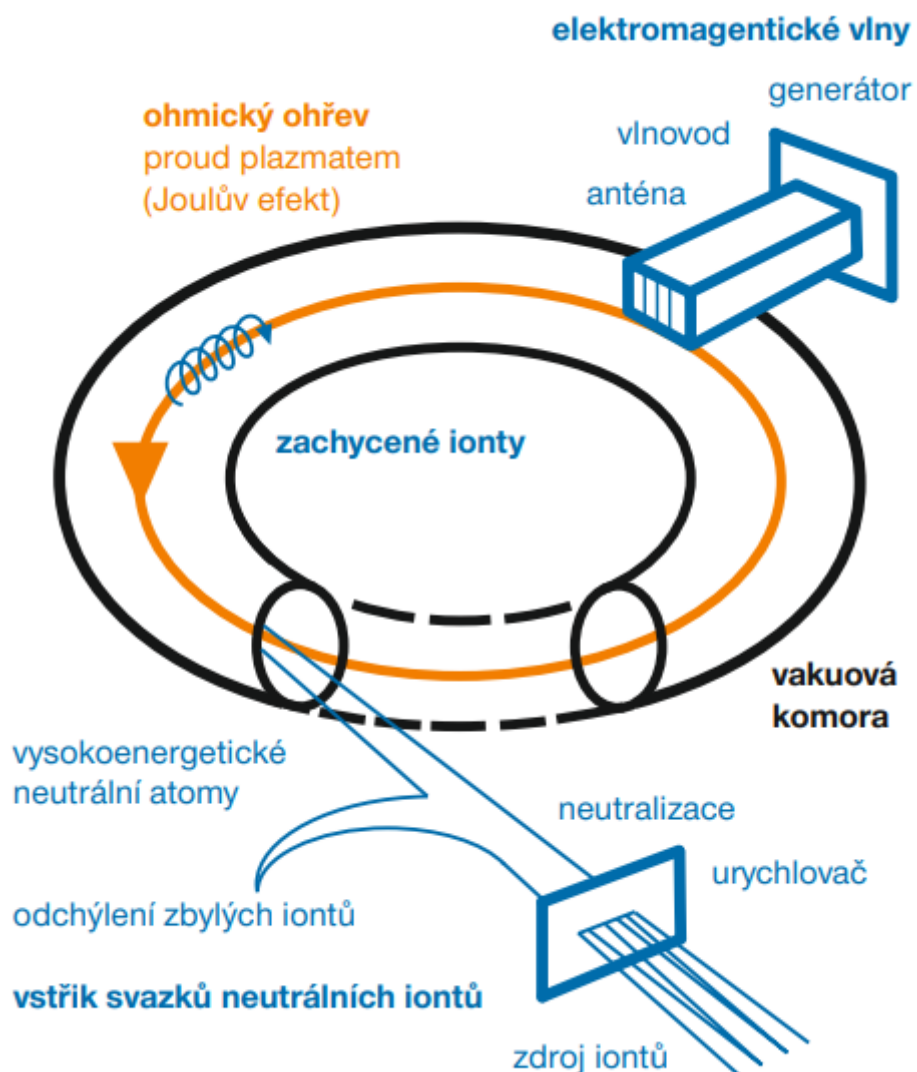
### 1.7.3 Ohřev plazmatu

Systémy pro neinduktivní generování elektrického proudu zároveň slouží k dodatečnému ohřevu plazmatu (obr. 1.8). S rostoucí teplotou klesá elektrický odpor plazmatu a asi při 50 milionech °C je již ohmický ohřev neúčinný [15]. Největší význam má na začátku pulzu, kdy je dosaženo milionu °C za pouhou milisekundu [6]. Při dalším zvyšování proudu by bylo generováno silnější poloidální pole, zvětšovala by se šroubovitost (helicit) výsledného pole a destabilizovalo se plazma. Je tedy potřeba vnějšího ohřevu [4].

Ohřev elektromagnetickými vlnami využívá jevu rezonanční absorpce, podobně jako v mikrovlnných troubách. Částice konají gyrační pohyb s tzv. cyklotronovou rezonanční frekvencí [3]. Energie elektromagnetických vln s frekvencemi, které

jsou harmonickými násobky cyklotronových frekvencí jsou pak částicemi pohlcovány [2]. Frekvence pro ohřev se pohybují v rozmezí 40 až 120 MHz v případě iontů, pro mnohem lehčí elektrony mezi 60 až 200 GHz [7].

Při ohřevu svazky neutrálních atomů je do plazmatu injektován proud atomů fúzního paliva (obvykle deuteria), které jsou nejdříve záporně ionizovány, urychleny elektrickým polem a znovu neutralizovány. Neutrální atomy nejsou ovlivněny magnetickým polem a mohou proniknout hluboko do ohřívaného plazmatu, kde jsou znovu ionizovány a srážkami s ostatními částicemi plazmatu dochází k předávání kinetické energie [2, 4].



Obrázek 1.8 Tři metody vnějšího ohřevu plazmatu v tokamaku: základní ohmický a dodatečný s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem, respektive se vstříkem svazku vysokoenergetických neutrálních atomů [6].

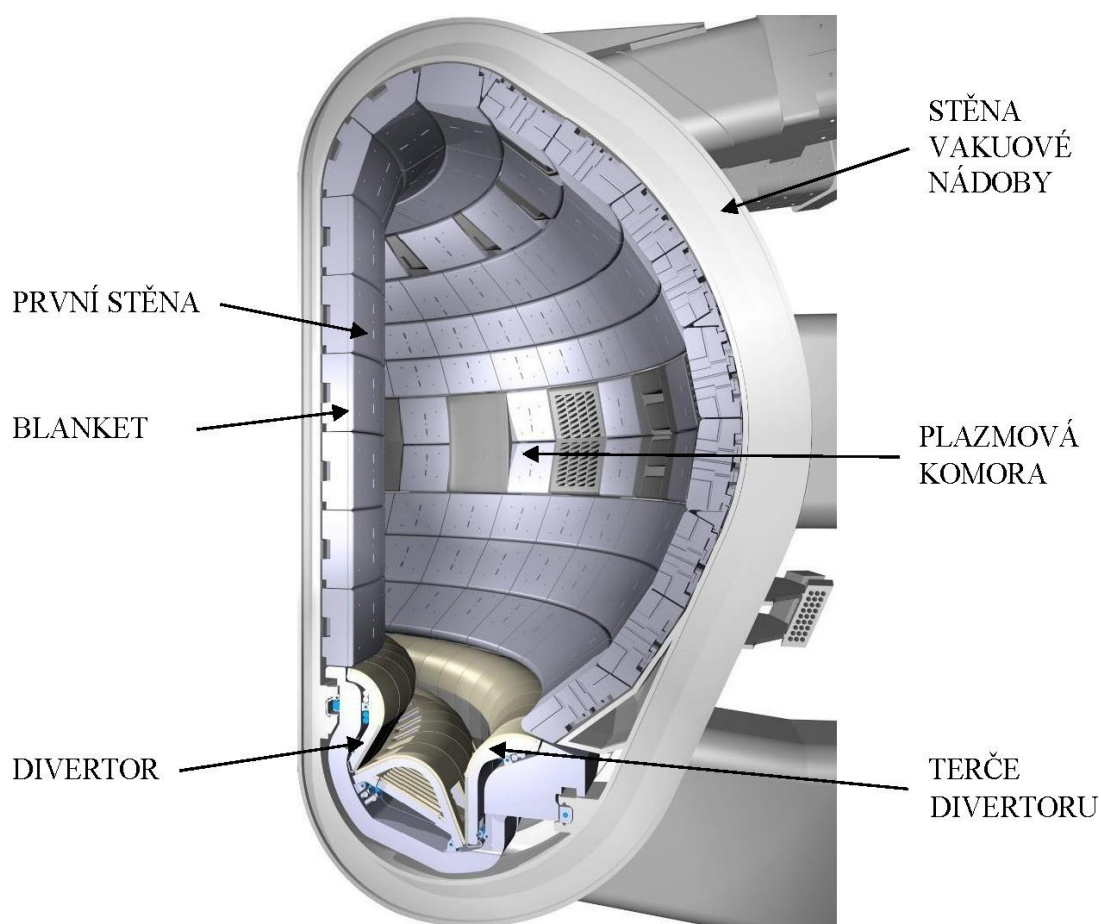
Tyto metody byly v tokamacích zavedeny již v sedmdesátých letech, začalo se dosahovat termojaderných teplot a zvládnutí fúze se očekávalo v nejbližší době. Ukázalo se však, že se zvětšujícím se ohřevem přišel rychlý růst energetických ztrát, tedy klesala doba udržení. Zlomový byl objev tzv. H-modu na německém zařízení ASDEX (*Axially Symmetric Divertor Experiment*) s divertorem [3]. Při H-modu dochází ke skokovému zlepšení udržení energie díky strmému nárůstu hustoty a teploty v povrchové vrstvě plazmatu. Vzniklá transportní bariéra dále umožní zvyšování parametrů i v jádru plazmatu [7].

