

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Diplomová práce

Termohydraulický model smyčky S-ALLEGRO

Bc. Tomáš Křivský



2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Křivský** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **456370**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Termohydraulický model smyčky S-ALLEGRO

Název diplomové práce anglicky:

Thermohydraulic model of S-ALLEGRO loop

Pokyny pro vypracování:

- 1) Provedte rešerši dané problematiky.
 - 2) Provedte analýzu daného problému a popište možné přístupy k řešení.
 - 3) Vytvořte výpočtový model hydraulické smyčky S-ALLEGRO.
 - 4) Provedte počítačové simulace s vytvořeným modelem a porovnejte výsledky s dostupnými experimentálními daty.
 - 5) Shrňte výsledky práce a navrhněte případná vylepšení nebo doporučení v této oblasti.
- Konzultant: Ing. Tomáš Melichar, Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Karel Petera, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

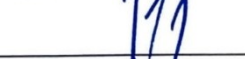
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2020**


doc. Ing. Karel Petera, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29.06.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou závěrečnou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací (Kuba 2019).

V Praze dne

.....

Bc. Tomáš Křivský

Poděkování

Nejprve bych rád poděkoval společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. za poskytnutí zázemí a umožnění participace na výzkumných projektech již během magisterského studia. Poděkování patří zejména mému konzultantovi Ing. Tomáši Melicharovi za jeho čas, cenné rady k dané tématice a velmi vstřícný přístup po dobu naší spolupráce.

Dále bych chtěl touto cestou poděkovat panu doc. Ing. Karlu Peterovi, Ph.D. za podnětné připomínky a formální vedení závěrečné práce na Ústavu procesní a zpracovatelské techniky na ČVUT Fakultě strojní.

Závěrem bych rád vyjádřil svou vděčnost i rodině za poskytnutí podpory a zázemí po celou dobu mého studia.

Tato práce vznikla za finanční podpory z projektu “TK01030116 Návrh konceptu bezpečnostně důležitých prvků rychlého heliem chlazeného demonstračního reaktoru ALLEGRO”, který je spolufinancován státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu THÉTA.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Tomáš Křivský
Název:	Termohydraulický model smyčky S-ALLEGRO
Anglický název:	Thermohydraulic model of S-ALLEGRO loop
Akademický rok:	2019/2020
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní technika
Vedoucí:	doc. Ing. Karel Petera, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Tomáš Melichar
Zadavatel:	Centrum výzkumu Řež s.r.o.
Bibliografické údaje:	počet stran: 90 počet obrázků: 60 počet tabulek: 38 počet rovnic: 36 počet příloh: 1 × CD
Klíčová slova:	termohydraulické modelování, Dymola, ClaRa, jaderné reaktory IV. generace, experimentální smyčka S-ALLEGRO
Keywords:	thermohydraulic modeling, Dymola, ClaRa, generation IV nuclear reactors, S-ALLEGRO experimental loop
Anotace:	Diplomová práce se zabývá rešerší reaktorů IV. generace se zaměřením na GFR. Dále se věnuje termohydraulickému modelování experimentálního zařízení S-ALLEGRO v software Dymola. Výsledky výpočetních modelů jsou porovnávány s experimentálními daty a návrhovými výpočty.
Annotation:	The diploma thesis investigates the generation IV nuclear reactors with a focus on the GFR. Moreover it deals with thermohydraulic modeling of the S-ALLEGRO experimental loop in Dymola software. The results of computational models are compared with experimental data and design calculations.

Úvod do problematiky	8
1 Přehled systémů IV. generace.....	11
1.1 GFR (Rychlé reaktory chlazené plynem)	12
1.2 LFR (Olovem chlazené rychlé reaktory)	13
1.3 MSR (Reaktory využívající roztavené soli).....	14
1.4 SCWR (Reaktory využívající vodu v superkritické fázi)	15
1.5 SFR (Sodíkem chlazené rychlé reaktory)	16
1.6 VHTR (Vysokoteplotní reaktory).....	17
2 Heliové smyčky v provozu.....	19
2.1 HELOKA (Helium Loop Karlsruhe)	20
2.2 HELP (Helium Experimental Loop).....	21
2.3 HTHL (High-Temperature Helium Loop)	22
2.4 HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor)	24
2.5 S-ALLEGRO	25
2.6 STU-Helium Loop	27
3 Vývoj konceptu ALLEGRO	28
4 Popis zařízení S-ALLEGRO	29
4.1 Reaktor.....	30
4.1.1 Reaktorová nádoba	31
4.1.2 Elektricky vyhřívaná topná zóna	32
4.2 Koaxiální potrubí	35
4.3 Primární výměník tepla.....	38
4.4 Sekundární výměník tepla	41
4.5 DHR.....	43
4.5.1 Výměník DHR	44
4.6 Kompresory	46
4.6.1 Turbokompresor S-ALLEGRO	46
4.6.2 Turbokompresor DHR	48
4.7 Ventily	50
4.8 Izolace smyčky S-ALLEGRO	51
5 Software Dymola.....	52
6 Přehled používaných komponent	54
6.1 Externí definice parametrů.....	55
6.2 Objemové komponenty	56
6.2.1 PipeFlowVLE_L4_Simple.....	56
6.2.2 ShellFlowVLE_L4.....	59
6.2.3 CylindricalThinWall_L4.....	59
6.3 Kompresory	60
6.3.1 PumpVLE_L1_affinity	60
6.3.2 Compressor_CVR.....	61

6.4	Okrajové podmínky systému	62
6.4.1	BoundaryVLE_pTxi	62
6.4.2	BoundaryVLE_Txim_flow	62
6.4.3	PrescribedHeatFlow	62
6.4.4	Convection	63
6.4.5	FixedTemperature	63
6.5	Ostatní komponenty	64
6.5.1	Constant	64
6.5.2	TimeTable	64
6.5.3	Speed.....	64
6.5.4	ThreeWayValveVLE_L1_simple	65
6.5.5	Quadruple.....	65
7	Termohydraulický model smyčky S-ALLEGRO	66
7.1	Stanovení obtoku elektricky vyhřívané zóny.....	67
7.2	Validace primárního a sekundárního výměníku tepla	69
7.3	Model primárního a sekundárního okruhu.....	75
7.3.1	Reaktor.....	75
7.3.2	Potrubí.....	76
7.3.3	Primární výměník tepla.....	76
7.3.4	Sekundární výměník tepla	76
7.3.5	Kompresory	76
8	Závěr	81
	Seznam použitých zkratk	82
	Seznam použitých veličin	85
	Reference	88

Úvod do problematiky

Světová populace neustále roste. Dle United Nations (2019) se od roku 1950 do roku 2019 více než ztrojnásobila (z 2,54 na 7,71 miliard obyvatel) a aktuální statistiky předpokládají, že do roku 2050 vzroste o dalších cca 25 % na 9,7 miliard obyvatel. Zároveň každý jedinec usiluje o zvýšení celkové životní úrovně, což sebou mj. přináší i narůstající poptávku po energii v různých formách, především pak po energii elektrické. Pouhé rozšíření stávajících zdrojů by však neumožňovalo udržitelný rozvoj lidstva (vyčerpání fosilních zdrojů paliv, navyšující se emise CO₂, stabilita elektrické rozvodové sítě atp.). Je tedy zapotřebí hledat nové, emisně čistší a bezpečné zdroje, které by efektivně pokryly vzrůstající energetické požadavky. Hlavním kritériem výběru nového řešení zdroje energie je, zejména pro vyspělé státy, minimalizace celkové produkce CO₂. Ze srovnání průměrných emisí současně využívaných zdrojů elektrické energie (viz tab. 1) vyplývá, že mezi potenciální nízkoemisní zdroje rozhodně patří i energie jaderná.

Tab. 1 Srovnání zdrojů elektrické energie s ohledem na emise CO₂ (Schlömer et al., 2014)

Zdroj elektrické energie	Průměrné emise CO ₂ životního cyklu zařízení (g kWh ⁻¹)
Uhlí	820
Plyn	490
Solární panely	48
Geotermální	38
Vodní	24
Jaderný	12
Větrný	12

První komerčně využívané jaderné elektrárny vznikaly již v 50. letech minulého století. Aktuálně je ve 30 zemích světa provozováno přes 440 energetických reaktorů, které produkují zhruba 10,5 % celosvětové produkce elektrické energie a více než 50 dalších zařízení je ve výstavbě. V roce 2017 byla jaderná energie druhým největším nízkouhlíkovým zdrojem (29 %) hned po vodních elektrárnách (46 %). Jaderná energie však nemá využití jen v energetické sféře. Ve více než 50 zemích je provozováno kolem 220 výzkumných reaktorů, které se kromě výzkumu samotného zaměřují i na produkci radiofarmak (léčiv obsahující radionuklidy), průmyslových izotopů nebo pro výcvik obsluhy zařízení. V provozování jaderných štěpných reaktorů má lidstvo relativně rozsáhlou praxi. Pokud vezmeme v potaz počet reaktorů a léta provozu, jedná se o zkušenost delší než 17 000 let. (World Nuclear Association, 2020)

V roce 2002 Mezinárodní fórum pro IV. generaci (GIF, 2019) zveřejnilo strategický plán pro udržitelný rozvoj jaderné energetiky, mezi jehož hlavní cíle patří následující faktory:

- Udržitelnost

Nízkoemisní zdroj energie s dlouhodobou dostupností a efektivním využíváním paliva. Minimalizace aktivity i objemu použitého jaderného paliva ze současných reaktorů, např. LWR. Možnost použití neobohaceného uranu, thoria, případně plutonia jako alternativního paliva.

- Ekonomika

Snížení doby i nákladů výstavby na úroveň srovnatelnou s jinými zdroji energie pomocí sériové výroby, za současného zvýšení účinnosti přeměny energie oproti současným jaderným štěpným reaktorům. Možnost jiného než energetického využití (např. výroba vodíku, odsolování mořské vody atp.).

- Bezpečnost a spolehlivost

Snížení pravděpodobnosti vzniku těžkých havárií, eliminace externího nouzového zásobování energií, naplnění kontejnmentu inertním plynem pro vyloučení vzniku požáru. Inherentní bezpečnost.

- Zamezení proliferace a zvýšení fyzické ochrany

Vzhledem k nižšímu obohacení je jaderné palivo méně atraktivním zdrojem pro jiné než energetické využití, fyzikální principy vylučují zneužití štěpného materiálu pro výrobu jaderných zbraní a zároveň poskytují zvýšenou fyzickou ochranu proti teroristickými činům.

GIF pro naplnění plánu vybral z celkových cca 130 konceptů pouhých 6 typů (viz tab. 2), které jsou předurčeny pro další VaV (výzkum a vývoj), což je časově velmi náročný, komplexní proces, který sebou přináší nutnost aplikace nových materiálů, technologických i konstrukčních postupů, bezpečnostních opatření a poznatků neutronové fyziky. Uplatní se zde tedy součinnost všech technických oborů. Vzhledem k aktuálnímu stavu vývoje se předpokládá zahájení provozu prvních pilotních jednotek v letech 2030 až 2040, komerční nasazení poté nejdříve až po roce 2050. Výjimku tvoří typ rychlého reaktoru chlazeného sodíkem (SFR), který se již v minulosti provozoval a dvě komerční zařízení jsou na území Ruské federace provozovány i dnes. (ČEZ, 2020)

Tab. 2 Přehled systémů IV. generace (GIF, 2019)

System	Neutronové spektrum	Chladicí médium	Výstupní teplota (°C)	Palivový cyklus	Elektrický výkon (MW _e)
GFR	rychlé	helium	850	uzavřený	1200
LFR	rychlé	olovo	480–570	uzavřený	20–180
					300–1 200
					600–1 000
MSR	termální/ rychlé	fluoridové soli	700–800	uzavřený	1 000
SCWR	termální/ rychlé	voda	510–625	uzavřený/ otevřený	300–700
					1 000–1 500
SFR	rychlé	sodík	500–550	uzavřený	50–150
					300–1 500
					600–1 500
VHTR	termální	helium	900–1 000	otevřený	250–300

Ke zdárnému dokončení fáze příprav pro případnou realizaci nové jednotky s jaderným palivem je mj. nutné ověřit správnost předpokládaného fyzikálního chování zařízení. Hlavně z důvodu bezpečnosti jsou tedy za tímto účelem stavěny experimentální neaktivní smyčky, které jsou ve výkonovém měřítku cílových konceptů a vykazují stejné fyzikální chování všech uvažovaných systémů. Provoz takových zařízení je ale poměrně nákladný a stejně jako u reálných energetických zařízení vyžaduje optimalizaci. Proto s narůstajícím rozvojem výpočetní techniky roste i poptávka po možnosti predikce chování pomocí matematicko-fyzikálního modelování. Tato práce se v rámci projektů TAČR TK01030116 (Návrh konceptu bezpečnostně důležitých prvků rychlého heliem chlazeného demonstračního reaktoru ALLEGRO, podpořený Technologickou agenturou ČR) a R4S (Výzkum pro udržitelnou energetiku) zabývá tvorbou termohydraulického modelu experimentálního zařízení pro vývoj konceptu GFR (rychlého reaktoru chlazeného plynem).

Tyto matematicko-fyzikální analýzy lze provádět pomocí různých nástrojů např. MATLAB, RELAP5-3D, CATHARE2, MELCOR 2.1 aj. Pro tvorbu modelu S-ALLEGRO byl vybrán nástroj Dymola (Dynamic Modeling Laboratory), který je vhodný pro dynamické analýzy různých komplexních fyzikálních systémů s podporou hierarchického uspořádání. Mezi hlavní výhody patří zejména možnost využití grafického zobrazení modelu a řešení systému v reálném čase. (Dassault Systèmes[®], 2020)

Cílem této závěrečné kvalifikační práce je základní obeznámení s problematikou aktuálně vznikající IV. generace systémů jaderných štěpných reaktorů s následným zaměřením na systémy typu GFR. Dále se orientuje na experimentální zařízení S-ALLEGRO, pro které dojde k vytvoření výpočetního termohydraulického modelu v software Dymola a následné validaci s naměřenými, případně návrhovými daty.

1 Přehled systémů IV. generace

Součástí kapitoly je základní popis jednotlivých systémů IV. generace, které byly v roce 2002 vybrány Mezinárodním fórem (GIF, 2019) pro další vývoj a výzkum v rámci udržitelného rozvoje jaderné energetiky. Níže jsou vysvětleny některé používané pojmy související s tematikou IV. generace.

- Otevřený vs uzavřený palivový cyklus

Palivový cyklus má celkem 3 fáze. Tzv. přední (těžba a výroba paliva), střední (využití paliva v aktivní zóně) a zadní část (nakládání s použitým palivem). Zadní část palivového cyklu se v současné době uvažuje otevřená (použité palivo se zaveze do hlubinného úložiště) nebo uzavřená (opětovné využití paliva). Většina států zatím volí vyčkávací strategii, jelikož přepracování paliva je výrazně dražší než využívání čerstvého. Zároveň použité palivo ze současných reaktorů obsahuje stále velké množství izotopů uranu, plutonia a aktinoidů, které lze dále štěpit rychlými neutrony, získávat tak energii a snižovat množství i poločas rozpadu radioaktivního odpadu. (Heraltová, nedatováno)

- Tepelné neutrony

Většina dnešních štěpných reaktorů využívá ke svému provozu tepelných neutronů, které vznikají moderováním rychlých neutronů uvolňujících se při štěpné reakci. Moderování je vlastně snižování energetické hladiny neutronu na $\sim 0,025$ eV, čímž se výrazně zvětšuje účinný průřez pro štěpení jádra zejména ^{235}U . To je důležitý předpoklad pro zachování kladné neutronové bilance, tedy udržení řetězové reakce. Zároveň se značně snižuje možnost zachycení neutronu jádrem ^{238}U , což také podporuje řetězovou reakci v kladném směru, protože se neutrony nespotebouvávají záchytem na jádra ^{238}U . Výsledkem moderování rychlých neutronů je možnost udržení štěpné řetězové reakce s použitím nízko obohaceného paliva (do 5 % obj. ^{235}U) při použití v LWR (Light Water Reactors), nebo dokonce s přírodním uranem za použití moderátoru v podobě těžké vody (D_2O) a grafitu, které mají menší účinné průřezy než lehká voda, používá se např. u reaktoru CANDU (Canada Deuterium-Uranium). Zvyšováním teploty jaderného paliva se zvyšuje absorpce tepelných neutronů jádrem ^{238}U , což vede k negativní zpětné vazbě, která napomáhá řízení reaktoru.

- Rychlé neutrony

Nemoderované neutrony dosahují energie 1 – 20 MeV. Díky vysoké rychlosti mají výrazně menší účinný průřez pro štěpení jádra ^{235}U . Pro udržení kladné neutronové bilance, respektive řetězové reakce, je tedy zapotřebí mnohem vyšší obohacení paliva (> 20 % obj. ^{235}U), případně použití ^{239}Pu , jehož štěpení produkuje více neutronů než ^{235}U . Nicméně, rychlé neutrony mají mnohem lepší účinné průřezy s dalšími nuklidy, čehož se využívá v tzv. množivé části zóny, která sestává např. z ^{238}U a ^{232}Th . Záchytem neutronů těmito izotopy vzniká nové štěpitelné palivo ^{239}Pu a ^{233}U . Mezi výhody používání rychlých neutronů patří tedy snižování množství i poločasu rozpadu radioaktivních látek v použitém palivu. Vzhledem k vyšším energetickým tokům dochází k celkově lepšímu využití paliva, zmenšení rozměrů aktivní zóny a nárůstu termodynamické účinnosti tepelného cyklu.