## 1.8 Jaderné komponenty

Produktem fúzní reakce je jádro helia a neutron. Neutrony nejsou zachyceny magnetickým polem, unikají z plazmatu a jsou pohlceny materiálem mezi stěnou vakuové komory a plazmatem. Součásti uvnitř komory jsou nazývány jadernými komponenty (obr 1.9). Jsou vystavovány extrémním podmínkám a s tím přicházejí také extrémní nároky na jejich provedení. Použité materiály musí být zejména velmi tepelně a radiačně odolné, zároveň však s vysokou tepelnou vodivostí. Volba materiálu má i zásadní vliv na znečišťování plazmatu. Chlazením jaderných komponent je získáváno teplo, které poté bude použito na výrobu elektrické energie. Mezi jaderné komponenty patří první stěna, blanket a divertor [2, 4].

### 1.8.1 První stěna a blanket

První stěna je jedním z PFC – *Plasma-Facing Components*, tedy komponentů bezprostředně vystavených plazmatu. Je to vrstva materiálu chránící konstrukci reaktoru, „první linie“ mezi plazmatem a jadernou zónou. Nejmodernějším řešením je její složení z panelů, „kachliček“. V tokamaku ITER budou panely s vrchní vrstvou z beryllia, difuzně navařenou na chladič ze slitiny CuCrZr, navržené až na 4,7 MW/m<sup>2</sup> [16]. Očekávána nominální hodnota budoucích elektráren nebude převyšovat 0,5 MW/m<sup>2</sup> [4]. Vyšší tepelné toky se objevují lokálně v okamžicích doteku plazmatu se stěnou, typicky při startu a konci pulzu. Řádově vyšší hodnoty mohou být způsobeny nestabilitami plazmatu, kdy je možné natavení nebo odpaření vrchní vrstvy. Poškozené panely se poté vymění [2, 4].



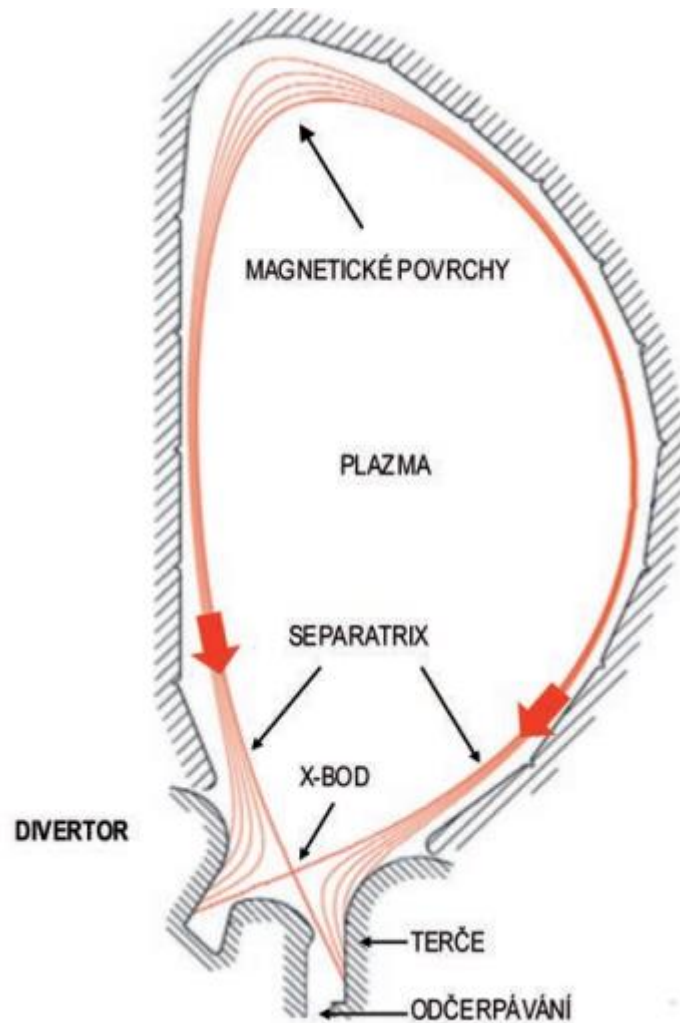
Obrázek 1.9 Jaderné komponenty v tokamaku ITER [15].

Blanket je výplň mezi první stěnou a stěnou vakuové komory. V blanketu je pohlcován tok neutronů, jejich kinetická energie je zde přeměňována na teplo, a to je chladícím systémem odvedeno z reaktoru. V budoucích elektrárnách bude blanket obsahovat také lithium, reakcí lithia a neutronů se bude produkovat tritium pro DT-reakci. První stěna a blanket mohou být spojené, tak jako tomu bude v reaktoru ITER. Společně tvoří moduly, kterými je obložen vnitřní povrch vakuové nádoby. Nosná konstrukce první stěny a blanket jsou z oceli AISI 316LN-IG, chladícím médiem bude voda o teplotě 70 až 110 °C a tlaku 4 MPa [2, 4].

### 1.8.2 Divertor

Z plazmatu je nutno odvádět nečistoty, vznikající helium a nezreagované palivo. Nečistoty se do plazmatu dostávají zejména interakcí plazmatu s materiály jaderných komponent (zejména s první stěnou) a zvyšují energetické ztráty. Tyto nežádoucí látky se koncentrují v okrajové vrstvě plazmatu, tzv.

*Scrape-Off Layer* (SOL) [7]. Pomocí dodatečných magnetických cívek jsou okrajové silokřivky vně *separatrix* (poslední uzavřená magnetická plocha) odkláněny na terče divertoru. Podél těchto křivek proudí plazma (obr 1.10). Divertorový terč (druhá součást patřící do PFC) je oblast určená k přímému kontaktu plazmatu a materiálu, odpadní plazma se na terčích ochlazuje a je odčerpáno ven z vakuové komory [2, 4].



Obrázek 1.10 Divertor směřuje povrchovou vrstvu plazmatu na své terče, kde je ochlazována a odčerpávána ven z reaktoru [4]. X-bod je místem průniku separatrix [2].

Divertorové terče jsou zatíženy extrémními tepelnými toky, proto musí být zhotoveny z těch nejodolnějších materiálu a aktivně chlazeny. V tokamaku ITER budou terče z wolframových monobloků snášet energetické toky standartně 10 až 20 MW/m<sup>2</sup> [17]. Chladicí systém s vodou (70 až 200 °C, 4 MPa) bude ze stejné

měděné slitiny jako u první stěny, nosná konstrukce je ocelová. Celý divertor se bude skládat z 54 divertorových kazet [4, 17].

Divertor je obvykle umístěn ve spodní části vakuové nádoby, komora s divertorem se odchyluje od kruhového průřezu toroidu ke tvaru připomínajícímu písmeno D. Kromě odvodu nečistot divertor zároveň chrání první stěnu, odvodem SOL přispívá k tvarování plazmatu a omezuje tak jeho kontakt se stěnou. Dává také vzniknout H-modu, režimu s vyšším udržením energie [2, 4]. Jiným (předchozím) způsobem vymezení plazmatu jsou limity, výstupky první stěny určené k interakci s plazmatem. Původně byly zhotovovány také z těžkých kovů jako molybden a wolfram, poté zkoušeno naopak lehké beryllium a uhlík. Všechny způsoby vedly ke značnému znečištění plazmatu nebo k přílišné akumulaci tritia v materiálu, navíc neřešily odvod odpadních látek. Pronikání nečistot vznikajících na divertorových terčích do plazmatu je omezeno proudem SOL z vakuové komory [3, 15].

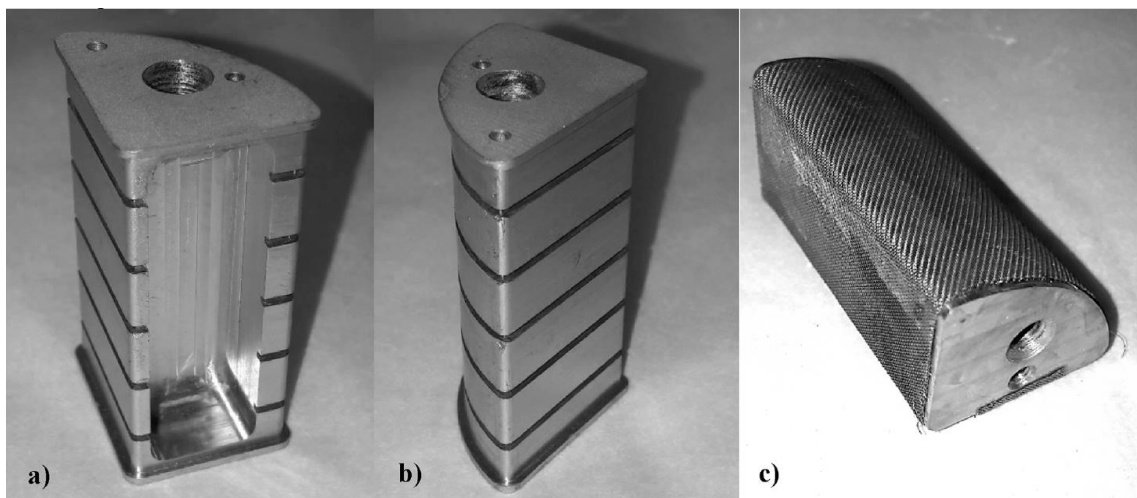
## 1.9 Použití tekutých kovů

Pevné materiály vystavované plazmatu jsou již dnes na samé hranici svých možností. Moduly první stěny a kazety divertoru mají značně omezenou životnost a při výskytu určitých poruch a nestabilit v plazmatu může dojít k jejich okamžitému poškození. Wolframové terče pro ITER se testují na  $20 \text{ MW/m}^2$  a při vyšších tocích hrozí jejich tavení. Předpokládaná životnost PFC je při zatížení  $16 \text{ MW/m}^2$  asi tři měsíce a se zvyšováním energetických toků rapidně klesá. Již při  $25 \text{ MW/m}^2$  součásti přežijí pouze hodinu [18]. Limity materiálů budou omezovat parametry plazmatu budoucích reaktorů a neumožňují jejich kontinuální provoz. Proto roste důležitost vývoje nových materiálů a technologických možností. Jednou z nich je použití divertoru z tekutých kovů. Takové pokusy probíhají i na pražském tokamaku COMPASS a nadále pokračovat budou i na jeho nové verzi COMPASS Upgrade [18, 19].

Místo pouze z monobloků by se divertorové terče mohly skládat z porézní struktury (CPS – *Capillary Porous Structure/System*) z wolframu nebo molybdenu napuštěné kovem o nižší teplotě tavení jako je lithium, cín a jejich slitiny. Tepelné toky z plazmatu jsou přijaty taveninou jako latentní teplo výparu a tím chrání pevnou

matrici. Kapilárními silami je doplněn vypařený tekutý kov. V tavenině nedochází k poškození materiálu způsobené neutronovými toky. Při pokusech na tokamaku COMPASS součást divertoru (obr. 1.11) se slitinou lithia a cínu úspěšně snesla ustálené zatížení  $12 \text{ MW/m}^2$ . CPS s lithiem přežily bez poškození extrémně vysoké tepelné šoky při experimentech na zařízeních QSPA ( $224 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ ) a MK-200UG ( $2370 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ ). Na nizozemském Magnum-PSI byly vystaveny tokům  $18 \text{ MW/m}^2$  a ty také snesly bez poškození [19].

Tekuté kovy ale také přinášejí problémy. Při výparu se do plazmatu dostává mnoho nečistot. Lehké lithium zejména ředí palivo. Cín se vypařuje tisíckrát méně, ale jakožto těžší prvek s atomovým číslem 50 má velký vliv na ochlazování paliva i při malých koncentracích v plazmatu. Nepříjemná je také kondenzace vypařených kovů na problémových místech jako jsou diagnostická okénka. Vývoj LMD (*Liquid Metal Divertor*) pokračuje spolu s vývojem nových wolframových kompozitních materiálů a představuje k nim velmi slibnou alternativu [18, 19].



Obrázek 1.11 LMD modul z tokamaku COMPASS [20]. V pohledech lze vidět a) molybdenový monoblok s dutinou pro tekutý kov; b) drážky pro rozvod tekutého kovu; c) připevněnou CPS.



## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 Galinstan

Názvem Galinstan (GaInSn) se označuje eutektická slitina složená z galia, india a cínu. Galinstan je zajímavý zejména tím, že je tekutý při pokojových teplotách. Typické složení je 68,5 % Ga, 21,5 % In, 10 % Sn, ale jsou používány i jiné varianty. V závislosti na složení se mění vlastnosti slitiny (tab. 1) [21].

Tabulka 1 Srovnání některých fyzikálních vlastností rtuti a několika eutektických slitin GaInSn, horní indexy reprezentují procentní složení [22–24].

	Hg	Galinstan <sup>2</sup>	Ga <sup>67</sup> In <sup>20,5</sup> Sn <sup>12,5</sup>	Ga <sup>61</sup> In <sup>25</sup> Sn <sup>13</sup> Zn <sup>1</sup>
Teplota tání [°C]	-38,83	-19	10,5	7,6
Teplota varu [°C]	356,62	> 1 300	> 1 300	> 900
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	13 534	6440	6 360	6 500
Elektrická vodivost [S/m]	$1,04 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$
Tepelná vodivost [W/m/K]	8,54	16,5	16,5	-
Dynamická viskozita [Pa·s]	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$

<sup>2</sup> Ochranná známka německé firmy Geratherm Medical AG; původní slitina se složením 68,5 % Ga, 21,5 % In, 10 % Sn, ale název se uchytil obecně pro eutektické slitiny těchto prvků [24].