1.1 GFR (Rychlé reaktory chlazené plynem)

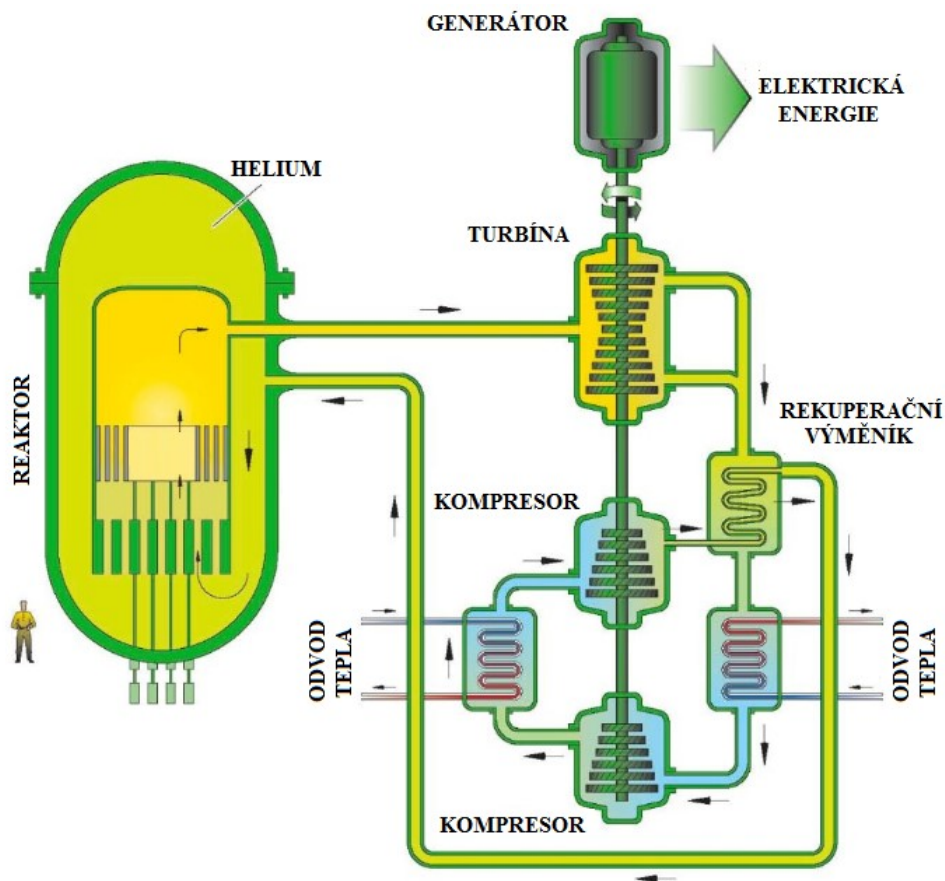
Koncept GFR je vysokoteplotní, vysokotlaký, plynem chlazený reaktor, který využívá rychlého spektra neutronů pro uzavření palivového cyklu. Primárním chladivem je zde helium. Mezi hlavní výhody použití tohoto plynu patří dle Stainsby et al. (2011) následující:

- Vysoká provozní teplota (jednofázové, nevroucí médium).
- Chemicky inertní, nekorozivní, netoxické.
- Neutronově transparentní (nepohlcuje ani nezpomaluje neutrony).
- Transparentní (usnadňuje kontrolu a manipulaci s palivem).

Nevýhody použití helia jsou poté dle Stainsby et al. (2011):

- Nutnost pracovat pod zvýšeným tlakem (cca 7 MPa(g)).
- Nízká účinnost chlazení, zejména při přirozené konvekci.
- Potřeba vyrovnávat ztráty chladiva kvůli samovolnému úniku.
- Relativně malé zásoby helia na Zemi.

Součástí primárního okruhu (viz obr. 1) se uvažuje plynová turbína pro výrobu elektrické energie. Zbytkové teplo z turbíny je poté odváděno do parogenerátorů, které vyrábějí páru pro další využití např. pro parní turbíny. (GIF, 2019)



Obr. 1 Rychlé reaktory chlazené plynem (Kamide a Pivet, 2019)

1.2 LFR (Olovem chlazené rychlé reaktory)

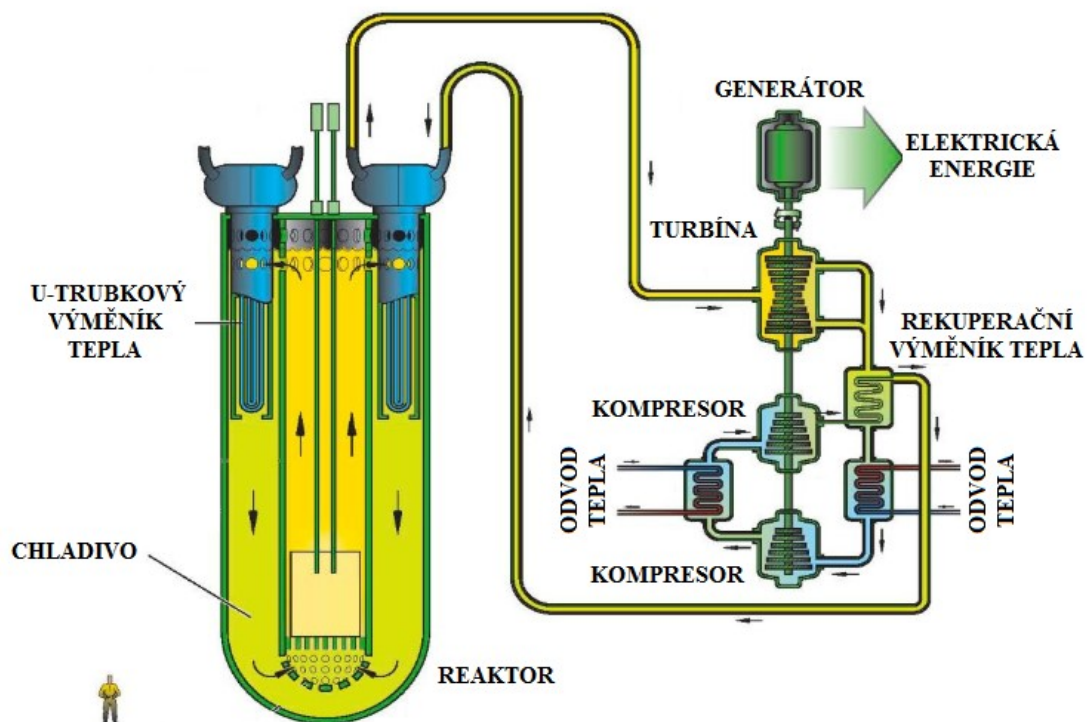
LFR se podobně jako GFR vyznačuje využitím rychlých neutronů za vysokoteplotního provozu s uzavřením palivového cyklu. Primárním chladivem je zde eutektikum roztaveného olova, případně roztavené směsi olova a bismutu, což konceptu LFR propůjčuje několik významných výhod z hlediska bezpečnosti provozu (GIF, 2019):

- Vysoká provozní teplota (až 570 °C, teplota varu olova 1 749 °C).
- Provoz za atmosférického tlaku (snížení pravděpodobnosti LOCA).
- Chemicky stálé vzhledem k vodě a vzduchu.
- Velmi nízká tendence absorbovat, či zpomalovat neutrony (možnost dosáhnout vysokých neutronových toků).
- Kapalina o vysoké hustotě (možnost chlazení přirozenou konvekci např. při SBO).
- V případě havárie zadržuje štěpné produkty ve své pevné fázi.
- Olovo je dostupným materiálem.

Nevýhody (GIF, 2019):

- Nutnost nahřátí systému nad teplotu tání chladiva (bod tání olova 327,5 °C).
- Netransparentní (problém při kontrole a výměně paliva).
- Vysoká hmotnost chladiva (vysoká hustota).
- Možnost koroze chladiva při kontaktu s konstrukčními materiály.

Tepelná energie je z primárního okruhu odváděna přes U-trubkové výměníky, které slouží zároveň jako parogenerátory, elektrická energie se poté vyrábí v sekundárním vodním okruhu pomocí parní turbíny (obr. 2). (GIF, 2019)



Obr. 2 Olovem chlazené rychlé reaktory (Kamide a Pivet, 2019)

1.3 MSR (Reaktory využívající roztavené soli)

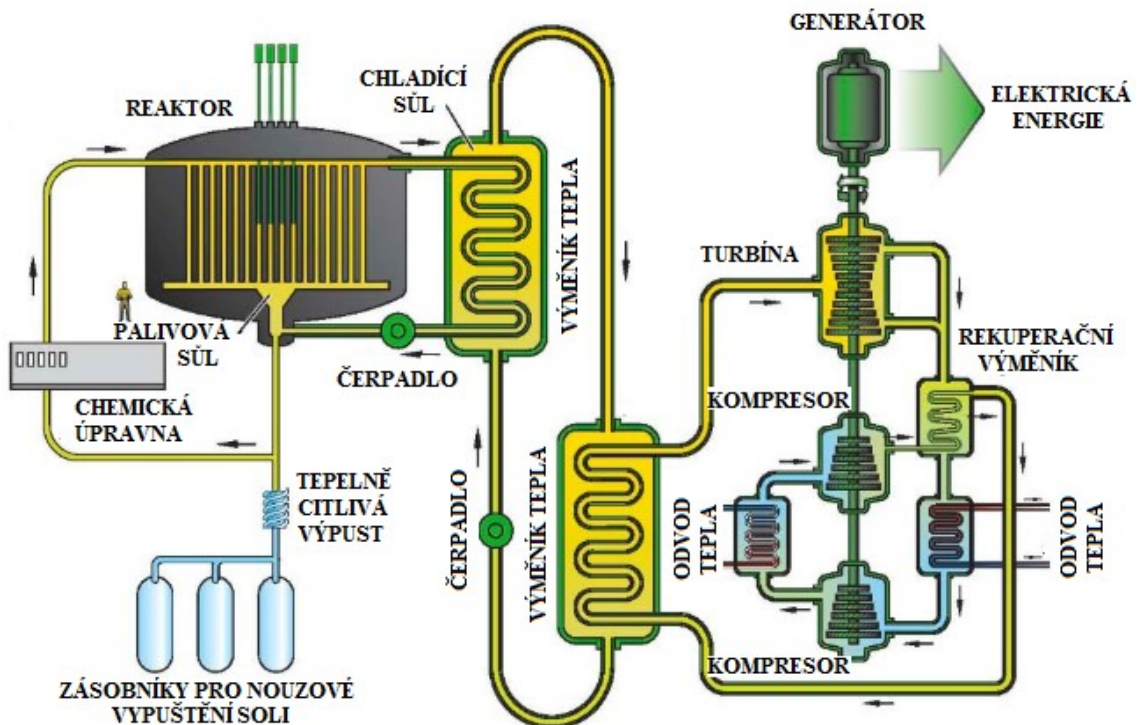
Specifikem MSR je rozpuštění jaderného paliva přímo v primárním chladivu, kterým jsou roztavené fluoridové soli. Palivo tedy nemá pevnou podobu jako je tomu nejen u zbylých zařízení IV. Generace, ale i u současných štěpných reaktorů. Tento koncept se vyvíjel již v 50. a 60. letech minulého století v USA a využíval termálních neutronů, což byl problém především z hlediska možného zneužití paliva pro válečné účely. Současný MSR se od původního konceptu odlišuje v absenci pevného moderátoru (obvykle grafitu). Využívá tedy rychlých neutronů, čímž systému umožňuje pracovat v uzavřeném palivovém cyklu. Aktuálně se uvažuje použití chladiva v podobě soli FLiBe, stechiometricky Li_2BeF_4 . Jedná se o směs fluoridu lithného (LiF) a fluoridu berylia (BeF_2) v poměru 2:1. Mezi nesporné výhody použití této soli patří zejména tyto vlastnosti (Serp et al., 2014) (GIF, 2019):

- Vysoká provozní teplota (až 800 °C, teplota varu FLiBe 1 430 °C).
- Provoz za atmosférického tlaku (snížení pravděpodobnosti LOCA).
- Téměř neutronově transparentní (velmi nízké účinné průřezy).
- Kontinuální provoz.
- Netřeba výroby palivových souborů.

Nevýhody FLiBe (Serp et al., 2014) (GIF, 2019):

- Silné oxidační činidlo (nutnost vývoje nových konstrukčních materiálů).
- Nutná chemická úprava a čištění soli (kontinuální odstraňování xenonu atp.).
- Nutnost nahlátí systému nad teplotu tání (bod tání FLiBe 459 °C).

V sekundárním okruhu koluje čistá roztavená sůl (bez paliva). Výroba elektrické energie poté probíhá až v terciárním vodním okruhu díky implementaci parní turbíny (obr. 3).



Obr. 3 Reaktory využívající roztavené soli (Kamide a Pivet, 2019)

1.4 SCWR (Reaktory využívající vodu v superkritické fázi)

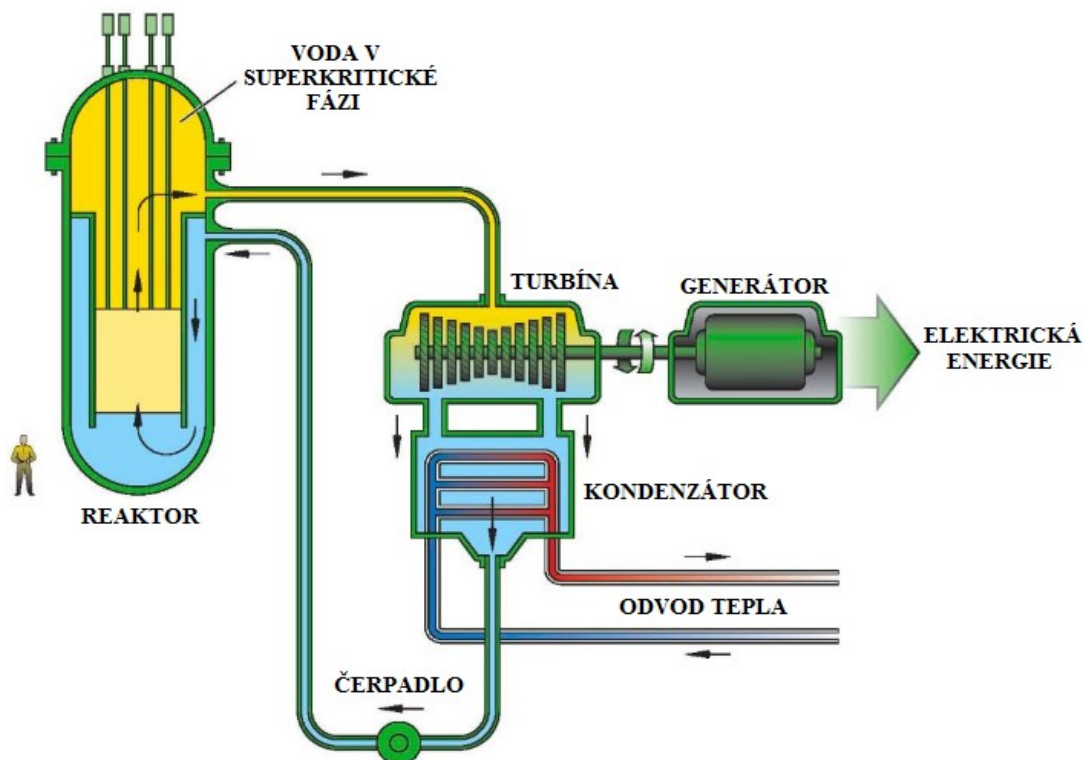
SCWR jsou vysokotlaké, vysokoteplotní, vodou chlazené reaktory, které pracují nad termodynamickým kritickým bodem vody, tj. nad teplotou 374 °C a tlakem 22,1 MPa. V závislosti na geometrii aktivní zóny mohou pracovat s termálními i rychlými neutrony. Oproti dnešním vodou chlazeným reaktorům přináší celou řadu výhod (GIF, 2019):

- Vyšší provozní teplota (510–625 °C vs VVER ~ 324 °C vs BWR ~ 286 °C).
- Čerpadla jen pro napájení a odvod kondenzátu.
- Odpadá nutnost parogenerátoru, odlučovače kapek i sušičky (chladiivo je přehřáté).
- Zmenšení velikosti turbíny (díky vyšší entalpii páry, redukce nákladů).
- Zmenšení kontejnmentu reaktoru (redukce nákladů).

Nevýhody SCWR (GIF, 2019):

- Neznámost přechodových jevů superkritického stavu vody.
- Nutnost vysokého tlaku systému (cca 25 MPa(g)).
- Silné oxidační činidlo (nutnost vývoje lepších materiálů pro pokrytí paliva).

Pro produkci elektrické energie je součástí primárního okruhu parní turbína (obr. 4).



Obr. 4 Reaktory využívající vodu v superkritické fázi (Kamide a Pivet, 2019)

1.5 SFR (Sodíkem chlazené rychlé reaktory)

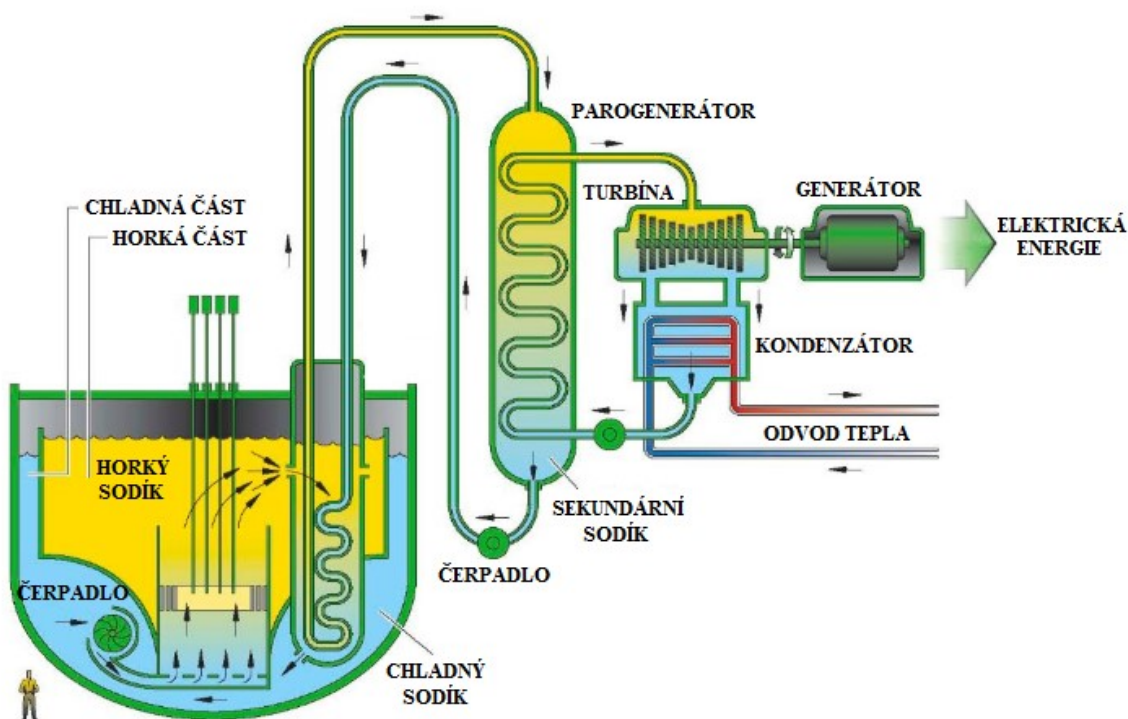
Koncept SFR je vysokoteplotní reaktor využívající rychlých neutronů, který je chlazený kapalným sodíkem. Aktuálně jsou na světě dvě komerčně využívaná zařízení. Obě stojí na území Ruské federace a dosahují výkonů 1 470 MW_{th} a 2 100 MW_{th} (respektive 600 MW_e a 880 MW_e). Výhodami použití tohoto ne zcela obvyklého řešení jsou (GIF, 2019):

- Vysoká hustota tepelného výkonu (teplota až 550 °C, teplota varu sodíku 883 °C).
- Provoz za atmosférického tlaku.
- Nejlepší využití jaderného paliva z doposud známých typů.
- Nekorozivní médium.
- Elektricky vodivé chladivo (možnost použití elektromagnetických čerpadel).