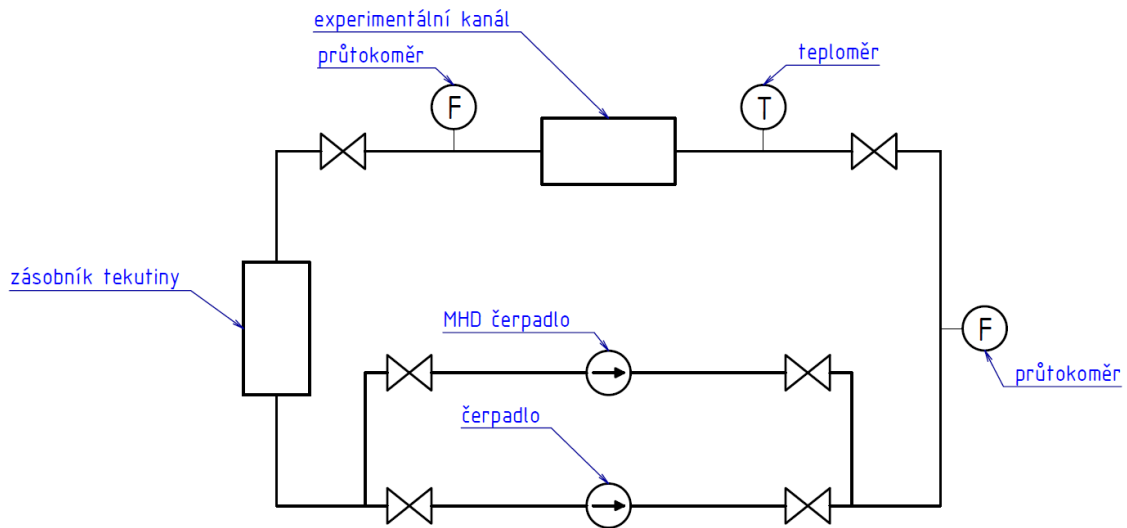
Galinstan byl původně vyvinut jako netoxická náhražka rtuti v teploměrech, ale kvůli svým zajímavým vlastnostem (nízká teplota tání, nízká reaktivita, netoxičnost) je používán při experimentech v různých technických odvětvích. Experimentuje se s ním zejména v elektronice, kde je uvažován jako materiál vhodný pro deformovatelné elektrické okruhy a vodivé vláknové struktury, antény z tekutých kovů, elektromechanické relé a další aplikace [22, 23]. Galinstan je zvažován jako médium pro různé chladicí okruhy např. ve vysokoteplotních slunečních kolektorech nebo jako náhrada pro experimenty se slitinami lithia a cínu v tokamacích. Velký význam má Galinstan také ve výzkumu magnetohydrodynamického generování elektrické energie [23, 25].

Použití Galinstanu ale je v několika ohledech problémové. Na povrchu Galinstanu se tvoří tenké vrstvy oxidů galia, které pak omezují jeho tekutost. Materiál má poté spíše konzistenci gelu nežli běžné kapaliny. To činí problém zejména při práci s malými objemy materiálu (v podobě kapiček). Experimenty proto probíhají v inertních prostředích, např. v argonové ochranné atmosféře [21, 25]. Galium má na některé kovy značné korozivní účinky, zejména na hliník a měď. Již za pokojové teploty dochází při kontaktu s hliníkem k jeho křehnutí. Měď koroduje na celém smáčeném povrchu a s rostoucí teplotou roste i hloubka poškození. V případě kontaktu Galinstanu s korozivzdornými oceli či slitinami niklu pak záleží na jejich složení. Obecně ale projevují dobrou odolnost přibližně až do 200 °C. Na druhou stranu se ale Galinstan chová bez problémů v plastovém potrubí. Při pokusech s běžnými termoplasty a NBR kaučukem při nízkých teplotách nebyla na materiálech pozorována žádná změna [23].

## 2.2 Testovací smyčka

Malá testovací smyčka bude určena pro výzkum magnetohydrodynamických jevů a generování elektrického proudu magnetohydrodynamickým způsobem. Testovacím médiem bude slitina Galinstan. Smyčka (obr 2.1) se bude skládat ze zásobníku s tekutým kovem, který bude poháněn čerpadlem skrz plastové potrubí. Čerpadlo může být použito konvenční mechanické nebo také, pro výzkum magnetohydrodynamického čerpání, čerpadlo magnetohydrodynamické (MHD čerpadlo). Na vhodných místech před a za experimentálním kanálem budou

umístěny průtokoměry a teploměr. Průtokoměry jsou dva, aby bylo možné sledovat vliv magnetického pole na pohyb kovového likvidu. Uzavírací ventily oddělují součásti smyčky, aby bylo možné s nimi snadno manipulovat. V oblasti experimentálního kanálu bude zhotoven MHD generátor.



Obrázek 2.1 Základní schéma experimentální smyčky s kovem Galinstan.

Vodivá tekutina proudí kanálem, kolem kterého jsou umístěny elektrody. Kanál s elektrodami se nachází v homogenním magnetickém poli kolmém na směr proudění a spojnici elektrod. Trajektorie nabitých částic zakřivuje Lorentzova síla. Projevuje se efekt elektromagnetické indukce a Hallova děje a na jedné elektrodě se začnou hromadit kladné a na druhé záporné ionty. Vzniká indukované elektromotorické a Hallovo napětí. Pokud se projevují tyto děje zároveň tak zapříčiňují ztráty a snižují účinnost generátoru. Vždy je tedy upřednostňován jen jeden z těchto mechanismů a ten druhý je naopak parazitní a je snaha ho potlačit. Existují čtyři typy MHD generátorů: Faradayův generátor s průběžnými elektrodami (indukce), Faradayův generátor s článkovými elektrodami (indukce), Hallův generátor (Hallův jev) a diskový generátor (Hallův jev) [26].

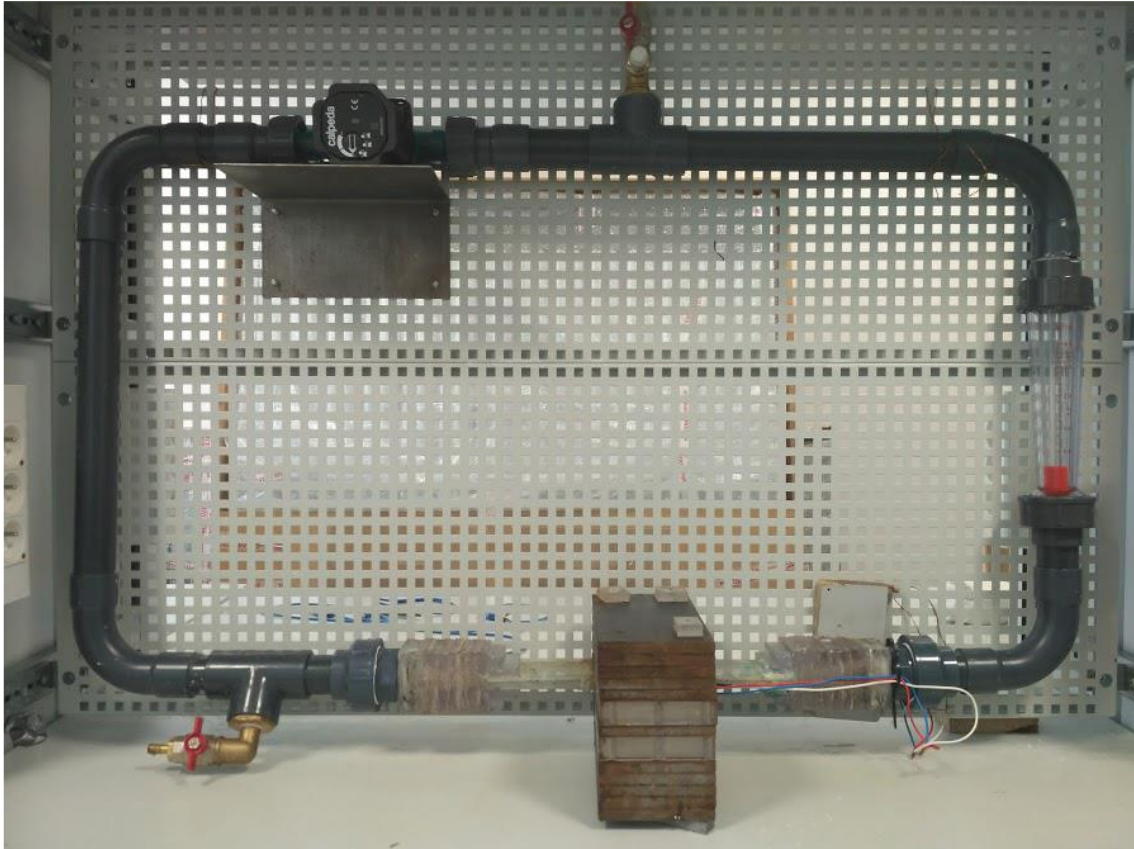
Výkon generátoru je závislý zejména na velikosti magnetické indukce, vodivosti a rychlosti proudění pracovní tekutiny. Je nutné dbát na rozměry kanálu. Výška kanálu ovlivňuje velikost magnetické indukce. Čím vyšší kanál, tím větší vzduchová mezera a tím pádem i větší magnetický odpor. Indukované napětí je úměrné šířce kanálu. S rostoucí rychlostí proudění vodivého média roste výkon generátoru.

Rychlost je ovlivněna velikostí průřezu kanálu. Snažíme se zajistit co nejsilnější a nejhomogennější magnetické pole. Při použití permanentních magnetů je vhodné umístit je opačnými póly k sobě pod a nad kanál s elektrodami. Magnetické siločáry potom mají nejpřímější směr [26–28].

Na rozdíl od klasických generátorů se v MHD generátorech nenacházejí žádné točivé součásti, a to umožňuje jejich použití za vyšších teplot. Tepelná a kinetická energie vodivého média je přeměňována přímo na elektrickou bez použití mechanických součástí, jako např. turbíny. Tím je eliminován tento mezikrok a s ním spjaté energetické ztráty. Absence rotujících součástí také zvyšuje spolehlivost. Použití MHD generátorů je uvažováno zejména ve fúzních elektrárnách, nebo ve stávajících elektrárnách spalujících fosilní paliva jako prostředek k zvýšení celkové účinnosti, ale zatím se tento způsob prakticky nepoužívá [26, 27].

Jinak je to s MHD pohony. Ty jsou úspěšně využívány k čerpání tekutin, které se dají čerpat konvenčními čerpadly obtížně. V principu jsou MHD čerpadla stavbou stejné jako generátory, jen je na elektrody přiváděno externí napětí. Lorentzova síla pak urychluje vodivé médium. MHD čerpadla mohou spolehlivě pracovat s materiály za vysokých teplot (typicky tekuté kovy), nebo s látkami, které mají vysoké korozivní účinky (např. mořská voda). Jsou využívány v hutnictví, chemickém průmyslu či v jaderné energetice. MHD pohon je také zvažován v lodní dopravě, ponorkách nebo vesmírných lodích [27, 29].

V principu funguje MHD generátor stejně jako MHD čerpadlo, ale v inverzním režimu. Je to analogické k provozování elektromotoru v generátorickém módu. Je možné používat vodní čerpadla ve zpětném turbínovém chodu, a proto v první etapě experimentů budou na navrhované experimentální smyčce použity hned dvě stejná MHD čerpadla. Jedno bude fungovat jako čerpadlo a druhé bude zapojeno jako generátor. Tak lze jednoduše zjistit účinnost generace elektřiny pomocí poměru napětí přiváděného na čerpadlo a napětí indukovaného na generátoru. Podobné jednoduché smyčky s MHD generátory byly vytvořeny na VUT (obr 2.2) a JFI, ale ty nepracují s tekutými kovy a nevyužívají MHD čerpání. Použití Galinstanu by mělo přinést slibnější výsledky oproti experimentům s vodivými roztoky solí a kyselin [28, 29].

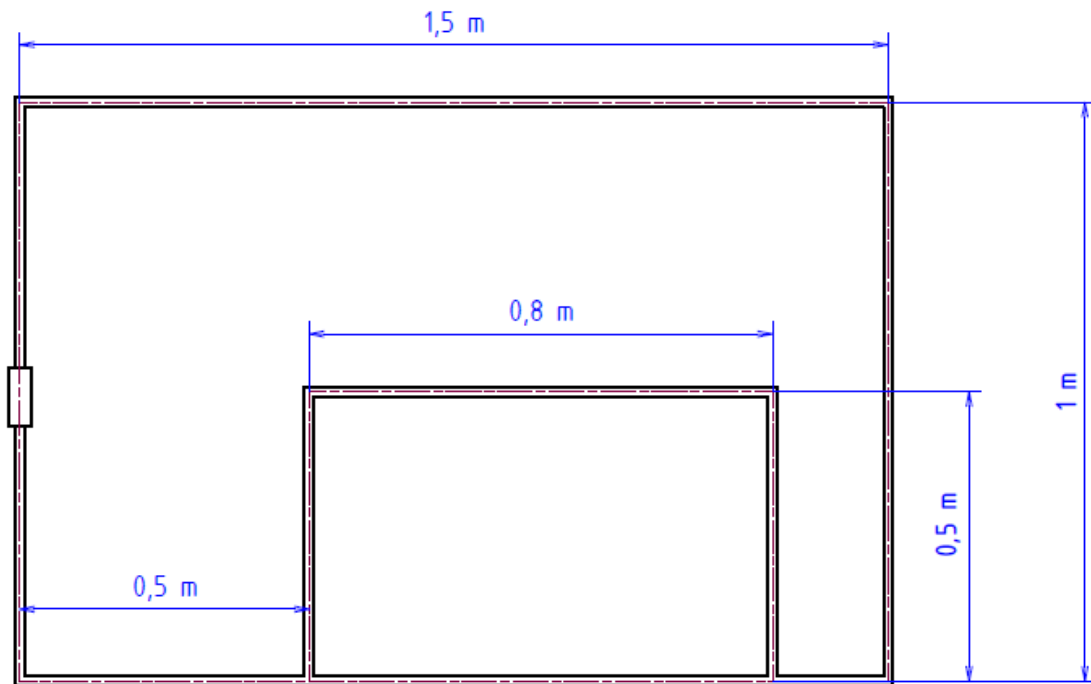


Obrázek 2.2 MHD generátor, VUT v Brně [27].

### 2.2.1 Parametry smyčky

V počáteční fázi návrhu smyčky je nutné stanovit její základní parametry. Těmi jsou rozměry, celkový objem, velikost zásobníku, hmotnost, provozní tlak, teplotní rozsah a rozsah rychlostí proudění. Shrnuty jsou v tab. 2. Smyčka by měla být co nejjednodušší, aby ji bylo možné co nejsnadněji a nejlevněji vyrobit. Zároveň však musí být rozumně dimenzována, aby experimenty měly šanci přinášet znatelné výsledky. Uváděné návrhové rozměry a parametry jsou prvotním odhadem a konečné řešení se může lišit.

Návrhové rozměry smyčky jsou popsány na následujícím schématu (obr. 2.3). Celkově bude smyčka zabírat plochu přibližně 1,5 x 1 m. Umístěna bude horizontálně, aby nedocházelo k snižování výkonu čerpadla vlivem gravitace. Uvažovaný výpočtový vnitřní průměr použitého potrubí je 16 mm.



Obrázek 2.3 Hlavní rozměry potrubí.

Objem potrubí je cca 1,35 l. Pro jednoduchost nejsou uvažovány možné rozdílné průměry v místech ventilů, čerpadel, měřidel a spojovacích součástí. V této fázi návrhu je nejdůležitější určit přibližné množství použitého média a podrobnosti budou doplněny až později při samotném realizování smyčky. Zásobník bude mít objem 0,2 l. Přibližný celkový objem se rovná 1,55 l a bude zaplněn 1,45 l Galinstanu.

Samotné potrubí, spojovací a tvarové prvky a zásobník mají hmotnost maximálně 2 kg. Měřidla a ventily přidávají přibližně 4 kg. Na celkovou hmotnost mají ale největší vliv čerpadla a Galinstan. Oběhové čerpadlo váží přes 30 kg (viz tab. 3), MHD čerpadlo kupované bude mít nejméně 80 kg (viz tab. 4) a ve smyčce budou zapojena dvě. Při hustotě Galinstanu  $6440 \text{ kg/m}^3$  a objemu  $0,00145 \text{ m}^3$  bude jeho hmotnost 9,5 kg. Přibližně bude celá smyčka vážit 210 kg.

Experimentální smyčka bude provozována za atmosférického tlaku (normální atmosférický tlak je 101,325 kPa) a pokojových teplot (18 až 25 °C).