Nevýhodami SFR (GIF, 2019):

- Sodík je alkalický kov (vyžaduje co možná nejlepší utěsnění chladicího systému).
- Aktivuje se (avšak poločas rozpadu je jen 15 hodin).
- Nutnost nahřátí systému nad teplotu tání chladiva (bod tání sodíku 97,7 °C).

Cirkulace média je znázorněna na obrázku níže. Sekundárním okruhem proudí čistý roztavený sodík, který v parogenerátoru vytváří vodní páru terciárního okruhu, kde probíhá výroba elektrické energie pomocí parní turbíny (obr. 5).



Obr. 5 Sodíkem chlazené reaktory (Kamide a Pivet, 2019)

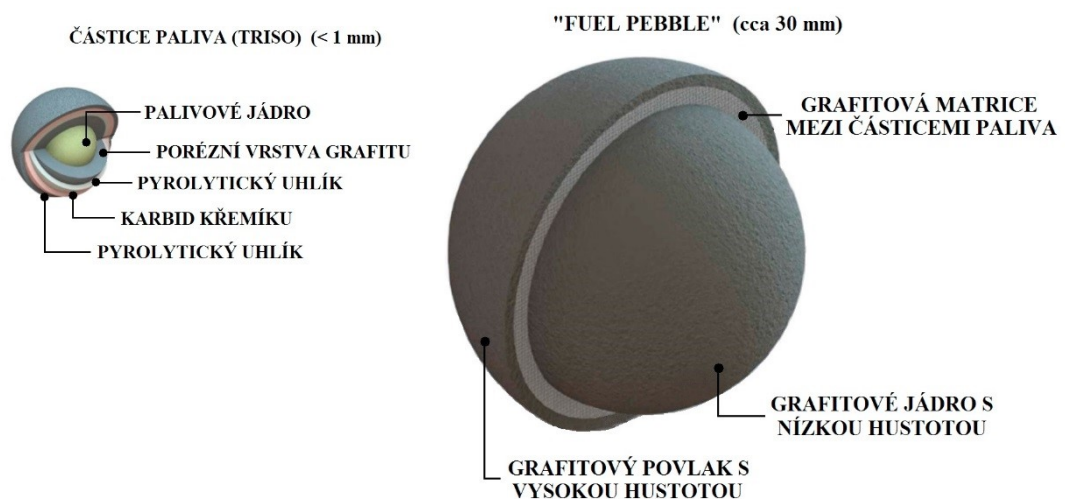
1.6 VHTR (Vysokoteplotní reaktory)

Posledním systémem IV. generace je VHTR, který dosahuje nejvyšší výstupní teploty. Tento koncept cílí především na kogeneraci výroby elektřiny a vodíku, kde se vodík získává z vody termochemickým, elektrochemickým nebo hybridním procesem, ale zvažuje se aplikace i v petrochemickém, či hutnickém průmyslu. VHTR využívá jako primární chladivo helium a štěpná reakce je moderována pomocí grafitu obsaženém přímo v palivu (obr. 6), je to tedy jediný koncept IV. generace, který uvažuje využití jen termálního neutronového spektra. Výhody i nevýhody jsou díky použití helia obdobné jako u GFR (kapitola 1.1) s následujícími rozdíly (GIF, 2019):

- Vyšší provozní teplota (až 1 000 °C).
- Moderovaný, tzn. snadnější řízení reakce.

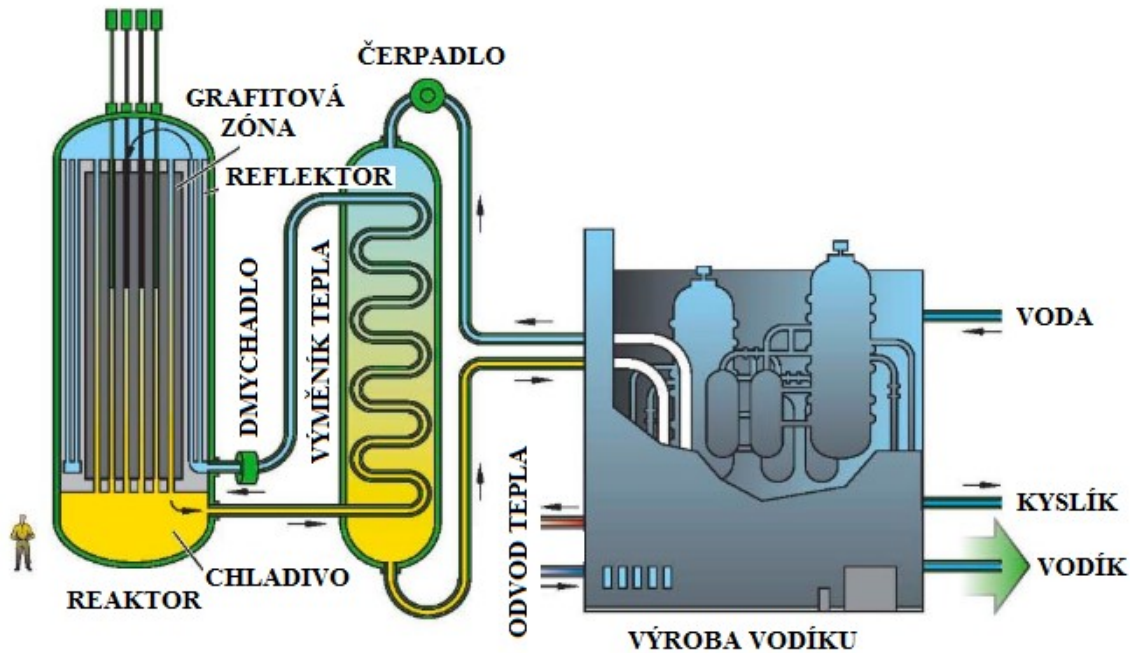
Nevýhody (GIF, 2019):

- Vyšší provozní tlak (cca 10 MPa(g)).
- Využívání termálních neutronů.
- Drahé zpracování jaderného paliva do podoby TRISO pro použití systémem VHTR.



Obr. 6 Palivo VHTR (Andreades et al., 2016)

Elektrická energie se může vyrábět přímo v primárním okruhu pomocí plynové turbíny nebo ze zbytkového tepla z technologie např. výroby vodíku (obr. 7). (GIF, 2019)



Obr. 7 Vysokoteplotní reaktory (Kamide a Pivet, 2019)

Výroba vodíku pomocí zařízení VHTR by měla být výrazně levnější, efektivnější a ekologicky únosnější než konvenční metody. V součinnosti s kogenerací výroby elektrické energie se tato aplikace stává velmi populární a perspektivní. Bohužel v současné době není používání vysokoteplotního helia dostatečně probádané ani pro provoz GFR, které pracuje na nižších teplotách než VHTR. Existuje ale hned několik experimentálních smyček, které se věnují právě ověřování chování systémů využívajících helia coby chladiva ať už pro koncepty GFR, VHTR nebo pro nasazení v aktuálně stavěném tokamaku ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) ve francouzském Cadarache.

2 Heliové smyčky v provozu

Klíčovou součástí praktické části práce je vývoj výpočetního termohydraulického modelu a porovnání jeho výsledků s experimentálními daty. Experimentálních zařízení, která jsou schopna generovat relevantní data, je celosvětově omezené množství. Vzhledem k zaměření práce na systémy typu GFR je v této kapitole provedena rešerše aktuálně používaných zařízení, která využívají helium jako chladivo.

Helium je jednoatomový plynný chemický prvek tvořící nejmenší molekuly a dokonce je hned po vodíku nejlehčím známým prvkem. Snadno tedy uniká z uzavřených systémů. Je bezbarvé, bez chuti i zápachu, netoxické, téměř zcela inertní (jsou známy jen tři sloučeniny) a nekorozivní. Patří do skupiny vzácných plynů, tzn. že má mj. nízké průrazné napětí, snadno se tedy ionizuje a velmi dobře vede elektrický proud. Je transparentní, což umožňuje snadnou kontrolu a manipulaci s palivem. Zároveň je i neutronově transparentní, takže nepohlcuje ani nezpomaluje neutrony. Helium má nízký koeficient teplotní reaktivity, takže se zvyšující se teplotou aktivní zóny narůstá reaktivita, avšak v regulovatelné míře. Má sice vyšší měrnou tepelnou kapacitu než konvenčně používaná voda ($5\,193\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$ za standardních podmínek), ale jakožto plyn má nízkou hustotu, proto je nutné provozovat smyčky pod zvýšených tlakem. Vzhledem k závislosti hustoty na teplotě a nízkým tlakovým ztrátám vzhledem k malé viskozitě, je helium pod zvýšeným tlakem vhodné i pro použití při chlazení přirozenou konvekcí. (Encyclopaedia Britannica, 2019)

Helium má nejnižší bod varu, respektive zkapalnění, a to asi 4,21 K, takže se pro většinu aplikací uvažuje jako jednofázové a nevroucí médium. Při teplotách nižších než 2,18 K je supratekuté a má nejvyšší tepelnou vodivost z doposud známých látek. Pevnou fázi tvoří jen při zvýšeném tlaku, za standardního zůstává v kapalně fázi téměř až k teplotám absolutní nuly. (Encyclopaedia Britannica, 2019)

I když je helium druhým nejzastoupenějším prvkem ve známém vesmíru (přibližně 23 % hmoty), na Zemi je přítomné jen velmi vzácně a díky nízké hmotnosti postupně vyprchává do kosmického prostoru. Na naší planetě vzniká kontinuálně jako produkt radioaktivního rozpadu některých prvků (např. radonu) v zemské kůře, ale jedná se o velmi pomalý proces. Koncentrace v zemské kůře se odhaduje na 0,003 – 0,008 ppm, ve vzduchu zhruba 5,2 ppm. Helium prozatím neumíme vyrábět, jediným známým způsobem je slučování jader vodíku, což je podstatou termonukleární fúze, kdy sloučením deuteria a tritia vznikne helium a neutron s energií 14,1 MeV. V současné době se helium získává zkapalňováním plynů z frakční destilace zemního plynu, expanzního plynu při syntéze amoniaku nebo přímo ze zemního plynu, kde jeho koncentrace v některých oblastech dosahuje až 7 % objemových. (Encyclopaedia Britannica, 2019) (Tilghman, 2011)

2.1 HELOKA (Helium Loop Karlsruhe)

Na technologickém institutu v Karlsruhe (Německo) (FZK, Forschungszentrum Karlsruhe) bylo vybudováno experimentální zařízení chlazené heliem, které slouží k testování komponent potřebných v aplikaci pro jadernou fúzi. Smyčka je neaktivní, vyhřívána pouze elektrickým zdrojem tepla. HELOKA sestává z vysokotlaké a nízkotlaké části. První zmíněná je klíčová pro vývoj experimentálního fúzního reaktoru ITER, respektive energetického reaktoru DEMO (Demonstration Power Station). Testují se zde nejen moduly blanketu (TBM, Test Blanket Module) a divertoru (TDM, Test Divertor Module), ale ověřuje se zde i funkce kompresorů, výměníků tepla, systémů čištění a kontroly kvality helia. To vše v plném rozsahu předpokládaných podmínek. V nízkotlaké části poté probíhá vývoj IFMIF-HFTM (International Fusion Materials Irradiation Facility-The High Flux Test Module), tedy zařízení pro testování konstrukčních materiálů pro energetické fúzní reaktory při zátěži vysokými neutronovými toky. Fyzikální parametry systému jsou shrnuty v tab. 3. (Ionescu-Bujor et al., nedatováno)

Tab. 3 Parametry HELOKA (Ionescu-Bujor et al., nedatováno)

Testovací sekce	Průtok helia (kg s ⁻¹)	Tlak (MPa)	Teplota vstup/výstup (°C)	Tepelný výkon (MW _{th})
ITER-TBM	0,88–1,8	8	100/300 300/550	1,5
ITER-TDM	3–5,5	10	650/700	5
DEMO blanket	5	9	300/550	5
IFMIF-HFTM	0,083–1,5	0,3	50/80–100	0,12

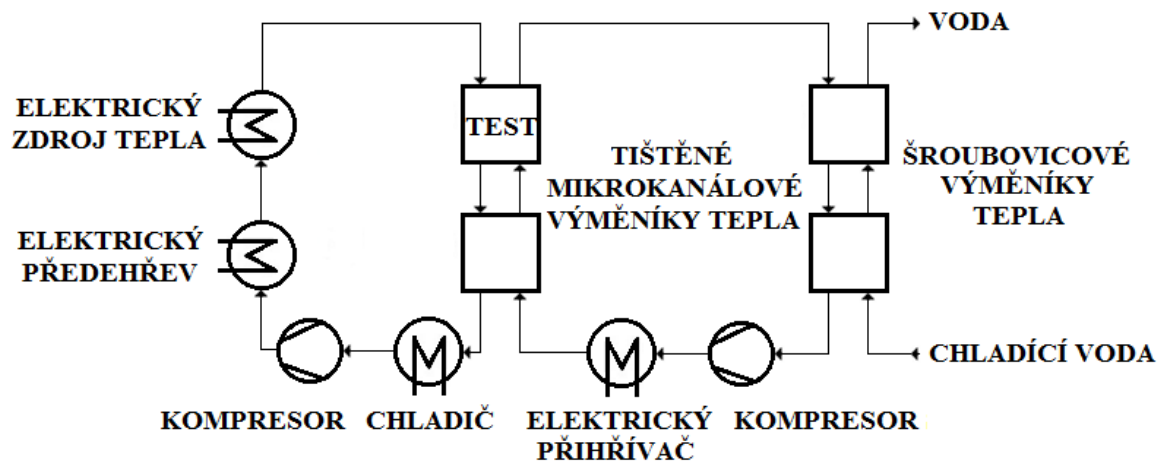
V rámci dalšího výzkumu se na FZK vybuvovalo rozšíření vysokotlaké částí HELOKA, které umožňuje provádět experimenty v detailnějším měřítku. Nová část smyčky se nazývá KATHELO (Karlsruhe Advanced Technologies Helium Loop) a hraje významnou roli při výzkumu nových konstrukčních materiálů zatěžovaných vysokými tepelnými toky. Zejména se jedná o vývoj modulárního divertoru s proudovým chlazením (HEMJ, Helium-cooled Modular divertor with Jet cooling), které operuje při tlaku 10 MPa, teplotě 800 °C a průtoku chladiva až 0,2 kg s⁻¹. Dále zařízení umožňuje výzkum množivého blanketu při tlaku 8 MPa, teplotě 400 °C a průtoku helia 0,05 kg s⁻¹. (Ghidrsa et al., 2013)

2.2 HELP (Helium Experimental Loop)

Korejský institut pro výzkum atomové energie (KAERI, Korea Atomic Energy Research Institute) provozuje vysokoteplotní heliovou smyčku pro ověřování prototypů klíčových komponent VHTR v souvislosti s výrobou vodíku. HELP má primární i sekundární heliový okruh viz obr. 8. Jedná se o 1/6 mock-up zařízení VHTR, který využívá elektrický ohřev jako zdroj tepla. Primární helium se předeřeje na teplotu 500 °C, následně se v hlavním zdroji tepla ohřeje na 1 000 °C a poté vstupuje do testovací sekce tištěného mikrokanálového výměníku s výkonem 150 kW_{th}. Fyzikální parametry systému HELP jsou shrnuty v následující tab. 4. (Kim et al., 2013)

Tab. 4 Parametry HELP (Kim et al., 2013)

HELP	Hodnota	Jednotka
Maximální teplota	1 000	°C
Tlak	9	MPa
Průtok	0,5	kg s ⁻¹
Tepelný výkon zdroje	600	kW _{th}
Tepelný výkon předeřeje	150	kW _{th}
Tepelný výkon TEST výměníku tepla	150	kW _{th}



Obr. 8 Schéma HELP (Kim et al., 2013)

2.3 HTHL (High-Temperature Helium Loop)

HTHL je experimentální zařízení CVŘ (Centrum výzkumu Řež s.r.o.) postavené v areálu ÚJV (Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.) pro účely simulace chemických i fyzikálních podmínek chladiva v systémech GFR a VHTR. Smyčka je určena pro dlouhodobé testy vzorků konstrukčních materiálů a také pro výzkum čištění chladiva plynem chlazených reaktorů. Zdrojem neutronového záření pro aktivní část zařízení je výzkumný lehkovodní reaktor tankového typu LVR-15. Fyzikální parametry systému HTHL jsou shrnuty v tab. 5. (Berka et al., 2010)

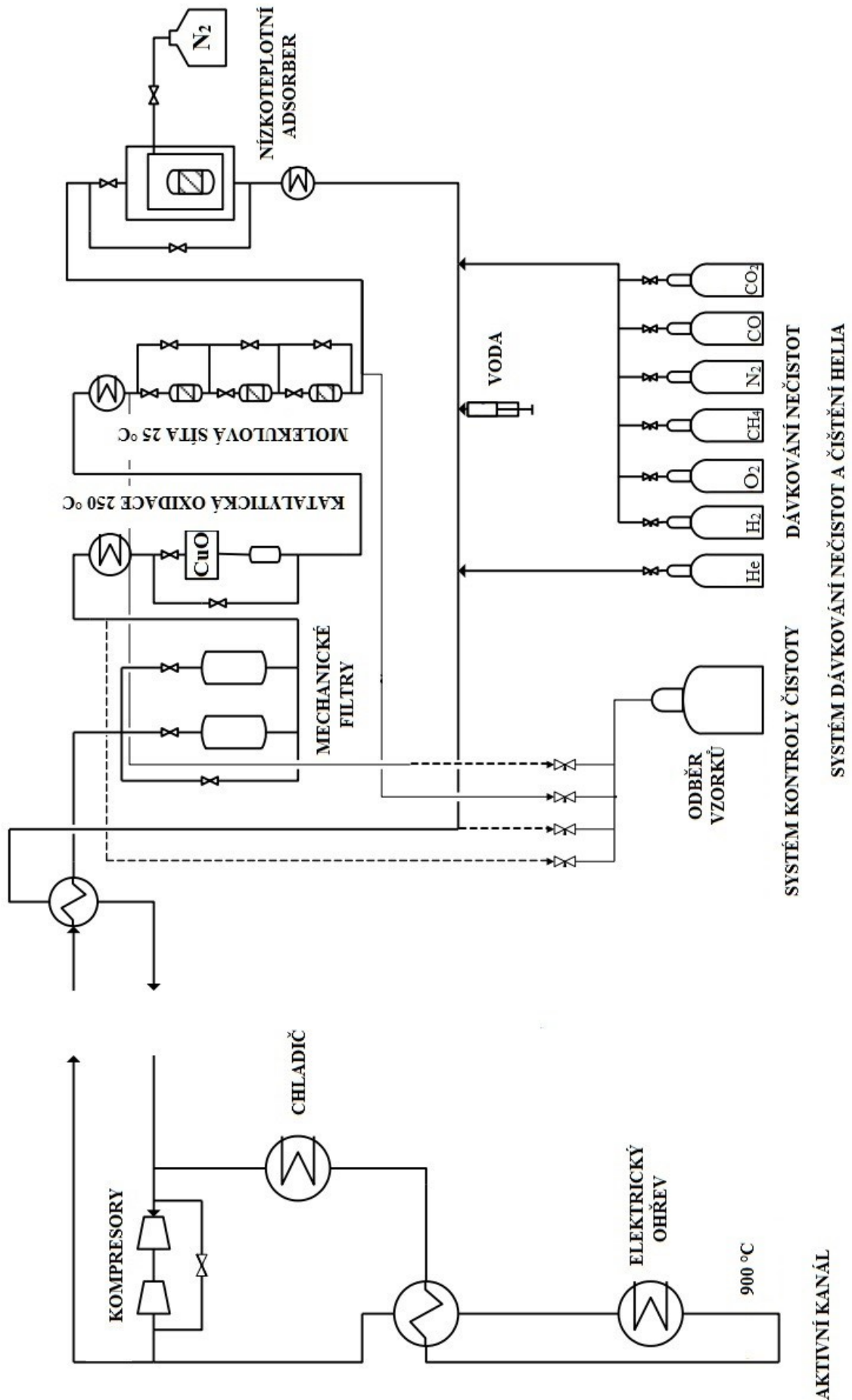
Tab. 5 Parametry HTHL (Berka et al., 2010)