Průtok a rychlost proudění je stanovena na základě použitého čerpadla. Je vhodné mít k dispozici širokou škálu rychlostí, aby bylo možné pozorovat vliv změny rychlosti v MHD generátoru. Proto bude zvoleno silné oběhové čerpadlo s regulovatelným průtokem, které zajistí rozsah rychlostí proudění přibližně

0 až 10 m/s. Katalogová hodnota průtoku vody je přepočtena na průtok a rychlost proudění Galinstanu následovně:

$$Q_{voda} \cdot \rho_{voda} = \dot{m}_{voda} \quad \frac{\dot{m}_{voda}}{\rho_{GalnSn}} = Q_{GalnSn} \quad \frac{Q_{GalnSn}}{\pi \cdot r^2} = v_{GalnSn}$$

Při objemovém průtoku vody 50 m<sup>3</sup>/h je potom objemový průtok Galinstanu 7,75 m<sup>3</sup>/h a střední rychlost proudění 10,7 m/s.

Tabulka 2 Parametry smyčky

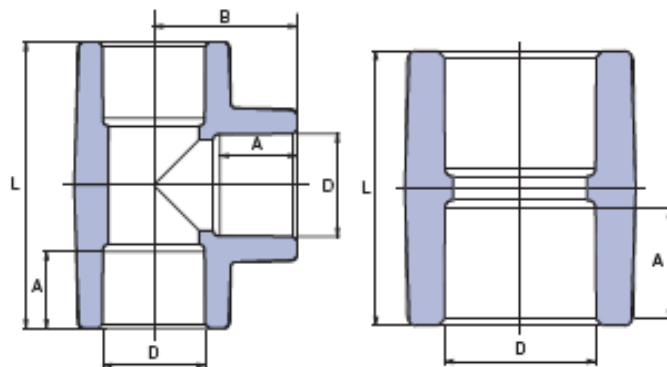
Hmotnost [kg]	Objem [l]	Tlak [MPa]	Teplota [°C]	Rychlost proudění [m/s]	Průtok [m <sup>3</sup> /h]
~210	~ 1,55	0,1	18 ... 25	0 ... ~ 10	0 ... ~ 7,5

## 2.2.2 Komerčně dostupné komponenty

Smyčka se složí z běžně dostupného vodovodního polypropylenového potrubí o vnitřním průměru cca 16 mm. Může být použito např. potrubí s označením S5 (PN10) 20 x 2,2 mm, tzn 20 mm vnější průměr, 2,2 mm tloušťka stěny, max. tlak 10 barů. PPR potrubí je možné jednoduše a rychle svařovat polyfúzním způsobem. Celková délka přímých částí je 6,8 m. Pro nasměrování potrubí budou použity 90° kolena a tvarovky typu T. Pomocí redukcí je potrubí spojeno se zásobníkem. Jako zásobník se použije tvarovka T a nátrubek o větších rozměrech, než je základní průměr potrubí (viz tab. 3 a obr. 2.4). Kolmicí „téčka“ s nátrubkem se nalije Galinstan a otvor se poté uzavře záslepkou. Zásobník bude z počátku sloužit hlavně k nalití média do smyčky. Galinstan bude proudit za pokojových teplot a neočekávají se znatelné teplotní výkyvy, proto není nutný prostor pro případnou tepelnou expanzi. Zásobník je případně možné rozšířit.

Tabulka 3 Rozměry tvarovky T a nátrubku pro zásobník [30, 31].

	A [mm]	B [mm]	D [mm]	L [mm]
Tvar T	20,5	38,5	40	86,2
Nátrubek	20,5	-	40	48



Obrázek 2.4 Rozměry tvarovky T a nátrubku pro zásobník [30, 31].

Kulové ventily oddělují úseky s čerpadly a experimentálním kanálem. Galinstan má značné korozivní účinky vůči mědi a jejím slitinám, proto není vhodné použití mosazných ventilů. Nainstalovány budou ventily z korozivzdorné oceli, nebo s korozivzdornou povrchovou úpravou (pochromované). Spojení trubek a ventilů je vyřešeno přechodkami se závity a přechodkami s převlečenými maticemi. Převlečené matice jsou nutné pro snadnou demontáž. Pomocí redukcí a převlečených matic budou spojeny s potrubím také čerpadla.

Aby bylo možné docílit zadaného rozpětí rychlostí musí být použito dostatečně silné čerpadlo. Podle předchozího přepočtu musí být průtok čerpadla přibližně 50 m<sup>3</sup>/h, aby bylo dosaženo průtokové rychlosti 10 m/s. Průtok by měl být také regulovatelný. Tělo čerpadla by nemělo být z bronzu (nebo z jiných slitin mědi). Tři použitelná čerpadla a jejich parametry jsou uvedeny v tab. 4. Všechna jsou to mokroběžná oběhová čerpadla se synchronním motorem s jednofázovým napájením. Tělesa čerpadel jsou vyrobena z litiny.



Tabulka 4 Porovnání vhodných oběhových čerpadel [32–34].

	Wilo Yonos MAXO 80/0,5-12 PN 6	Grundfos MAGNA3 80-80 F PN 6	DAB PUMPS EVOPLUS B 60/450.100
Max. průtok [m <sup>3</sup> /h]	56	50	54
Rozsah teplot médiu [°C]	– 20 ... 110	– 10 ... 110	– 10 ... 110
Max. tlak (PN bar)	PN 6	PN 6	PN 6
Stavební délka [mm]	360	360	450
Max. dopravní výška [m]	12	8	6
Připojení potrubí (DN mm)	DN 80	DN 80	DN 80
Hmotnost [kg]	33,90	31,91	37,50
Max. příkon [W]	1550	721	760
Napájení	230 V AC	230 V AC	230 V AC

MHD čerpadla nejsou běžně komerčně dostupná. Německá firma SAAS GmbH vyrábí zakázková čerpadla pro tekuté kovy v široké škále výkonů a velikostí. Čerpadla jsou nabízena ve dvou konfiguracích, disková a válcová. V tab. 5 jsou uvedeny některé z nabízených parametrů. Udávané vyhovující kovy jsou Pb, PbLi, PbBi, Na, Li, GaInSn, Hg, kovy s elektrickou vodivostí mezi  $10^5$  až  $10^7$  S/m. Čerpadla jsou vhodná pro testovací smyčky s tekutými kovy, metalurgický průmysl nebo pro technologie solárních panelů (čerpání média slunečních kolektorů) [35]. Ve smyčce budou zapojeny dvě shodná MHD čerpadla, jedno jako hnací v boční větvi smyčky a druhé jako generátor na místě experimentálního kanálu. Alternativní možností je vyrobit si vlastní MHD čerpadlo. Nejjednodušší MHD pohon lze sestavit na základě Faradayova generátoru s průběžnými elektrodami. Do kanálu by byly zavedeny elektrody, na které se přivádí externí napětí. Celý kanál musí být v prostředí magnetického pole. Toho lze docílit použitím permanentních magnetů obemykajících kanál (viz obr. 2.2), nebo navinutím vodiče do cívky kolem kanálu. Tento problém bude řešen až v pozdějších fázích návrhu.

Tabulka 5 Některé parametry MHD čerpadel od SAAS GmbH [35].

Napájení	Příkon [kW]	Hmotnost [kg]	Průměr připojeného potrubí [mm]	Teplota média [°C]
400 ... 480 V AC	3 ... 120	80 ... 1600	16 ... 120	< 550

Pro měření teploty bude použit odporový snímač teploty Pt100. Ocelová jímka se umístí do tvarovky T s koncovkou se závitem. Parametry snímače THST nabízeného firmou THERMIS jsou uvedeny v následující tab. 6. Snímač teploty bude umístěn v blízkosti experimentálního kanálu.

Tabulka 6 Parametry snímače teploty THST [36].