HTHL	Hodnota	Jednotka
Maximální teplota	900	°C
Tlak	7	MPa
Průtok	38	kg h ⁻¹
Tok tepelných neutronů	5×10 ¹⁸	n m ⁻² s ⁻¹
Tok rychlých neutronů	2,5×10 ¹⁸	n m ⁻² s ⁻¹
Tepelný výkon	30	kW _{th}

Většina komponent zařízení je vyrobena z titanem stabilizované oceli s 18 % Cr a 10 % Ni. Teplota vnějšího povrchu může z bezpečnostních omezení dosahovat maximální teploty kolem 500 °C. Aktivní kanál o celkové délce 6 m (obr. 9 na následující straně) je tvořen systémem koaxiálních trubek, regeneračním výměníkem, elektrickým zdrojem tepla, vodním chladičem a dalšími podpůrnými systémy. Radiační ohřev média předává teplo až 30 kW_{th}. Během odstávek reaktoru je poté výpadek tepla kompenzován elektrickým ohřevem. Pro překonávání tlakových ztrát v systému je součástí aktivního kanálu dvoustupňový kompresor, teplota by zde neměla přesahovat 200 °C. (Berka et al., 2010)

Systém dávkování nečistot a čištění helia dle Berky (2010) simuluje chování pro očekávané znečištění helia následujícími zdroji:

- Výměna paliva a zařízení reaktoru, průniky z okolí (CH₄, CO, CO₂, H₂O, H₂, N₂).
- Znečištění média štěpnými produkty.
- Desorpce z grafitu a konstrukčních materiálů (CO, CO₂, H₂O, H₂, N₂).
- Prachové částice z grafitu, konstrukčních materiálů a tepelné izolace.



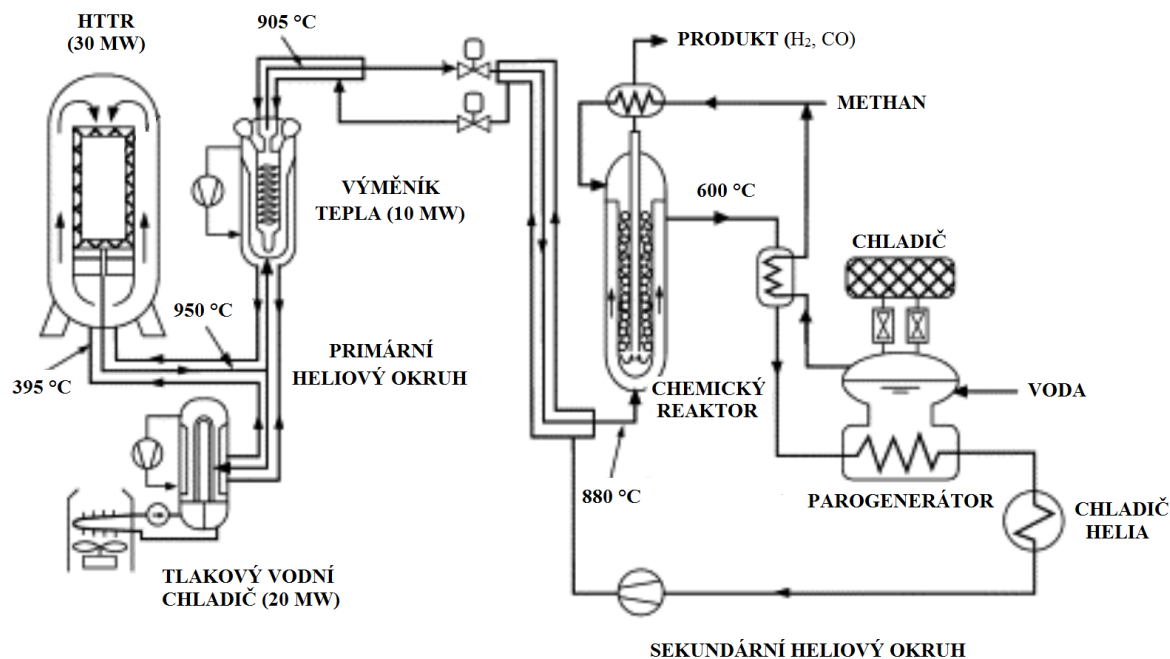
Obr. 9 Schéma HTHL (Berka et al., 2010)

2.4 HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor)

Japonská agentura pro atomovou energii (JAEA, Japan Atomic Energy Agency) se zabývá výzkumem a vývojem zařízení pro výrobu vodíku v aplikaci s VHTR. Za tímto účelem vybudovala aktivní smyčku HTTR, která dosáhla kritického stavu již v roce 1998 a na plný výkon (30 MW_{th}) byla spuštěna v roce 2004 kdy výstupní teplota chladiva dosáhla $950 \text{ }^\circ\text{C}$. v rámci vývoje využití získávaného tepla vybudovala elektricky vyhřívaný mock-up, vyrábějící vodík parním reformováním methanu nebo termochemickým vodním štěpením jód-síra (IS, Iodine-Sulfur). Fyzikální parametry HTTR i mock-up pro výrobu vodíku jsou shrnuty v následující tab. 6, schéma HTTR potom na obr. 10. (Ohashi et al., 2006)

Tab. 6 Parametry HTTR (Ohashi et al., 2006)

Parametr	HTTR	Mock-up	Jednotka
Teplota páry vstup/výstup	450/580	450/600	$^\circ\text{C}$
Tlak páry	4,5	4,5	MPa
Teplota helia vstup/výstup	880/585	880/650	$^\circ\text{C}$
Tlak helia	4	4	MPa
Průtok methanu	1 400	43,2	kg h^{-1}
Průtok helia	9 070	327,6	kg h^{-1}
Produkce vodíku	4 240	110	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$
Tepelný výkon	10	0,38	MW_{th}



Obr. 10 Schéma HTTR (Ohashi et al., 2006)

2.5 S-ALLEGRO

Pro účely přípravné fáze projektu ALLEGRO (reaktor IV. generace typu GFR, více v následující kapitole 3), byla v roce 2017 za podpory SUSEN (Sustainable Energy) (2020) v CVŘ (Centrum výzkumu Řež s.r.o.) vybudována experimentální smyčka S-ALLEGRO (návrhové parametry viz tab. 7). Zařízení je neaktivní, s elektricky vyhřívanou modelovou zónou. Sestává z primárního a sekundárního okruhu využívající helium jako teplotnosné médium (obr. 11 na následující straně). Součástí primární sekce je okruh DHR (Decay Heat Removal), který slouží k prověření možností odvodu zbytkového tepla z elektricky vyhřívané topné zóny např. při havárii LOCA nebo SBO. Sekundární výměník tepla i výměník DHR je dochlazován terciárním tlakovodním okruhem. Experimentální zařízení slouží k prověření následujících bezpečnostních charakteristik reaktoru ALLEGRO: (SUSEN, 2020)

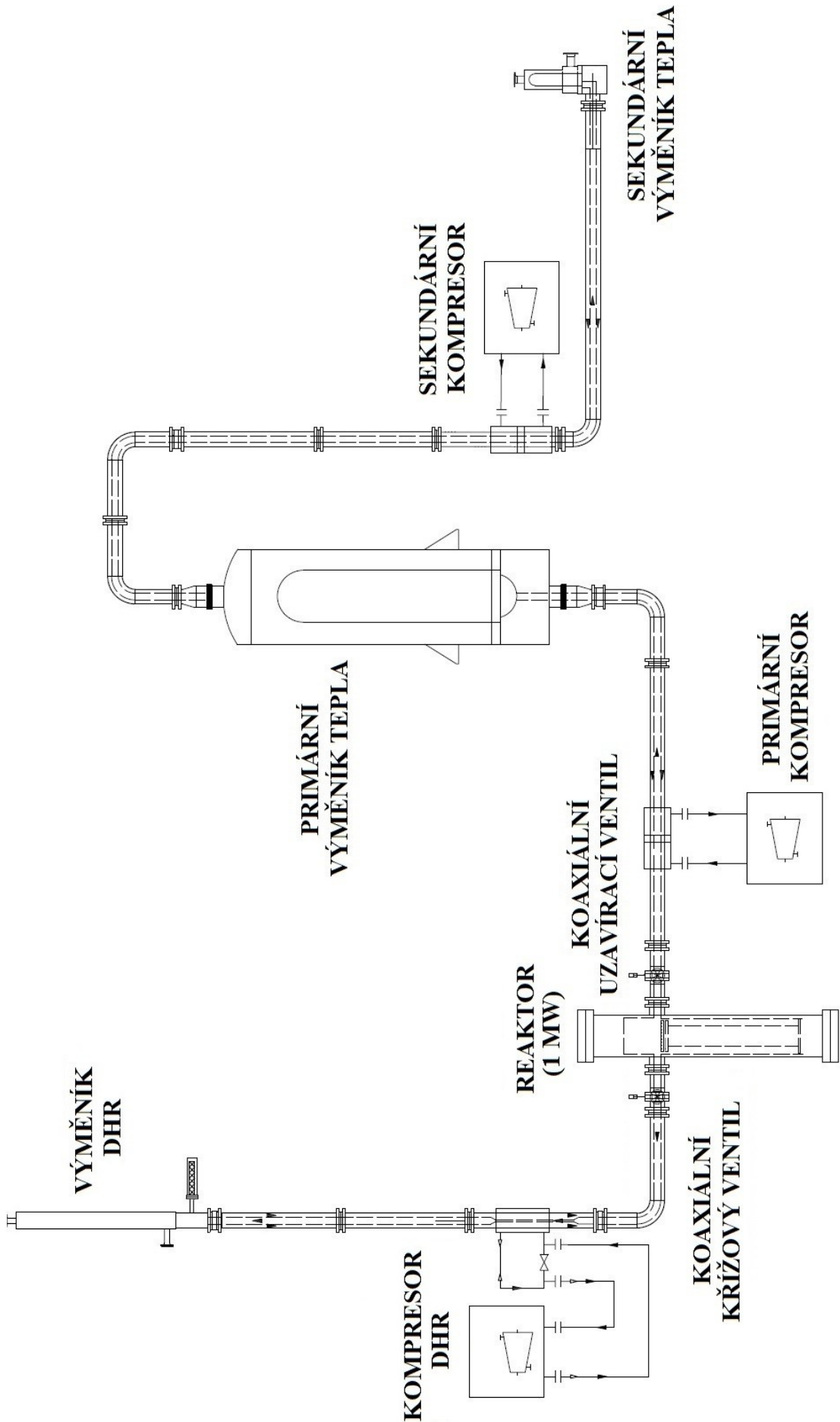
- Aktivní zóna.
- Systém havarijního odvodu tepla.
- Systémové chování v přechodových stavech.
- Systémové chování v havarijních stavech.
- Potrubní systémy – přestup tepla vnitřní i vnější.
- Celkové chování systému.
- Řízení reaktoru.

Tab. 7 Parametry S-ALLEGRO (ATEKO, 2015)

S-ALLEGRO	Hodnota	Jednotka
Tepelný výkon	1	MW _{th}
Tlak	70	bar(g)
Teplota	850	°C
Průtok helia	1 800	kg h ⁻¹

Smyčka S-ALLEGRO přinesla CVŘ první konstrukční i provozní zkušenosti v sektoru vysokoteplotních heliových technologií. Zároveň je jedním z prvních zařízení pro experimentální výzkum systému odvodu zbytkového tepla a naměřená data slouží pro validaci výpočetních modelů. Aktuálním cílem projektu na smyčce S-ALLEGRO je realizovat výzkum do takové míry, aby bylo možné rozhodnout o případné výstavbě reaktoru ALLEGRO na území Střední Evropy. (SUSEN, 2020)

Tato práce se věnuje vytvoření a validaci termohydraulického výpočtového modelu smyčky S-ALLEGRO pro analýzu systému v různých provozních stavech pro podporu vývoje konceptu GFR v rámci projektů TAČR TK01030116 (Návrh konceptu bezpečnostně důležitých prvků rychlého heliem chlazeného demonstračního reaktoru ALLEGRO, podpořený Technologickou agenturou ČR) a R4S (Výzkum pro udržitelnou energetiku).



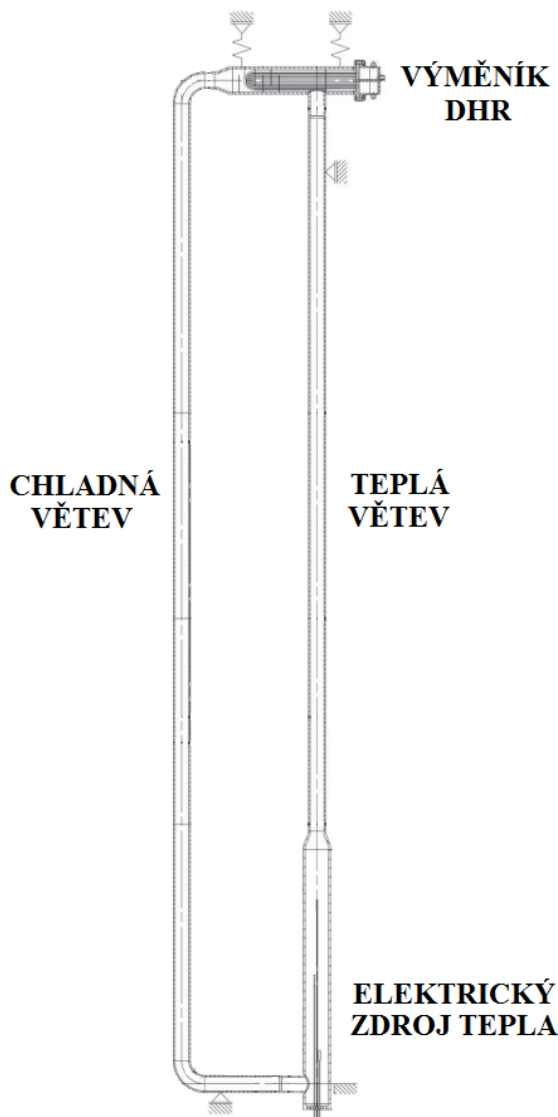
Obr. 11 Schéma S-ALLEGRO (ATEKO, 2018)

2.6 STU-Helium Loop

Na podzim roku 2016 STU (Slovenská technická univerzita v Bratislavě) vybudovala v Trnavě první evropskou heliovou smyčku na ověření možnosti odvodu zbytkového tepla pomocí přirozené cirkulace pro parametry definované v tab. 8. K ohřevu média využívá zařízení elektrického zdroje tepla. Následné chlazení zajišťuje horizontální U-trubkový výměník tepla helium-voda (obr. 12). (EUROSAFE, 2020)

Tab. 8 Parametry STU-Helium Loop (EUROSAFE, 2020)

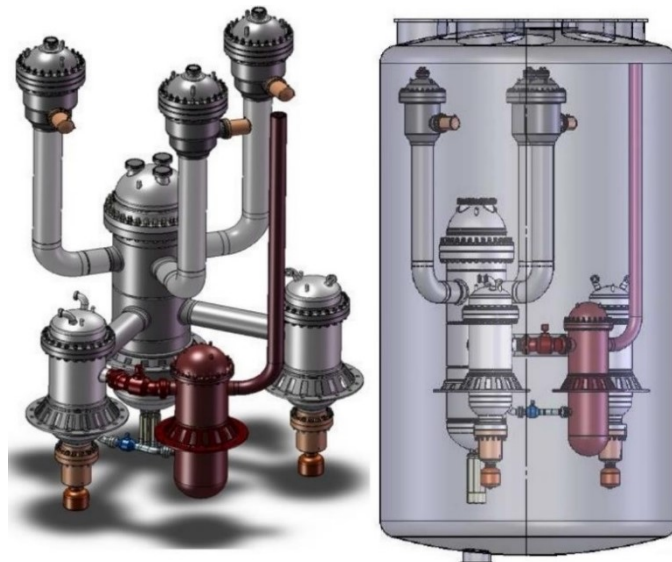
STU-Helium Loop	Hodnota	Jednotka
Vstupní teplota zdroje tepla	150–250	°C
Výstupní teplota zdroje tepla	400–520	°C
Provozní tlak	3–7	MPa
Výkon zdroje tepla	500	kW _{th}
Tepelný výkon výměníku DHR	220	kW _{th}
Výškový rozdíl	10	m



Obr. 12 Schéma STU-Helium Loop (Urban et al., 2017)

3 Vývoj konceptu ALLEGRO

Výzkum IV. generace reaktorů typu GFR měl z počátku obrovskou podporu ve Francii, kde výzkumná organizace CEA (2020) v letech 2001–2010 vyvíjela předběžný koncept plnohodnotného reaktoru GFR2400 (2 400 MW_{th}). Jelikož ale na světě nebylo, a doposud není, postavené žádné obdobné zařízení, společnost se zaměřila na vývoj malého demonstračního reaktoru ETDR (50 MW_{th}), který měl disponovat jedním primárním heliovým okruhem, chlazeným sekundární vodou. v roce 2009 přešel vývoj demonstračního zařízení pod název ALLEGRO (75 MW_{th}) (obr. 13), mělo se jednat o první prototyp GFR2400 s výrobou elektrické energie, který se od ETDR lišil především druhým primárním okruhem a sekundární voda se dochlazovala vzduchem. V roce 2010 ale došlo k významným změnám strategie země. Z důvodu finančních i politických rozhodnutí CEA koncepty GFR opustila a zaměřila se na SFR, v jejichž provozu měla již historickou zkušenost. (Vácha a Bělovský, 2016)



Obr. 13 Návrh zařízení ALLEGRO (Vácha a Bělovský, 2016)

V červenci 2013 byla zřízena entita V4G4 (Visegrad Fund, 2019), která převzala projekt ALLEGRO a nadále se podílí na jeho vývoji. Tentokrát v konfiguraci tří primárních okruhů a sekundárním chladivem v podobě helia, které je dochlazováno vodou. Jedná se o konsorcium:

- ÚJV Řež a.s. (CZ) (Ústav jaderného výzkumu Řež)
 - Technologie helia, VaV a experimentální podpora.
- MTA EK (HU) (Maďarská akademie věd pro energetický výzkum)
 - VaV paliva a aktivní zóny.
- NCBJ (PL) (Národní centrum pro jaderný výzkum)
 - VaV materiálů.
- VUJE (SK) (Výzkumný ústav jaderné energetiky)
 - VaV designu a bezpečnostních prvků.

A dalších přidružených členů:

- CEA (FR) (Komise pro alternativní a atomovou energii)
- CVŘ s.r.o. (CZ) (Centrum výzkumu Řež)

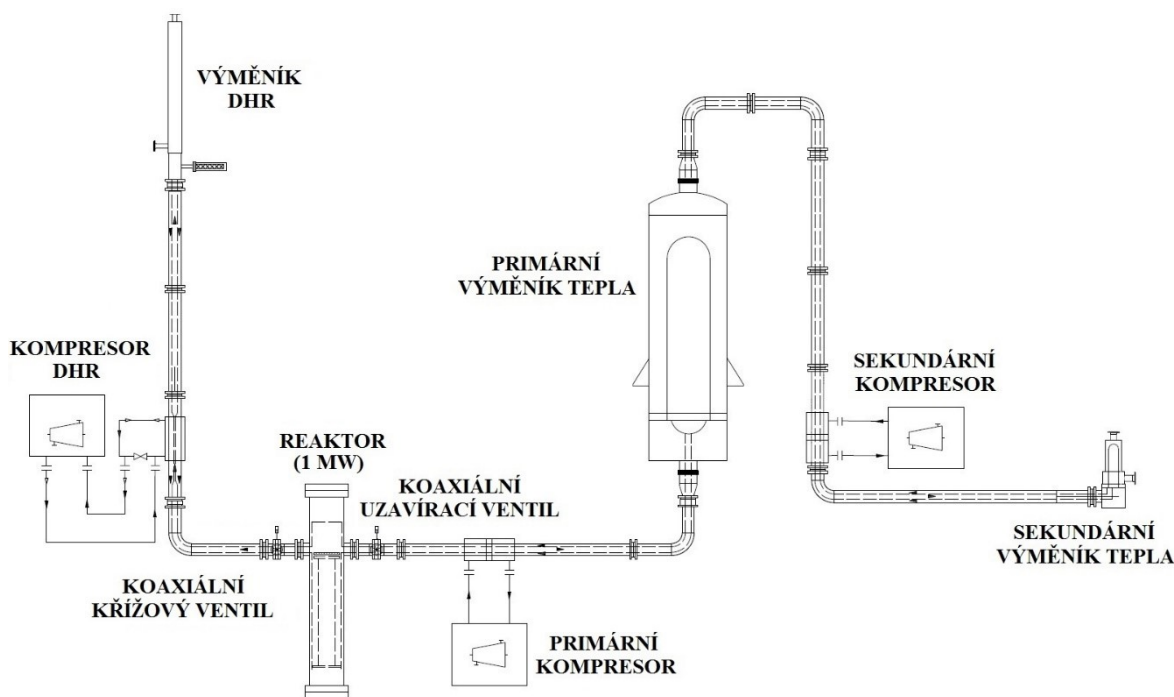
4 Popis zařízení S-ALLEGRO

S-ALLEGRO je experimentální zařízení s cílem modelově prověřit základní bezpečnostní charakteristiky (kapitola 2.5) reaktoru IV. generace typu GFR, respektive jeho demonstrační jednotky ALLEGRO (kapitola 3). Bylo vybudováno v roce 2017 za podpory SUSEN v plzeňském areálu CVŘ. Experimentální smyčka S-ALLEGRO sestává z 5 celků:

- Primární heliová smyčka s reaktorovou nádobou, koaxiálním uzavíracím ventilem, primárním výměníkem tepla a oběhovým cirkulátorem.
- Sekundární heliová smyčka se sekundárním výměníkem tepla a oběhovým cirkulátorem.
- Smyčka DHR s koaxiálním křížovým ventilem, výměníkem DHR a oběhovým cirkulátorem DHR.
- Podpůrné systémy.
- Instrumentace, systém kontroly a řízení, elektročást.

Pro tvorbu termohydraulického modelu jsou poslední dva celky nepodstatné, ale jejich znalost je klíčová při vyhodnocování experimentálních dat. Instrumentace zařízení umožňuje měření tlakových hladin v heliových okruzích, tlakových diferencí na vybraných komponentách, průtoků nebo rychlostních profilů. Pro účely této práce jsou důležitá především teplotní čidla, jejichž výstupy slouží k porovnání s výpočty modelu. Po celém zařízení je rozmístěno více než 50 teplotních čidel. Jedná se o standardní termočlánky typu K umístěných v jímkách. Na vodním okruhu sekundárního výměníku tepla jsou použita odporová čidla typu Pt100, která mají vyšší přesnost měření oproti klasickým termočládkům.

Parametry uváděné v rámci této kapitoly jsou převzaty z technické dokumentace zařízení dodané firmou ATEKO (2015–2018) a interní dokumentace CVŘ. Rozložení hlavních komponent je znázorněno na obr. 14.



Obr. 14 Schéma S-ALLEGRO (ATEKO, 2018)

4.1 Reaktor

Zařízení, ve kterém obecně probíhá chemická, fyzikální nebo fyzikálně-chemická reakce. V případě aktuálně uvažovaných jaderných reaktorů zde probíhá řízené uvolňování energie řetězovou štěpnou reakcí, což je příkladem fyzikálního děje. Životnost celého jaderného komplexu závisí především na životnosti reaktoru, který se skládá z reaktorové nádoby, aktivní zóny s palivovými soubory a řídicích prvků. V kontextu experimentální smyčky S-ALLEGRO je reaktor do značné míry zjednodušený a sestává pouze z reaktorové nádoby s topnou zónou v podobě elektrického topení o tepelném výkonu 1 MW_{th} . Jedná se tedy o neaktivní zařízení (viz kapitola 2.5). Nominální parametry zařízení jsou shrnuty v tab. 9.

Tab. 9 Návrhové parametry reaktoru

Reaktor	Hodnota	Jednotky
Nominální výkon zóny	1	MW_{th}
Vstupní teplota	460	$^{\circ}\text{C}$
Výstupní teplota	850	$^{\circ}\text{C}$
Tlak	70	bar(g)
Tlaková ztráta zařízení	50	kPa
Hmotnostní průtok	1 800	kg h^{-1}

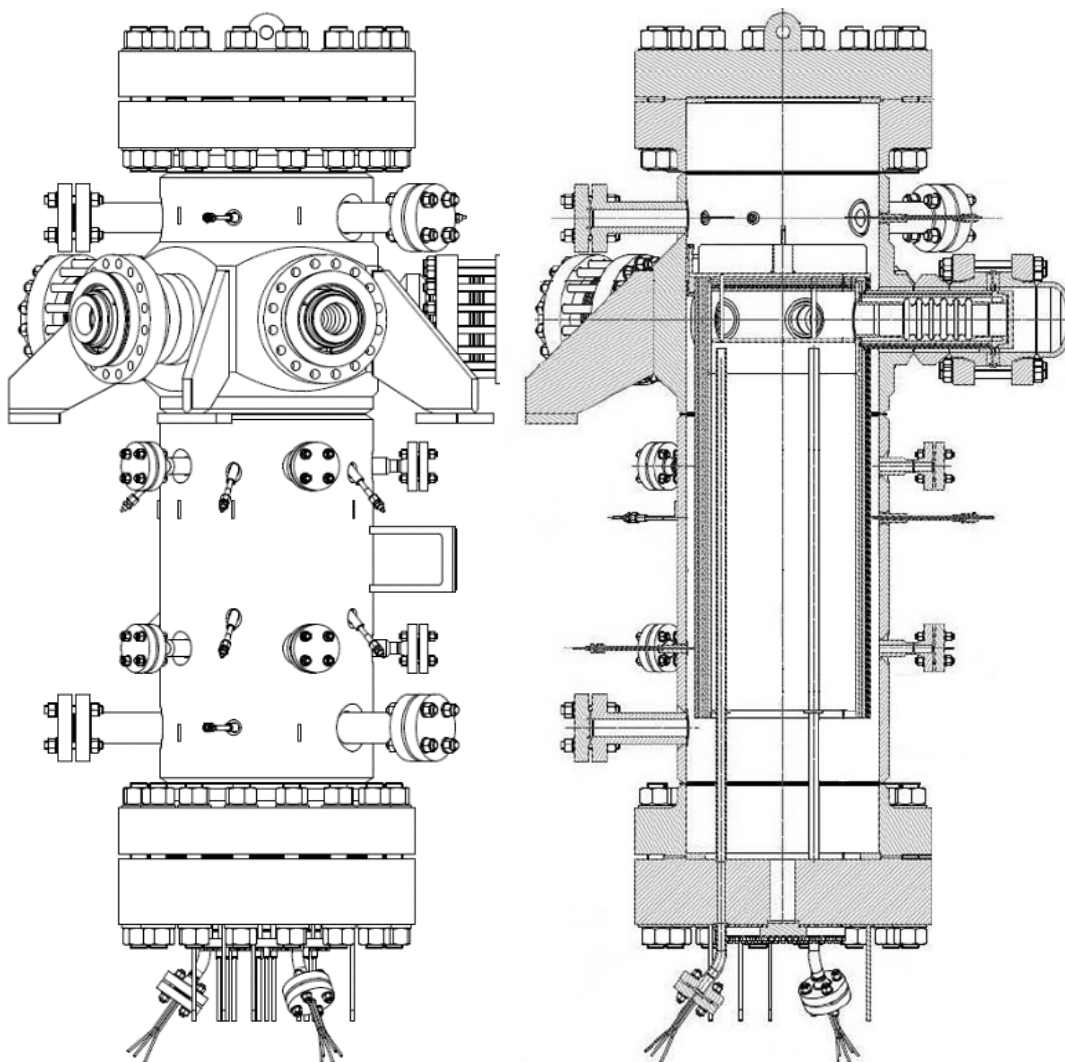
Na tlakové ztrátě experimentálního reaktoru se nejvíce podílí děrovaný plech, který je umístěný nad topnou zónou pro simulování podmínek reálné aktivní zóny. Jeho průtočná plocha činní $A = 5,675 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ a tlaková ztráta při nominálním stavu dosahuje 40 kPa.

4.1.1 Reaktorová nádoba

Tlaková, válcová nádoba obsahující vnitřní vestavbu pro umístění sestavy topné zóny, navržena dle vzoru ALLEGRO, tzn. se sestupnou šachtou podél stěny do dolní části, což zajišťuje její chlazení, s následným tokem média směrem zdola nahoru vyhřívanou zónou. Helium je po ohřevu odváděno vnitřní trubicí koaxiálního potrubí primárního okruhu, respektive okruhu DHR. Nádoba má po obvodu ve stejné výšce celkem 5 přírub, z kterých se aktuálně využívají jen dvě (primární okruh a okruh DHR), zbylé jsou zaslepené. Základní parametry nádoby jsou uvedeny v tab. 10. Na obr. 15 je vizualizace nádoby a její řez.

Tab. 10: Parametry reaktorové nádoby

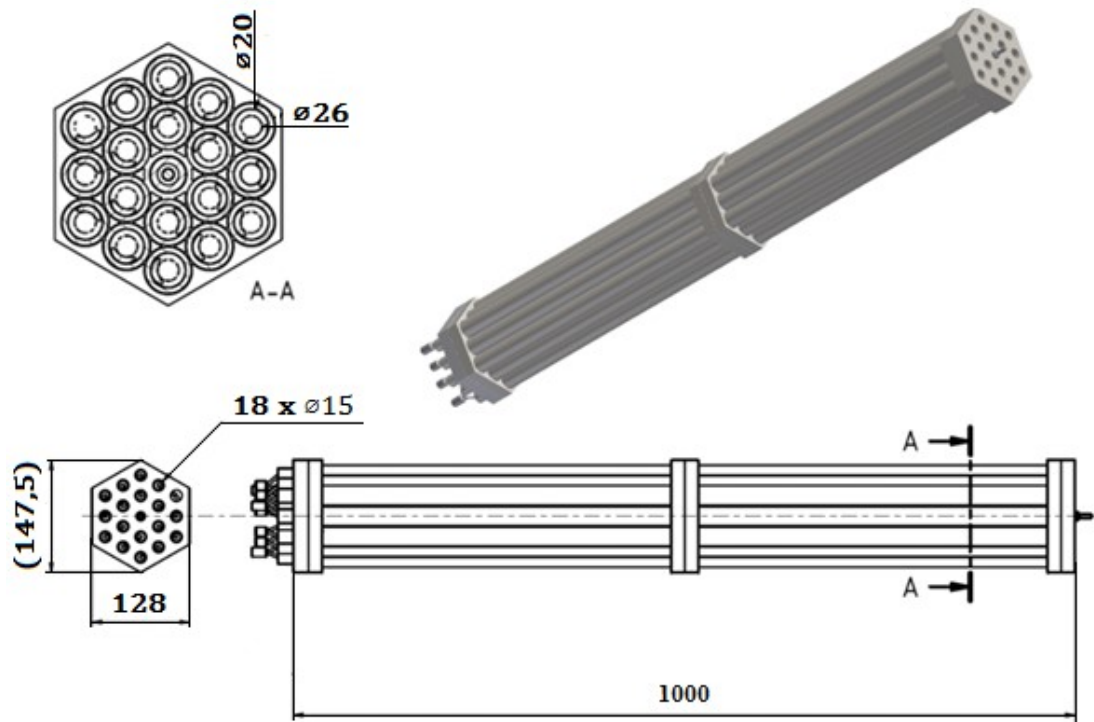
Reaktorová nádoba	Hodnota	Jednotky
Celková výška	2 500	mm
Vnější plášť	$\varnothing 620 \times 30$	mm
Vestavba pro topnou zónu	$\varnothing 513 \times 45$	mm
Celková hmotnost	4 777	kg
Materiál	SS 1.4541	



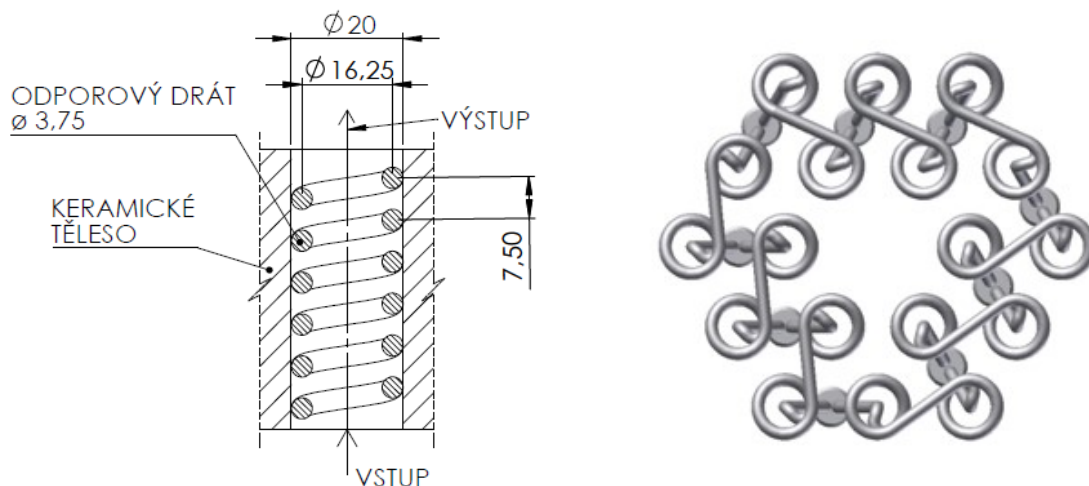
Obr. 15 Vizualizace reaktorové nádoby

4.1.2 Elektricky vyhříváná topná zóna

Srdcem reaktoru je v případě experimentální smyčky S-ALLEGRO elektricky vyhříváná topná zóna, která sestává ze 7 hexagonálních článků (obr. 16). Každý článek je tvořen 18 trubičkami z mullitové keramiky o rozměrech TR $\varnothing 26 \times 3-1000$. Jednotlivé trubice jsou do článků uspořádány keramickými distančními vložkami, které zajišťují tok helia ve vyhříváných kanálech (v trubkách) a zároveň zpevňují svazek. Prostor mezi keramickými trubicemi je vyplněn statickým heliem. V trubičkách je instalována volně ložená, vinutá topná spirála z odporového drátu z KANTHAL AF (2019) (obr. 17).



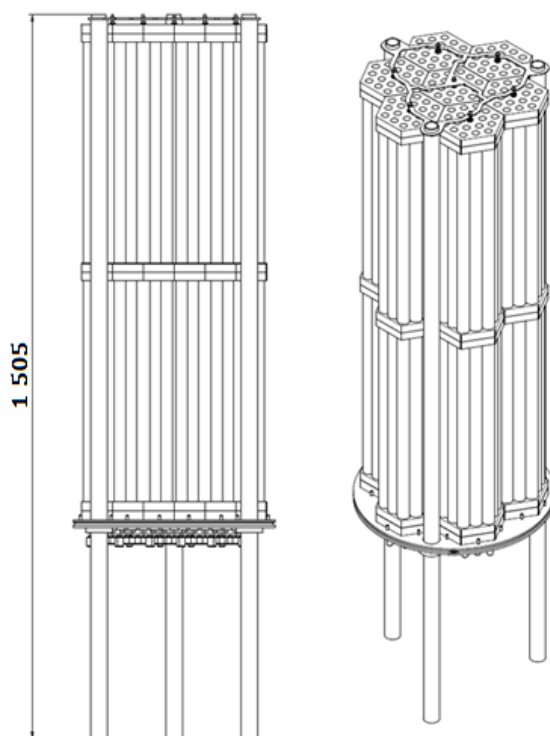
Obr. 16 Topný článek



Obr. 17 Detail vinutí topné spirály

(vlevo – řez trubičkou, vpravo – pohled shora na vyjmutý topný drát jednoho článku)

Jednotlivé topné články jsou uspořádány do kompaktního celku (obr. 18), který se vkládá do vnitřní vestavby reaktorové nádoby.