Technické parametry			
Médium	plyn nebo kapalina vhodná pro styk s nerez. ocelí	Skladovací teplota	-40+80°C
Rozsah	-50 až 500°C dle konkrétního senzoru	Rozsah pracovní teploty	-30+80°C individuální
Zapojení	2W, 3W, 4W	Materiál	AISI304, AISI316TI, PTFE fólie
Ponorná délka	60, 90, 100, 160, 250	Čas teplotní odezvy	bez jímky-vzduch 45s, voda 8s s jímkou - voda 35s
Nástavce	0, 30, 100mm	Krytí	IP 65
Procesní připojení	G1/4, G1/2, G3/4, M12x1,5, M20x1,5, M27x2, NPT, individuální	Max. přetlak	bez jímky - 10MPa/100°C, 3,1MPa/300°C
Konektor	DIN 43650, Mini, Mikro, M14x1	Přesnost	B dle ČSN EN 60751
Typ senzoru	Pt100, Pt500, Pt1000, Ni1000, KTY, NR	Časová stabilita	0,05% (10 000hod)

V rámci experimentu mohou být nainstalovány dva různé průtokoměry, aby bylo možné porovnávat různé měřící principy při měření průtoku tekutého kovu. Jeden průtokoměr bude mechanický (např. turbínový) a druhý využívající princip bez mechanických součástí v toku média (indukční nebo ultrazvukový). Není zřejmé, jak se budou různé průtokoměry v prostředí Galinstanu chovat, proto bude prvním krokem zjišťování jejich kompatibility s tímto médiem. Umístěny budou před a za experimentálním kanálem, aby bylo možné zjistit vliv magnetického pole v generátoru na průtok Galinstanu. V tab. 7 je srovnání tří možných průtokoměrů distribuovaných firmou THERMIS.

Tabulka 7 Srovnání parametrů tří různých průtokoměrů [37–39].

	HD005	MAG-VIEW MVM-250-QA	F3
Typ průtokoměru	turbínový	indukční	ultrazvukový
Max. průtok [m <sup>3</sup> /h]	15	10	9
Připojení	DN 25	DN 25 závit G1 1/4"	DN 25
Rozsah teplot média [°C]	-20 ... 120	-10 ... 60	0 ... 60
Třída přesnosti	1 %	1 %	2 %

## Závěr

V bakalářské práci jsou shrnuty základní principy jaderné fúze a nastíněn současný stav jejího výzkumu a realizace jako budoucího energetického zdroje. Nejpokročilejším řešením je magnetické udržení a reaktorová konfigurace tokamak. Ve vakuové komoře tokamaku probíhá fúze vodíkových jader za teplot stovek milionů °C. Tyto podmínky představují velmi náročnou technologickou výzvu. Vědci ve výzkumných reaktorech dnes již velmi dobře vědí, jak fúze dosáhnout a co je nutné k tomu, aby jejím použitím mohli produkovat energii. Výzkum je omezován, mimo jiné, dostupnými materiály a technologiemi přeměny energie. Je velmi obtížně udržovat plazma v tokamaku po delší dobu, protože používané materiály jsou vystavovány takovým teplotám, při kterých dochází k jejich rychlému poškození, či dokonce až k okamžitému vypaření. To se týká částí reaktoru přímo vystavených plazmatu. Z těchto komponent jsou nejzatěžovanější divertorové terče, plochy typicky na dně vakuové komory určené k přímému kontaktu s plazmatem a jeho tvarování. Terče musí být schopné vydržet tepelné toky až stovky MW/m<sup>2</sup>. Nejmodernějším řešením je použití wolframových monobloků, ale slibnou alternativou by mohly být tekuté kovy, zejména slitiny lithia a cínu. Tekutý kov se při největších tepelných zátěžích odpaří a ochrání konstrukci reaktoru.

V této práci je představen prvotní návrh testovací smyčky, na které by se mohly pozorovat MHD jevy. Generace elektrické energie magnetohydrodynamickým způsobem by se v budoucnu mohla používat ve fúzních elektrárnách. Vodivým médiem ve smyčce bude tekutý kov, slitina Galinstan, která je tekutá za pokojové teploty a je bezpečné s ní pracovat. Smyčka se bude skládat z plastového potrubí, čerpadel, zásobníku a měřidel a bude nadále rozpracována a doufejme také realizována v navazujících studiích. Mým cílem bylo zejména zevrubně seznámit sám sebe, autora, s problematikou jaderné fúze a dalších témat s ní spojených a připravit si základ pro budoucí studium.

*„Termonukleární energie bude připravena, jakmile ji společnost bude potřebovat“* [3] napsal L. A. Arcimovič, jeden z předních sovětských vědců pracujících na výzkumu termojaderné fúze. Ta doba se nejspíše rychle blíží a je na čase si uvědomit potřebu takového zdroje energie a provést dlouho očekávané „spoutání slunce do krabičky“.

# Seznam literatury

- [1] ITER ORGANIZATION. *What is ITER?* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <http://www.iter.org/proj/inafewlines>
- [2] ENTLER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ, a AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY. KANCELÁŘ. *Sputání slunce*. 2016. ISBN 978-80-270-0252-8.
- [3] MCCRACKEN, Garry M., Peter E. STOTT, Milan ŘÍPA a Jan MLYNÁŘ. *Fúze: energie vesmíru* [online]. 2., rozšířené vydání. Praha: Academia, 2019. [vid. 2022-03-23]. ISBN 8020029869. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/QSjmkzhW>
- [4] ENTLER, Slavomír, Ondřej. FICKER, Josef. HAVLÍČEK, Jan. HORÁČEK, Martin. HRON, Jan MLYNÁŘ, Radomír. PÁNEK, Milan ŘÍPA, Jan. STÖCKEL, Jozef. VARJU, Vladimír WEINZETTL, a AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY. KANCELÁŘ. *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*. ISBN 978-80-200-3007-8.
- [5] NOBEL PRIZE OUTREACH AB. The Nobel Prize in Chemistry 1922. *NobelPrize.org* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1922/aston/biographical/>
- [6] ŘÍPA, Milan, ÚSTAV FYZIKY PLAZMATU (AKADEMIE VĚD ČR), a ELEKTRÁRENSKÁ SPOLEČNOST ČEZ. *Řízená termojaderná fúze pro každého* [online]. 3. přeprac. vyd. Praha: Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky, 2011. [vid. 2022-03-23]. ISBN 9788090272477. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/dfQFWYkj>
- [7] ENTLER, Slavomír. *Elektřina z fúze (II) – fyzikální základy*. *TZB-info* [online]. 17. červen 2013. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/10045-elektřina-z-fuze-ii-fyzikalni-zaklady>
- [8] MLYNÁŘ, Jan. *Rozhledy matematicko-fyzikální*. 2010. [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/146559>
- [9] EUROFUSION. *Would a sustainable Deuterium-Deuterium (D-D) fusion reaction require much more energy compared to Deuterium-Tritium (D-T) fusion?* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.euro-fusion.org/faq/top-twenty-faq/would-a-sustainable-deuterium-deuterium-d-d-fusion-reaction-require-much-more-energy-compared-to-deuterium-tritium-d-t-fusion/>
- [10] EUROFUSION. *How long is the longest sustained fusion reaction achieved by JET and elsewhere?* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.euro-fusion.org/faq/top-twenty-faq/how-long-is-the-longest-sustained-fusion-reaction-achieved-by-jet-and-elsewhere/>
- [11] National Ignition Facility heralds „significant step” towards fusion break-even target. *Physics World* [online]. 18. srpen 2021 [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://physicsworld.com/national-ignition-facility-heralds-significant-step-towards-fusion-break-even-target/>
- [12] HARMS, A. A. *Principles of fusion energy: an introduction to fusion energy for students of science and engineering* [online]. Singapore: World Scientific, 2000. [vid. 2022-03-23]. ISBN 9789810243357. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/kCNL7jLl>
- [13] ENTLER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ a Václav DOSTÁL. *Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů*. *TZB-info* [online]. 8. srpen 2016. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>

- [14] EUROFUSION. *European researchers achieve fusion energy record* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.euro-fusion.org/news/2022/european-researchers-achieve-fusion-energy-record/>
- [15] ENTLER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ a Václav DOSTÁL. *Základy fúzní energetiky III. – Reaktorové technologie. TZB-info* [online]. 22. srpen 2016. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14587-zaklady-fuzni-energetiky-iii-reaktorove-technologie>
- [16] MITTEAU, R., B. CALCAGNO, P. CHAPPUIS, R. EATON, S. GICQUEL, J. CHEN, A. LABUSOV, A. MARTIN, M. MEROLA, R. RAFFRAY, M. ULRICKSON a F. ZACCHIA. *The design of the ITER first wall panels. Proceedings of the 27th Symposium On Fusion Technology (SOFT-27); Liège, Belgium, September 24-28, 2012* [online]. 2013, **88**(6), 568–570. [vid. 2022-03-23]. ISSN 0920-3796. Dostupné z: [doi:10.1016/j.fusengdes.2013.05.030](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.030)
- [17] ITER ORGANIZATION. *The divertor*. [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <http://www.iter.org/mach/divertor>
- [18] HORACEK, J., J. CECRDLE, D. TSKHAKAYA, R. DEJARNAC, J. SCHWARTZ, M. KOMM, J. CAVALIER, J. ADAMEK, S. LUKES, V. VESELOVSKY, J. VARJU, P. BARTON, S. ENTLER, Y. GASPARYAN, E. GAUTHIER, J. GERARDIN, J. HROMADKA, M. HRON, M. IAFRATI, M. IMRISEK, M. JERAB, K. KOVARIK, G. MAZZITELLI, D. NAYDENKOVA, G. VAN OOST, R. PANEK, A. PRISHVITSIN, J. SEIDL, D. SESTAK, M. TOMES, Y. VASINA, A. VERTKOV, P. VONDRACEK a V. WEINZETTL. *Predictive modelling of liquid metal divertor: From COMPASS tokamak towards Upgrade. Physica Scripta* [online]. 2021, **96**(12). [vid. 2022-03-23]. ISSN 14024896. Dostupné z: [doi:10.1088/1402-4896/ac1dc9](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac1dc9)
- [19] HORACEK, J., S. ENTLER, P. VONDRACEK, J. ADAMEK, D. SESTAK, M. HRON, R. PANEK, R. DEJARNAC, V. WEINZETTL, K. KOVARIK a G. VAN OOST. *Plans for Liquid Metal Divertor in Tokamak Compass. Plasma Physics Reports* [online]. 2018, **44**(7), 652–656. [vid. 2022-03-23]. ISSN 1063-780X. Dostupné z: [doi:10.1134/S1063780X18070024](https://doi.org/10.1134/S1063780X18070024)
- [20] DEJARNAC, R., J. HORACEK, M. HRON, M. JERAB, J. ADAMEK, S. ATIKUKKE, P. BARTON, J. CAVALIER, J. CECRDLE, M. DIMITROVA, E. GAUTHIER, M. IAFRATI, M. IMRISEK, A. MARIN ROLDAN, G. MAZZITELLI, D. NAYDENKOVA, A. PRISHVITCYN, M. TOMES, D. TSKHAKAYA, G. VAN OOST, J. VARJU, P. VEIS, A. VERTKOV, P. VONDRACEK a V. WEINZETTL. *Overview of power exhaust experiments in the COMPASS divertor with liquid metals. Nuclear Materials and Energy* [online]. 2020, **25**, 100801 [vid. 2022-05-09]. ISSN 23521791. Dostupné z: [doi:10.1016/j.nme.2020.100801](https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100801)
- [21] CHENG, Shi a Zhigang WU. *Microfluidic electronics. Lab on a Chip* [online]. 2012, **12**(16), 2782 [vid. 2022-05-07]. ISSN 1473-0197, 1473-0189. Dostupné z: [doi:10.1039/c2lc21176a](https://doi.org/10.1039/c2lc21176a)
- [22] LIU, Tingyi, Prosenjit SEN a Chang-Jin KIM. *Characterization of Nontoxic Liquid-Metal Alloy Galinstan for Applications in Microdevices. Journal of Microelectromechanical Systems* [online]. 2012, **21**(2), 443–450 [vid. 2022-05-07]. ISSN 1057-7157, 1941-0158. Dostupné z: [doi:10.1109/JMEMS.2011.2174421](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2011.2174421)
- [23] GEDDIS, Philip, Lijun WU, Andrew MCDONALD, Steven CHEN a Bruce CLEMENTS. *Effect of static liquid Galinstan on common metals and non-metals at temperatures up to 200 °C. Canadian Journal of Chemistry* [online]. 2020, **98**(12), 787–798 [vid. 2022-05-07]. ISSN 0008-4042, 1480-3291. Dostupné z: [doi:10.1139/cjc-2020-0227](https://doi.org/10.1139/cjc-2020-0227)

- [24] LIU, Shiqian, Keith SWEATMAN, Stuart MCDONALD a Kazuhiro NOGITA. Ga-Based Alloys in Microelectronic Interconnects: A Review. *Materials* [online]. 2018, **11**(8), 1384 [vid. 2022-05-07]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11081384
- [25] CADWALLADER, Lee C. *Gallium Safety in the Laboratory* [online]. 2003. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/811932-gallium-safety-laboratory>
- [26] BEDNÁŘ, V a J ŠLEIS. *Magnetohydrodynamický generátor* [online]. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2009-2010/Leto10/proc/mhd.pdf>
- [27] HANŽL, Ondřej. *Laboratorní model magnetohydrodynamického generátoru*. [online]. 2017. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_veřejne.php?file\\_id=151927](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=151927)
- [28] *Magnetohydrodynamics - Propelling Liquid Metal with Magnets! - YouTube* [online]. [vid. 2022-05-07]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=LS3GQk9ETRU&ab\\_channel=TechIngredients](https://www.youtube.com/watch?v=LS3GQk9ETRU&ab_channel=TechIngredients)
- [29] AL-HABAHBEH, O.M., M. AL-SAQQA, M. SAFI a T. ABO KHATER. Review of magnetohydrodynamic pump applications. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2016, **55**(2), 1347–1358 [vid. 2022-05-07]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2016.03.001
- [30] *T - KUS JEDNOZNAČNÝ - Wavin Ekoplastik* [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.wavinekoplastik.com/cz/t-kus-jednoznacny>
- [31] *NÁTRUBEK - Wavin Ekoplastik* [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.wavinekoplastik.com/cz/natrubek>
- [32] Yonos MAXO 80/0,5-12 PN 6. <https://wilo.com> [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://wilo.com/cz/cs/Produkty-a-aplikace/cs/vyrobky-a-expertiza/roddin-domky-a-dvojdomy/topeni/topeni/wilo-yonos-maxo/yonos-maxo-80-0-5-12-pn-6>
- [33] Bola. *Bola* [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.bola.cz/elektronicke-obehove-cerpadlo-grundfos-magna3-80-80-f-pn-6>
- [34] EVOPLUS B 60/450.100. [remont-cerpadla.cz](http://remont-cerpadla.cz) [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://obchod.remont-cerpadla.cz/cerpadla-obehova/teplvodni-cerpadla/evoplus-b-60-450-100>
- [35] *Pumps* [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://saasonline.de/en/pumps/>
- [36] *Snímač teploty THST | Thermis, spol. s r.o.* [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.thermis.cz/produkt/427-snimac-teploty-thst/>
- [37] *Průtokoměr HD005 | Thermis, spol. s r.o.* [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.thermis.cz/produkt/424-prutokomer-hd005/>
- [38] *Průtokoměr elektromagnetický | Thermis, spol. s r.o.* [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.thermis.cz/produkt/422-prutokomer-elektromagneticky/>
- [39] *Průtokoměr ultrazvukový | Thermis, spol. s r.o.* [online]. [vid. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.thermis.cz/produkt/453-prutokomer-ultrazvukovy/>