Obr. 18 Sestava topné zóny

Výkon topení je plně říditelný pro simulaci reálného vývinu tepla korespondujícího s geometrií aktivní zóny a maximální hustotou výkonu reaktoru ALLEGRO (respektive GFR2400), konkrétněji $100 \text{ MW}_{th} \text{ m}^{-3}$ (GIF, 2019). Tento fakt umožňuje plnohodnotné simulování procesů přenosu tepla vznikajících v systému s ohledem na bezpečnostní funkce ALLEGRO. Jedná se zejména o pasivní odvod zbytkového tepla (okruh DHR), systémové chování při havarijních stavech např. LOCA, SBO atp. Parametry elektricky vyhřívané topné zóny jsou shrnuty v tab. 11.

Tab. 11: Parametry elektricky vyhřívané topné zóny

Topná zóna	Hodnota	Jednotky
Počet topných článků	7	
Počet TR $\varnothing 26 \times 3$	126	
Činná délka	1 000	mm
Průměr topného drátu	$\varnothing 3,75$	mm
Stoupání vinutí drátu	7,5	mm
Průměrná délka drátu v článku	123,84	m

Materiálové vlastnosti mullitové keramiky v tab. 12.

Tab. 12 Materiálové vlastnosti mullitové keramiky (Lee a Rainforth, 1994)

Mullitová keramika		Hodnota	Jednotky
Hustota		3 200	kg m ⁻³
Tepelná vodivost	100 °C	6,07	W m ⁻¹ K ⁻¹
	600 °C	4,31	
	1 000 °C	3,98	
	1 400 °C	3,89	
Měrná tepelná kapacita		950	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Maximální provozní teplota		1 100	°C
Teplota tavení		1 400	°C

Materiálové vlastnosti KANTHAL AF jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 Materiálové vlastnosti topného drátu (Kanthal®, 2019)

Kanthal® AF		Hodnota	Jednotky
Hustota		7 150	kg m ⁻³
Tepelná vodivost	50 °C	11	W m ⁻¹ K ⁻¹
	600 °C	20	
	800 °C	22	
	1 000 °C	26	
	1 200 °C	27	
Měrná tepelná kapacita	20 °C	460	J kg ⁻¹ K ⁻¹
	200 °C	560	
	400 °C	630	
	600 °C	750	
	800 °C	710	
	1 000 °C	720	
	1 200 °C	740	
Maximální provozní teplota		1 300	°C
Teplota tavení		1 500	°C

4.2 Koaxiální potrubí

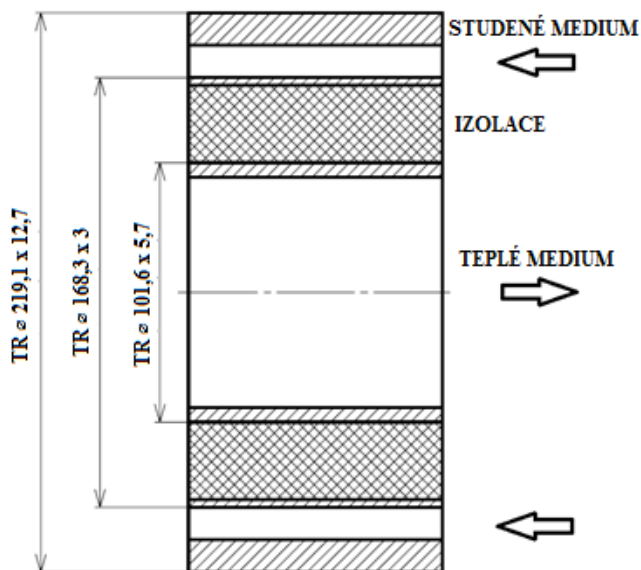
Pro přívod a odvod helia je na celé smyčce použito koaxiálního potrubí (viz obr. 19). Aby nedocházelo k namáhání současně maximálním tlakem i teplotou, je medium o vyšší teplotě vedeno vnitřní trubkou, která je navíc izolovaná kvůli snížení nežádoucí výměny tepla. Chladnější helium potom proudí ve vytvořeném mezikruží. Parametry koaxiálního potrubí jsou uvedeny v tab. 14 a tab. 15. Délkové rozměry koaxiálního potrubí viz obr. 20.

Tab. 14 Návrhové parametry koaxiálního potrubí

	Hodnota	Jednotky
Primární potrubí		
Rozsah teplot	445–850	°C
Tlak	70	bar(g)
Hmotnostní průtok	1 800	kg h ⁻¹
Sekundární potrubí		
Rozsah teplot	820–365	°C
Tlak	65	bar(g)
Hmotnostní průtok	1 602,7	kg h ⁻¹

Tab. 15 Parametry koaxiálního potrubí

Koaxiální potrubí	Hodnota	Jednotky
Vnitřní trubka	TR \varnothing 101,6 \times 5,7	mm
Tloušťka vnitřní izolace	30	mm
Ohraničení izolace	TR \varnothing 168,3 \times 3	mm
Vnější trubka	TR \varnothing 219,1 \times 12,7	mm
Radius kolen	305	mm
Materiál vnitřní TR	SS 1.4848	
Materiál vnitřní izolace	Promalight 1000X	
Materiál vnější TR	SS 1.4541	

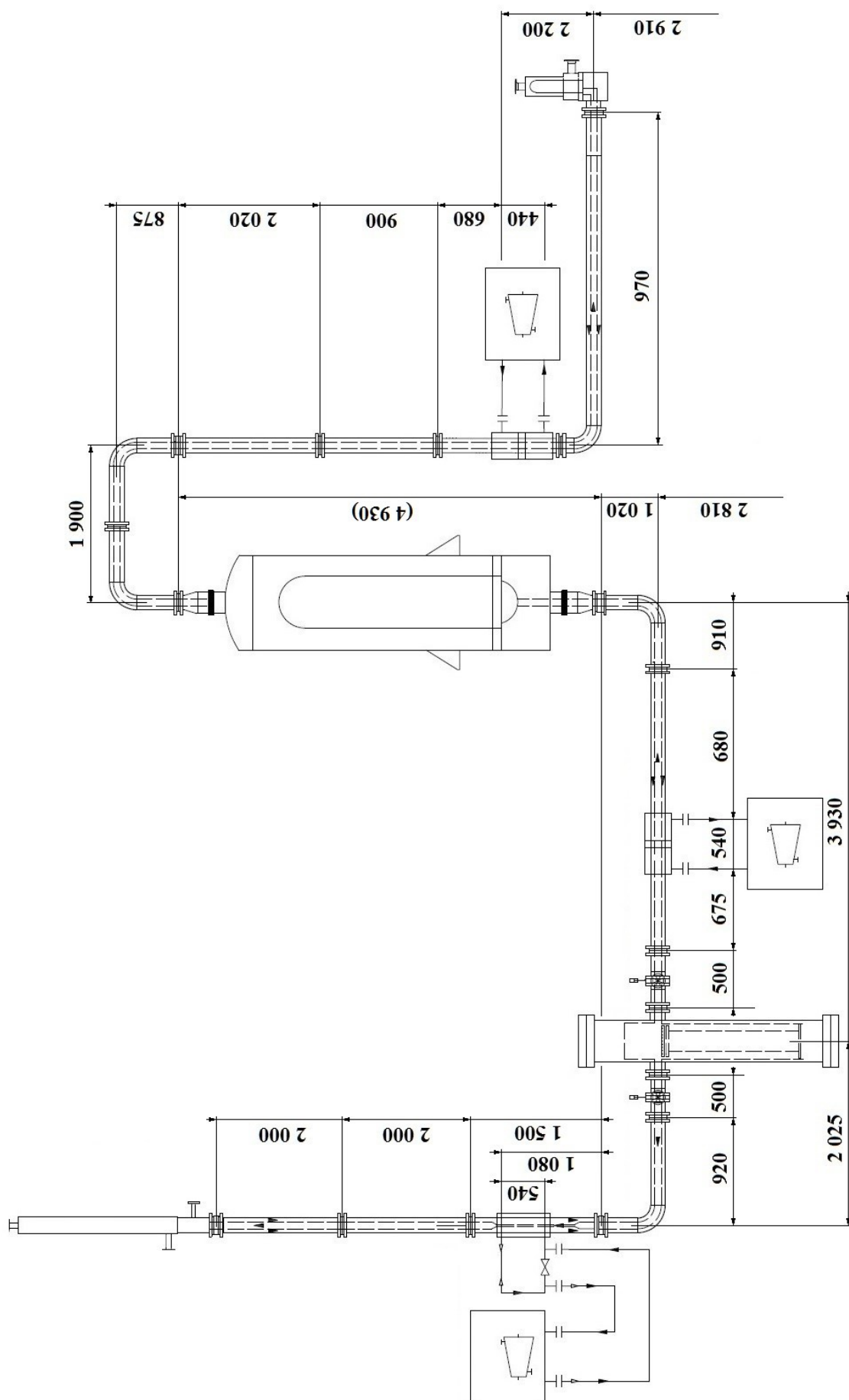


Obr. 19 Koaxiální potrubí-řez

Materiálové vlastnosti vnitřní izolace viz tab. 16.

Tab. 16 Materiálové vlastnosti Promalight 1000X (Promat, 2020)

Promalight 1000X		Hodnota	Jednotky
Hustota		280	kg m ⁻³
Tepelná vodivost	200 °C	0,023	W m ⁻¹ K ⁻¹
	400 °C	0,026	
	600 °C	0,030	
	800 °C	0,036	
Měrná tepelná kapacita	200 °C	860	J kg ⁻¹ K ⁻¹
	400 °C	960	
	600 °C	1 030	
	800 °C	1 070	
Maximální provozní teplota		1 000	°C



Obr. 20 Délkové rozměry koaxiálního potrubí

4.3 Primární výměník tepla

Přestup tepla mezi primárním a sekundárním okruhem (helium-helium) zajišťuje primární výměník tepla. Přívod a odvod helia obou okruhů obstarává koaxiální potrubí (kapitola 4.2). Aparát je konstruován tak, aby měl co nejméně částí, kde dochází k namáhání současně maximálním tlakem a teplotou. Je vybaven vnitřní izolací, která snižuje nežádoucí výměnu tepla a zároveň má chlazenou vnější stěnu díky konstrukčnímu řešení.

Primární helium je přiváděno do spodní části aparátu, kde vstupuje skrze vnitřní trubkovnici do trubkového prostoru, který je tvořen 268 ks TR $\varnothing 10,2 \times 2,3$. Kvůli kompenzaci velkých teplotních dilatací mají trubky U-tvar, navíc jsou v první části vinuté do několikachodé šroubovice, což má navíc vliv i na zintenzivnění přestupu tepla. Trubky vyústí do vnější trubkovnice v dolní části zařízení, odkud ochlazené medium odchází v mezikruží koaxiálního potrubí.

Sekundární helium vstupuje shora a je pomocí usměrňovacích plechů vedeno podél pláště aparátu do jeho spodní části, čímž ho ochlazuje. Ze spodní části přechází do mezitrubkového prostoru, kde je pomocí izolované košile aparátu vedeno v protiproudém režimu. Ohřáté medium je z aparátu odváděno vnitřní trubkou koaxiálního potrubí procházející jádrem primárního výměníku.

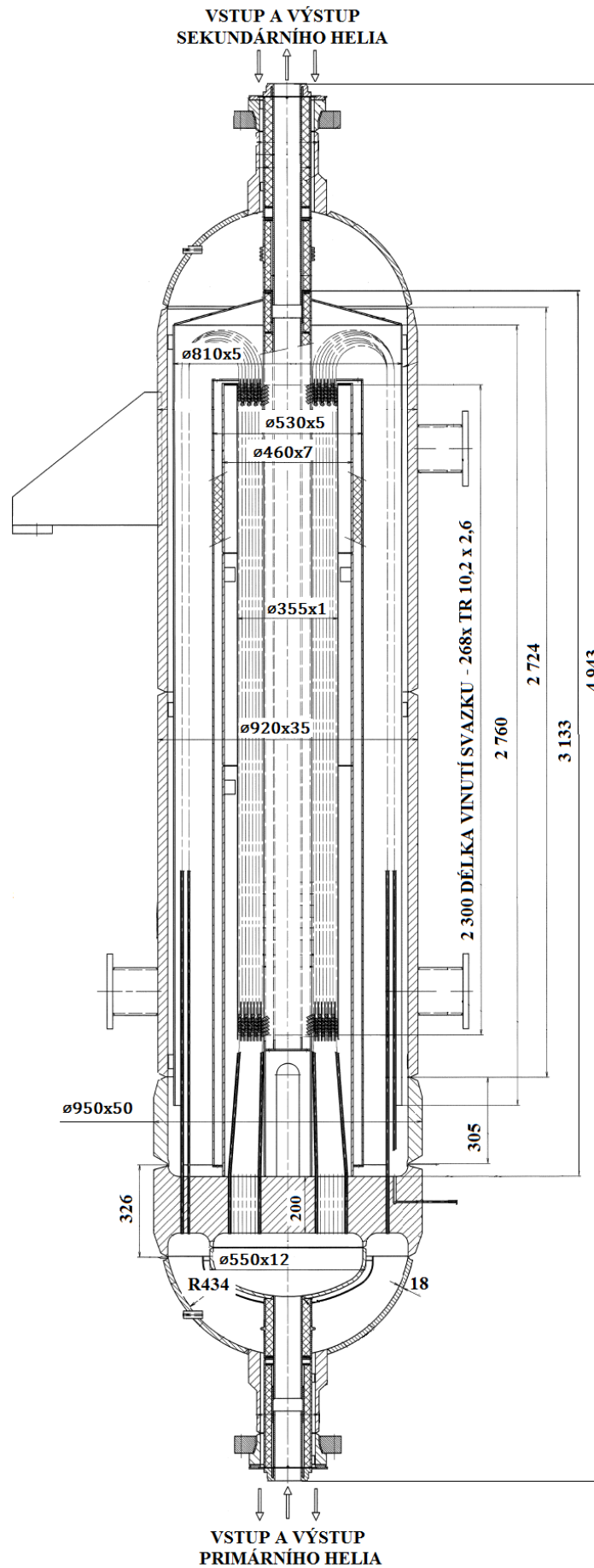
Parametry primárního výměníku tepla jsou shrnuty v tab. 17 a tab. 18, schéma zařízení je poté znázorněno na obr. 21.

Tab. 17: Návrhové parametry primárního výměníku tepla

	Hodnota	Jednotky
Primární strana		
Vstupní teplota	850	°C
Výstupní teplota	445	°C
Tlak	69,5	bar(g)
Tlaková ztráta	50	kPa
Hmotnostní průtok	1 800	kg h ⁻¹
Materiál	SS 1.4959	
Sekundární strana		
Vstupní teplota	365	°C
Výstupní teplota	820	°C
Tlak	65	bar(g)
Tlaková ztráta	40	kPa
Hmotnostní průtok	1 602,7	kg h ⁻¹
Materiál vnitřní izolace	Promalight 1000X	
Materiál	SS 1.4541	
Celkové parametry		
Tepelný výkon	1 052	kW _{th}
Celková teplosměnná plocha	32,54	m ²
Celková hmotnost	6 600	kg

Tab. 18: Parametry primárního výměníku tepla

	Hodnota	Jednotky
Primární strana		
Počet TR $\varnothing 10,2 \times 2,3$	268	
Délka vinutí trubek	2 300	mm
Průměrná délka trubky ve vinutí	4 894	mm
Průměrná rozteč trubek	11,5	mm
Celková délka TR včetně zakončení	~ 10	m
Sekundární strana		
Vnější plášť	$\varnothing 920 \times 35$	mm
Nátok do spodní části	$\varnothing 810 \times 5$	mm
Vnější izolovaná košile aparátu	$\varnothing 530 \times 5$	mm
Tloušťka izolace košile	30	mm
Vnitřní izolovaná košile aparátu	$\varnothing 460 \times 7$	mm
Košile vinutého svazku	$\varnothing 355 \times 1$	mm



Obr. 21 Primární výměník tepla

4.4 Sekundární výměník tepla

Pro přenos tepla mezi sekundárním a terciárním okruhem (helium-voda) byl navržen vertikální výměník s U-trubkami a segmentovými přepážkami v mezitrubkovém prostoru. Přívod a odvod helia zajišťuje koaxiální potrubí (kapitola 4.2). Aparát je navržen pro tlakovou chladicí vodu (5–6 bar(g)), která je přiváděna a odváděna pomocí potrubí DN100. Tlakové medium je použito proto, aby v blízkém okolí vstupu horkého helia nedocházelo k odpařování chladicí vody na stěně aparátu.

Sekundární helium je vedeno do spodní části výměníku tepla, kde vstupuje skrze část trubkovnice do trubkového prostoru, který je tvořen 57 ks TR $\varnothing 16 \times 2,5$. Pro kompenzaci teplotních dilatací mají trubky U-tvar a ústí do druhé části trubkovnice, odkud ochlazené medium odchází v mezikruží koaxiálního potrubí.

Terciární tlaková voda vstupuje do rozšířené části pláště výměníku tepla, odkud je usměrňovacím plechem vedena nad trubkovnici do mezitrubkového prostoru. Zvýšení intenzity přestupu tepla je docíleno pomocí segmentových přepážek, které vytváří kombinované (příčné i podélné) obtékání trubkového svazku.

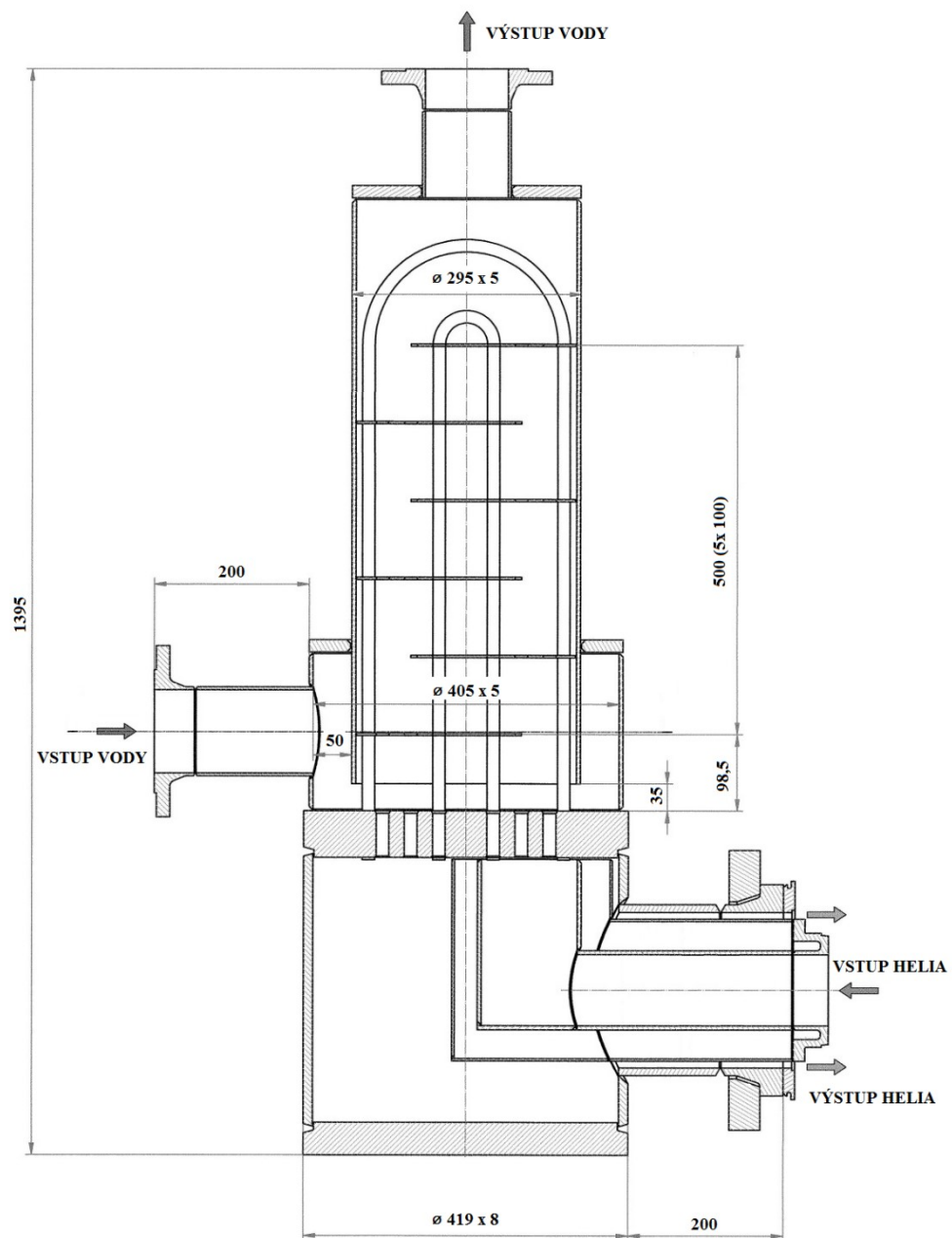
Parametry sekundárního výměníku tepla jsou shrnuty v tab. 19 a tab. 20, schéma zařízení je poté znázorněno na obr. 22 na následující straně.

Tab. 19: Návrhové parametry sekundárního výměníku tepla

	Hodnota	Jednotky
Sekundární strana		
Vstupní teplota	820	°C
Výstupní teplota	360	°C
Tlak	64,5	bar(g)
Tlaková ztráta	13	kPa
Hmotnostní průtok	1 602,7	kg h ⁻¹
Materiál	SS 1.4959	
Terciární strana		
Vstupní teplota	30	°C
Výstupní teplota	45	°C
Tlak	5–6	bar(g)
Tlaková ztráta	60	kPa
Hmotnostní průtok	61 183,7	kg h ⁻¹
Materiál	SS 1.4541	
Celkové parametry		
Tepelný výkon	1 063,4	kW _{th}
Celková teplosměnná plocha	2,901	m ²
Celková hmotnost	506	kg

Tab. 20: Parametry sekundárního výměníku tepla

	Hodnota	Jednotky
Sekundární strana		
Počet TR $\varnothing 16 \times 2,5$	57	
Celková výška svazku	650	mm
Průměrná délka trubek ve svazku	1 588	mm
Průměrná rozteč trubek	21	mm
Uspořádání trubek	trojúhelníkové	
Terciární strana		
Vnější plášť	$\varnothing 295 \times 5$	mm
Počet přepážek výměníku tepla	5	
Vzdálenost přepážek výměníku tepla	100	mm



Obr. 22 Sekundární výměník tepla

4.5 DHR

Nedílnou součástí primární sekce je okruh DHR, který slouží k prověření možností odvodu zbytkového tepla z elektricky vyhřívané topné zóny při haváriích LOCA, SBO atp. Zvláště potom k prověření pasivního odvodu zbytkového tepla pomocí přirozené cirkulace. Systém DHR je jedním z nejdůležitějších bezpečnostních prvků IV. generace typu GFR. Klíčovou roli zde hraje křížový koaxiální ventil (kapitola 4.7), který je řízen pasivně v závislosti na změně tlaku v primárním reaktorovém okruhu.

Za nominálního provozu není okruh aktivně využíván, ventil je tedy uzavřen, ale z důvodu rychlého ustavení přirozené cirkulace v případě potřeby, dochází technickým řešením křížového koaxiálního ventilu k záměně toků helia uvnitř a vně koaxiálního potrubí. Tzn. že chladné helium ze spodní části reaktorové nádoby natéká do mezikruží koaxiální příruby reaktoru, z které je pomocí křížového ventilu vedeno do vnitřní trubky koaxiálního potrubí systému DHR a médium přitékající v mezikruží potrubí okruhu DHR je vedeno do vnitřní trubky reaktorové příruby nad elektricky vyhřívanou topnou zónou. Díky tomuto řešení dochází k cirkulaci helia v systému DHR se zajištěním správného směru proudění pro otevřený stav ventilu. Vzhledem k tomu, že se ze spodní části reaktorové nádoby odvádí chladné helium s relativně malým průtokem, nedochází k výraznému tepelnému ovlivňování primárního okruhu za nominálního provozu.

Systém DHR umožňuje prověřit následující havarijní scénáře zařízení ALLEGRO:

- Odvod tepla přirozenou cirkulací ($p \sim 70$ bar(g))

V případě odstavení reaktoru za situace, kdy je systém stále pod tlakem (např. SBO), dojde k uzavření primárního a otevření křížového ventilu. Helium tedy proudí jen smyčkou DHR, kde z mezikruží koaxiálního potrubí natéká do spodní části reaktorové nádoby, protéká vzhůru topnou zónou kde se ohřívá a odvádí teplo vnitřním potrubím až do výměníku DHR, kde dochází k ochlazení média mezi primárním a terciárním okruhem (helium-voda). Dochází k ustavení přirozené cirkulace, která odvádí ze systému 3 % nominálního tepelného výkonu zóny.

- Odvod tepla přirozenou cirkulací s injektáží těžších plynů ($p = 2,5\text{--}70$ bar(g))

Při odstavení reaktoru za situace, kdy dojde ke snížení tlaku v primárním okruhu (např. LOCA), dojde k uzavření primárního, otevření křížového ventilu a následně injektáží těžšího plynu, např. N_2 do okruhu DHR pro zvýšení hustoty chladícího média. Dochází k ustavení přirozené cirkulace obdobně jako v předchozím případě.

- Odvod tepla nucenou konvekcí ($p = 0\text{--}2,5$ bar(g))

Pokud dojde k odstavení reaktoru za současného snížení tlaku na úroveň atmosférického (např. LOCA), dojde k uzavření primárního, otevření křížového ventilu a systém okamžitě přechází do plně nucené konvekce pomocí kompresoru smyčky DHR s doplňováním chladícího média. Tento stav lze eliminovat umístěním celého primárního okruhu do přetlakové schránky naplněné heliem.

Z podmínek přirozené konvekce vyplývá, že výměník DHR musí být v dostatečné výšce nad úrovní reaktoru pro překonání tlakových ztrát systému.

4.5.1 Výměník DHR

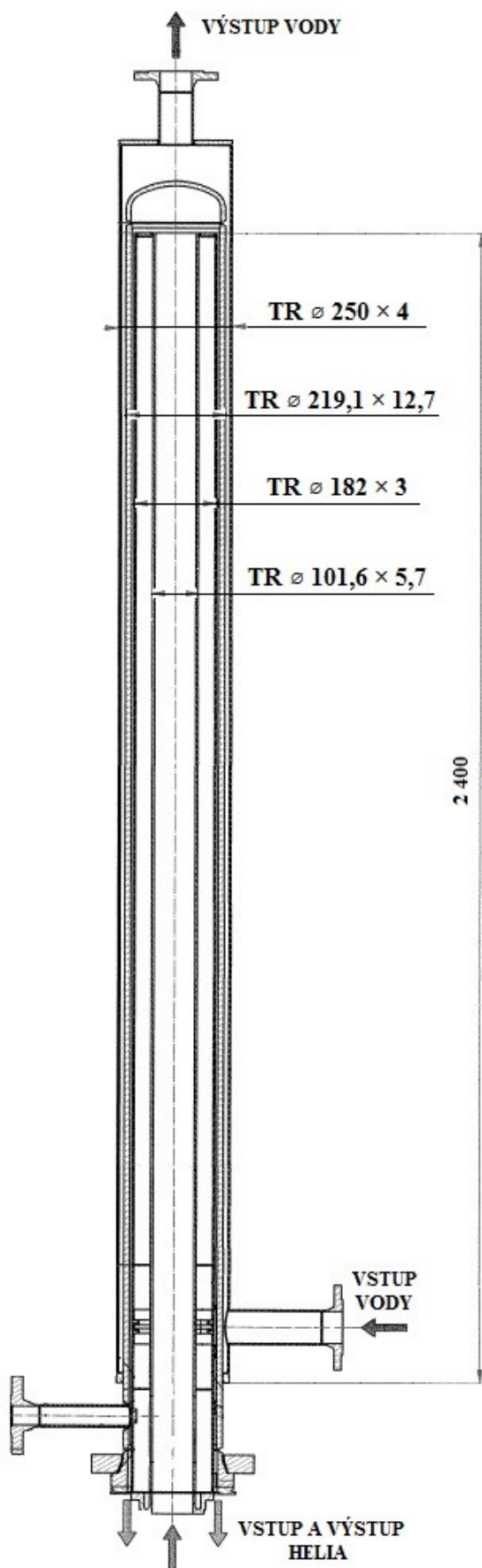
Zajišťuje přenos tepla mezi primárním a terciárním okruhem (helium-voda). Helium natéká do horní části výměníku DHR vnitřní izolovanou trubkou a vrací se zpět v mezikruží. Chladicí voda natéká do spodní části a protiproudě obtéká mezikruží horké větve. Parametry výměníku DHR jsou shrnuty v tab. 21 a tab. 22. Schéma aparátu je znázorněno na obr. 23.

Tab. 21 Návrhové parametry výměníku DHR

	Hodnota	Jednotka
Primární strana		
Vstupní teplota	850	°C
Výstupní teplota	190	°C
Tlak	69,5	bar(g)
Tlaková ztráta	60	Pa
Hmotnostní průtok	49,32	kg h ⁻¹
Terciární strana		
Vstupní teplota	30	°C
Výstupní teplota	45	°C
Tlak	5–6	bar(g)
Tlaková ztráta	3 000	Pa
Hmotnostní průtok	19 075,5	kg h ⁻¹
Materiál	SS 1.4541	
Celkové parametry		
Tepelný výkon	47	kW _{th}
Celková teplosměnná plocha	1,556	m ²

Tab. 22 Parametry výměníku DHR

	Hodnota	Jednotky
Primární strana		
Vnitřní trubka	TR \varnothing 101,6 \times 5,7	mm
Tloušťka vnitřní izolace	35	mm
Ohraničení izolace	TR \varnothing 182 \times 3	mm
Vnější část	TR \varnothing 219,1 \times 12,7	mm
Činná délka	2 400	mm
Materiál vnitřní izolace	Promalight 1000X	
Materiál	SS 1.4845	
Terciární strana		
Vnější plášť	\varnothing 250 \times 4	mm
Materiál	SS 1.4541	



Obr. 23 Výměník DHR

4.6 Kompresory

4.6.1 Turbokompresor S-ALLEGRO

Je horizontální, jednorotorové zařízení uložené v aerodynamických ložiskách, které využívají přímo pracovního média, takže nepotřebují přívod externího tlakového plynu. Turbokompresor (TC) je vybaven dvěma stupni. První je pracovní a tvoří ho axiálně radiální kolo bez krycího disku s tangenciálním výstupem. S ohledem na očekávané vysoké pracovní teploty je vyrobené z titanu. Druhý stupeň slouží k cirkulaci helia v tzv. RCC (Rotor Cooling Circuit) pro zlepšení chlazení stroje. RCC okruh je navržen pro cirkulaci 5 % jmenovitého průtoku pracovním stupněm a společně s vodním chlazením spirální skříně odvádí ze systému 6,5 kW_{th}. TC S-ALLEGRO je na smyčce aplikován v podobě dvou identických zařízení (primární a sekundární kompresor), ale každý z nich pracuje v jiném nominálním bodě (viz tab. 23). TC zajišťují nucenou cirkulaci v okruzích a byly dodány na míru přímo pro potřeby experimentálního provozu smyčky S-ALLEGRO firmou ATEKO a.s. Pohon zajišťují asynchronní motory s výkonem 16,5 kW, nominálním kroutícím momentem 2 N m a maximálními otáčkami 76 000 min⁻¹.

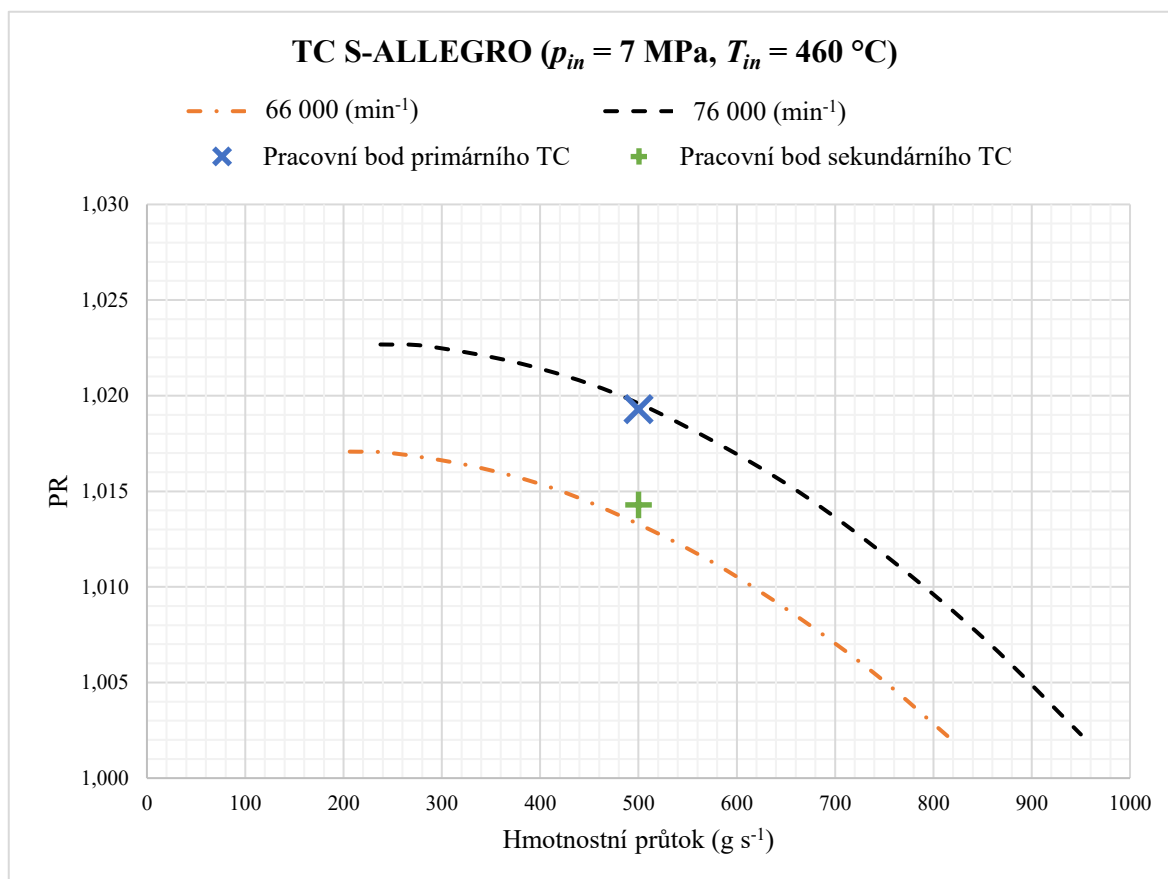
Tab. 23 Návrhové parametry TC S-ALLEGRO

	Hodnota	Jednotka
Primární TC		
Vstupní teplota	460	°C
Vstupní tlak	70	bar
Stlačení	1,35	bar
Hmotnostní průtok	1 800	kg h ⁻¹
Otáčky	76 000	min ⁻¹
Adiabatická účinnost	69	%
Sekundární TC		
Vstupní teplota	460	°C
Vstupní tlak	70	bar
Stlačení	1	bar
Hmotnostní průtok	1 800	kg h ⁻¹
Otáčky	66 000	min ⁻¹
Adiabatická účinnost	68	%
Celkové parametry		
Výkon asynchronního motoru	16,5	kW
Kroutící moment	2	N m
Maximální otáčky	76 000	min ⁻¹
Vodní chlazení + RCC	6,5	kW _{th}

Výrobce dodané teoretické kompresorové charakteristiky byly pomocí bezrozměrných vztahů přepočteny na pracovní charakteristiky (tab. 24), které jsou společně s naměřenými nominálními pracovními body vyznačeny na obr. 24.

Tab. 24 Data pro charakteristiku TC S-ALLEGRO

66 000 (min ⁻¹)			76 000 (min ⁻¹)	
Hmotnostní průtok (g s ⁻¹)	PR		Hmotnostní průtok (g s ⁻¹)	PR
206,25	1.017073		237,5	1.022676
247,5	1.017005		285	1.022585
330	1.016325		380	1.021681
412,5	1.015169		475	1.020144
495	1.013402		570	1.017793
577,5	1.011226		665	1.014901
660	1.008505		760	1.011287
742,5	1.005376		855	1.007132
825	1.001722		950	1.002284



Obr. 24 Kompresorová charakteristika TC S-ALLEGRO

4.6.2 Turbokompresor DHR

Je vertikální TC s rotorem uloženým v aerodynamických ložiskách (dvě radiální, jedno axiální). Vzhledem k nízkému výkonu je rotor dostatečně chlazený vířením helia v oblasti pohonu. Stator je chlazený vodním okruhem. Zařízení slouží primárně k rychlejšímu náběhu systému při nájězdu zařízení, jinak se využívá jen pro případy chlazení nucenou konvekcí, více viz kapitola 4.5. TC byl dodán na míru přímo pro potřeby experimentální provozu smyčky S-ALLEGRO firmou ATEKO a.s. (návrhové parametry tab. 25). Pohon zajišťuje vysokootáčkový asynchronní stroj s výkonem 0,7 kW, nominálním kroutícím momentem 0,045 N m a maximálními otáčkami 150 000 min⁻¹.

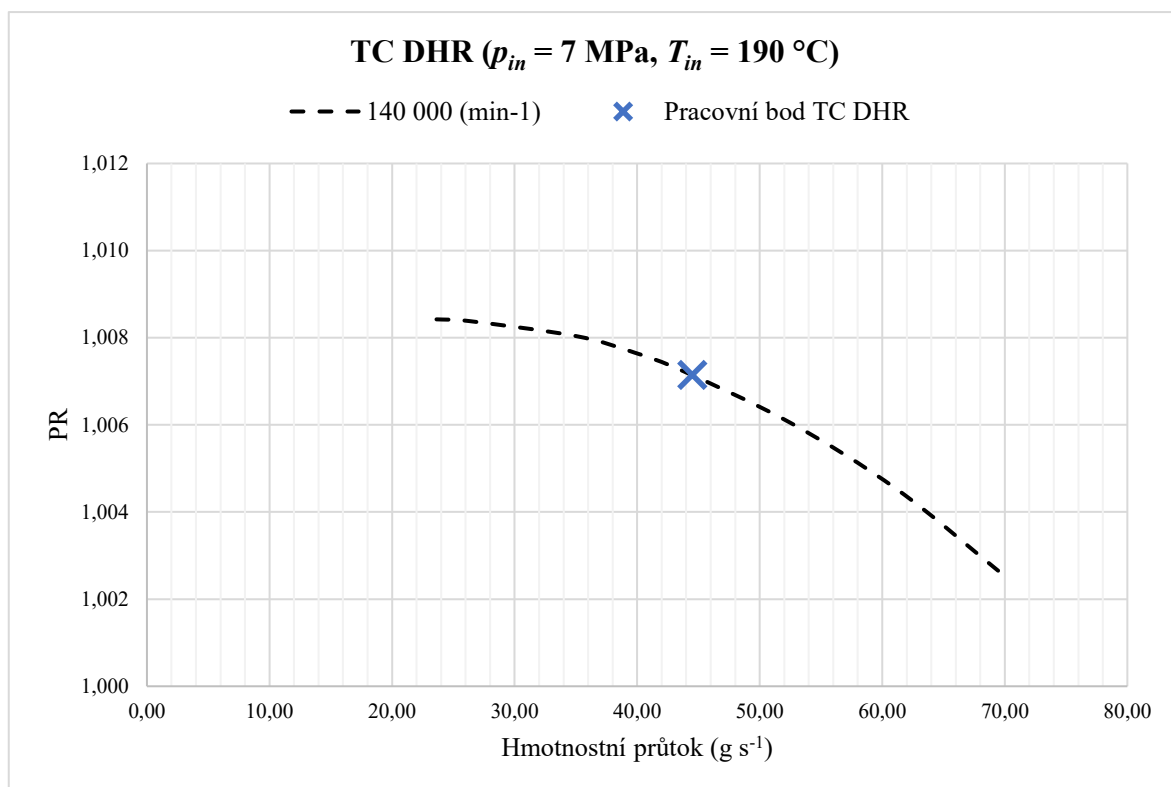
Tab. 25 Návrhové parametry TC DHR

	Hodnota	Jednotka
TC DHR		
Vstupní teplota	190	°C
Vstupní tlak	70	bar
Stlačení	0,5	bar
Hmotnostní průtok	160,2	kg h ⁻¹
Otáčky	140 000	min ⁻¹
Celkové parametry		
Výkon asynchronního motoru	0,7	kW
Kroutící moment	0,045	N m
Maximální otáčky	150 000	min ⁻¹

Výrobce dodaná teoretická kompresorová charakteristika byla pomocí bezrozměrných vztahů přepočtena na pracovní charakteristiku (tab. 26), která je společně s naměřeným nominálním pracovním bodem vyznačená na obr. 25.

Tab. 26 Data pro charakteristiku TC DHR

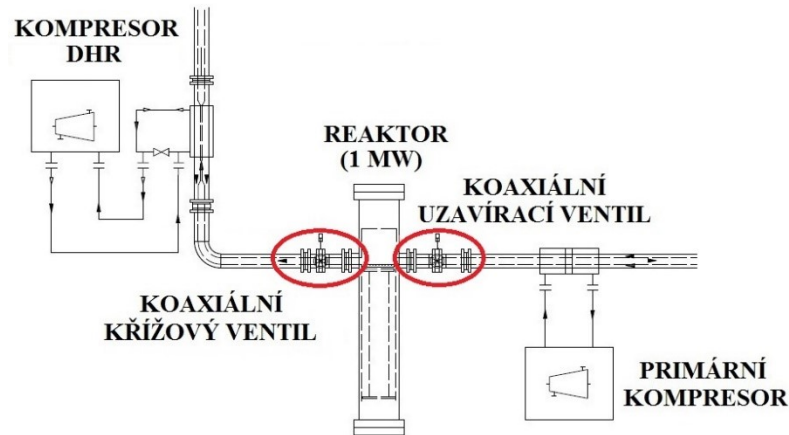
140 000 (min ⁻¹)	
Hmotnostní průtok (g s ⁻¹)	PR
23,63	1,008422
26,25	1,008384
35,00	1,008039
39,81	1,007656
43,75	1,007235
52,50	1,006048
61,25	1,004510
70,00	1,002527



Obr. 25 Kompresorová charakteristika TC DHR

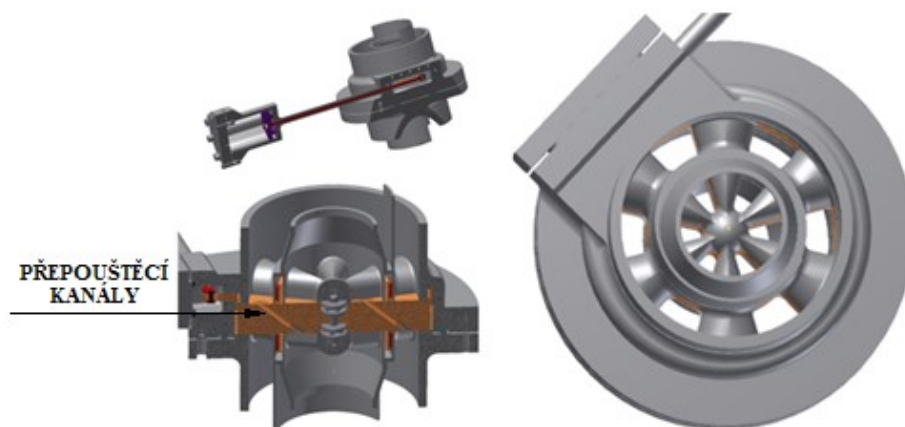
4.7 Ventily

Součástí smyčky jsou i dva hlavní koaxiální ventily, které jsou umístěny na přírubách reaktorové nádoby, tedy na primárním okruhu a okruhu DHR (obr. 26).



Obr. 26 Umístění ventilů na smyčce

Oba aparáty obsahují příčný diskový element s kruhovými výsečemi, který je větší než průměr vnějšího potrubí a zasahuje tak do průtočného průřezu obou větví daného potrubí. Disk je uložen ve statoru pomocí ložisek, což mu umožňuje vykonávat rotační pohyb a uzavírat (respektive otevírat) průtočné výsečové plochy statoru. Teplá a studená větev je ve ventilech oddělená pomocí labyrintové ucpávky. Křížový ventil se od uzavíracího odlišuje jen přepouštěcími kanály (viz obr. 27), které umožňují křížení toku v nominálním provozu. Oba ventily jsou součástí pasivního bezpečnostního systému, jsou tedy řízeny pasivně na základě změny tlaku v primárním okruhu v důsledku např. LOCA, nebo vyřazení oběhových cirkulátorů kvůli např. SBO (více v kapitole 4.5). Ventily byly navrženy a vyrobeny CVŘ.



Obr. 27 Vizualizace koaxiálního křížového ventilu

4.8 Izolace smyčky S-ALLEGRO

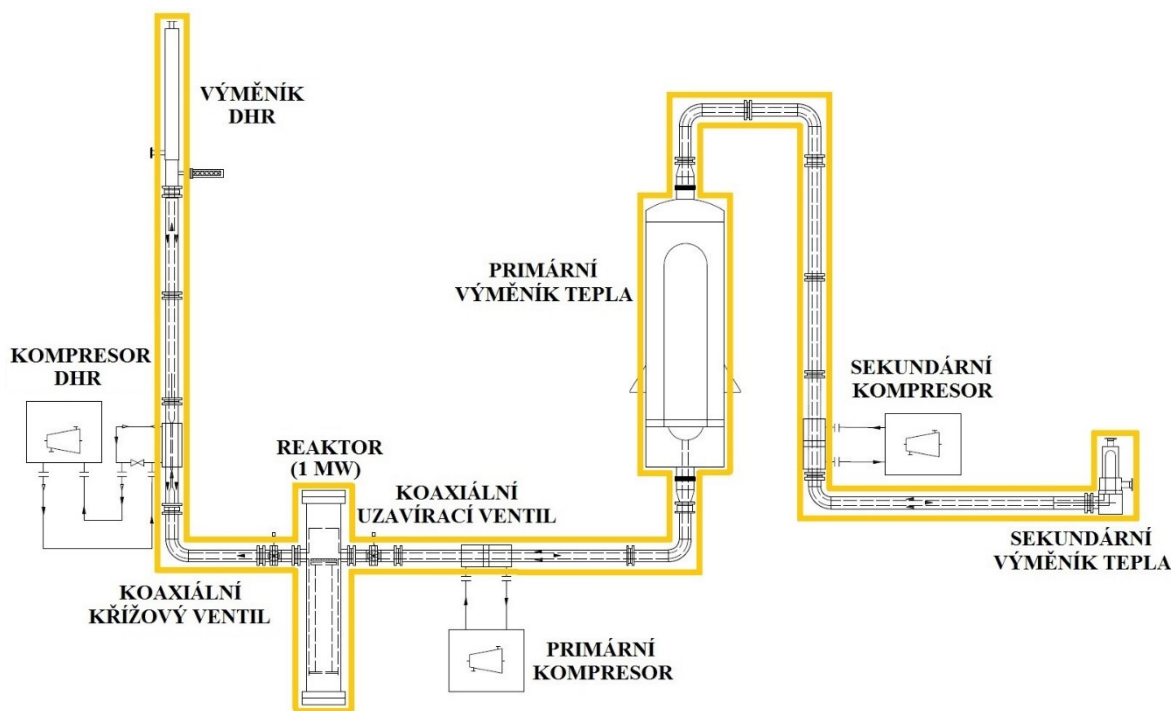
Pro minimalizaci tepelných ztrát do okolního prostředí jsou hlavní okruhy a komponenty (obr. 28) izolovány kombinací dvou izolačních vrstev z různých materiálů, každá o tloušťce 100 mm. Materiálové vlastnosti v tab. 27 a tab. 28.

Tab. 27 Materiálové vlastnosti Fiberfrax Durablanket S160 (Fiberfrax[®], nedatováno)

Fiberfrax Durablanket S160		Hodnota	Jednotky
Hustota		160	kg m ⁻³
Tepelná vodivost	600 °C	0,11	W m ⁻¹ K ⁻¹
	800 °C	0,16	
	1 000 °C	0,21	
Měrná tepelná kapacita	1 000 °C	1 140	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Maximální provozní teplota		1 250	°C

Tab. 28 Materiálové vlastnosti ProRox WM 950 ALU (ProRox[®], 2018)

ProRox WM 950 ALU		Hodnota	Jednotky
Hustota		80	kg m ⁻³
Tepelná vodivost	50 °C	0,039	W m ⁻¹ K ⁻¹
	200 °C	0,062	
	400 °C	0,112	
	640 °C	0,213	
Měrná tepelná kapacita		840	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Maximální provozní teplota		640	°C
Maximální povrchová teplota		80	°C



Obr. 28 Izolované části smyčky S-ALLEGRO

5 Software Dymola

V rámci této závěrečné kvalifikační práce je pro tvorbu termohydraulického modelu smyčky S-ALLEGRO použito komerčního nástroje Dymola 2021 (Dynamic Modeling Laboratory) vyvinutého společností Dassault Systèmes[®]. Nástroj je sice k dispozici i v trial verzi, ale ta je omezena složitostí vytvářeného modelu a umožňuje použití nanejvýš jedné externí funkce. Dymola je vhodným nástrojem pro modelování dynamického chování různých komplexních fyzikálních systémů s podporou hierarchického uspořádání. Využívá modelovacího jazyku volně dostupné platformy Modelica. Metodika modelování je tedy založena na objektově orientovaném zápisu rovnic, tzn. že uživatel nedefinuje přímo matematické operace, ale jen fyzikální rovnice popisující zkoumaný jev. Tímto způsobem lze vytvořit tzv. bloky (komponenty) pro blokově orientované modelování, kdy uživatel v grafickém prostředí vytváří v podstatě PFD (Process Flow Diagram) systému z předem připravených komponent. Mezi výhody nástroje Dymola patří dle slov vývojářů následující (Dassault Systèmes[®], 2020):

- Používá symbolických metod pro rychlejší generování výpočetního kódu.
- Rychlejší modelování pomocí grafického zobrazení bloků.
- Široký výběr volně dostupných i komerčních knihoven.
- Uživatelsky otevřený pro tvorbu vlastních knihoven v grafickém i textovém editoru.
- Otevřené prostředí pro jiné software a programovací jazyky (např. Python, Java).
- Možnost exportu kódu použitím FMI (Functional Mockup Interface).
- Podpora kompletního procesu, tzn. modelování, simulace i analýza výsledků.

Dymola, respektive Modelica, umožňuje řešit např. ODE (obyčejné diferenciální rovnice), DAE (diferenciální algebraické rovnice), FSA (Finite State Automata) aj. V případě řešení ODE využívá kompilace kódu Modelica do programovacího jazyku C pomocí vývojového prostředí Microsoft Visual Studio (konkrétně verze 2019). Následně dochází rovnou k řešení systému pomocí zvolené předdefinované numerické integrační metody. K dispozici jsou algoritmy s proměnnou (tab. 29) i pevně nastavenou (tab. 30) velikostí integračního kroku. V rámci řešení a zrychlení integrace DAE využívá Dymola kombinace symbolického a numerického přístupu. Tzn. že do DAE jsou symbolicky vloženy metody jako jsou např. explicitní/implicitní Euler, Runge Kutta atp. Následně dochází ke kompilaci a řešení pomocí numerické integrace. (Dassault Systèmes[®], 2011) (The Modelica Association, 2019)

Pro účely řešení závěrečné práce (ODE) je využito numerické integrace algoritmem ESDIRK, který je dle Dassault Systèmes[®] (nedatováno) nejvíce vhodný pro komplexní modely, navíc umožňuje řešit i tzv. stiff systémy.

Tab. 29 Metody s proměnným integračním krokem (Dassault Systèmes®, 2011)

Algoritmus	Řád metody	Stiff	Stabilní	Metoda
LSODAR	1–12 1–5	Ano	Ne	Víceková, Adamsova
DASSL	1–5	Ano	Ne	Víceková, BDF
Radau	1–5	Ano	Ano	Jednokrová, Runge Kutta
Esdirk	3 4 5	Ano	Ano	Jednokrová, Runge Kutta
Dopri	5 8	Ne	N/A	Jednokrová, Runge Kutta
Sdirk	4	Ano	Ano	Jednokrová, Runge Kutta
Cerk	3 4 5	Ne	N/A	Jednokrová, Runge Kutta

Tab. 30 Metody s fixním integračním krokem (Dassault Systèmes®, 2011)

Algoritmus	Řád metody	Stiff	Stabilní	Metoda
Euler	1	Ne	Ne	Eulerova metoda
Rkfix	2 3 4	Ne	Ne	Jednokrová, Runge Kutta

6 Přehled používaných komponent

Pro účely modelování je použita komerční knihovna ClaRa⁺, která se dle distributora LTX Simulation GmbH (2019) zaměřuje na vytváření modelů průmyslových elektráren, řídicích center, organických Rankinových cyklů a kotlů s přirozenou cirkulací. Knihovna, fyzicky vyvíjena společnostmi XRG Simulation GmbH a TLK-Thermo GmbH, sestává ze čtyř základních balíčků:

- TSMedia – knihovna termofyzikálních vlastností látek.
- ClaRaPlus – knihovna základních komponent elektráren a modelů pro výpočet tlakových ztrát i přenosu tepla.
- ClaRa_DCS – knihovna pro tvorbu řídicích systémů.
- ClaRa_Grid – knihovna pro modelování rozvodové elektrické sítě.

Ke knihovně ClaRaPlus existuje i volně dostupná alternativa s názvem ClaRa, která byla používána v začátcích společně s knihovnou TILMedia (termofyzikální vlastnosti látek). Obě knihovny jsou od stejných vývojářů ClaRa⁺, (XRG Simulation GmbH a TLK-Thermo GmbH). V CVŘ je používána komerční knihovna hlavně z důvodu oficiální podpory, pokročilejších modelů turbostrojů. Také proto, že knihovna TSMedia definuje některé plyny (včetně helia) jako VLE (Vapor-Liquid Equilibrium), což umožňuje používání komponent pro VLE a zohledňování působení gravitačního zrychlení na plynné médium. Ve volně dostupných knihovnách jsou plyny striktně definovány jako Gas a vzhledem k obecně nízkým hustotám plynů se v nich toto chování neuvažovalo.

Dále je využívána volně dostupná knihovna Modelica, která obsahuje základní modely především pro matematické modelování. Tato knihovna je implementována přímo do nástroje Dymola.

Cílem této kapitoly je popis jednotlivých komponent používaných v modelech v souvislosti se smyčkou S-ALLEGRO. Jedná se o 1D přístup modelování, tzn. že distribuce veličin se vztahuje jen ke směru proudění, který je v práci značen x . Model poté popisuje ideálně promíchaný objemový prvek s přenosem tepla, značený indexem i . Prítok (odtok) odpovídá odtoku (přítoku) předchozího (následujícího) prvku, tzn. že musí být splněné podmínky zachování hmoty v soustavě. Počet prvků ve směru x je značen n .

Pro popis jednotlivých komponent bylo využito oficiální dokumentace, která je součástí daných knihoven, bohužel ale není kompletní. Velkou roli zde tedy hraje i znalost a orientace v samotném kódu s nutností případných úprav definic parametrů.

6.1 Externí definice parametrů

Z důvodu eliminace možného vzniku uživatelských chyb (např. překlepů) a zároveň redukce časové náročnosti při definování vstupních parametrů do jednotlivých komponent, je většina hodnot zadávána externě, respektive pomocí odkazů do dalších bloků. Ukázkovým příkladem je komponenta SimCenter (obr. 29) z knihovny ClaRaPlus, která obsahuje základní fyzikální definice systému jako jsou okolní teplota, tlak, vlhkost, používaná média atp. Nespornou výhodou takového řešení je, že pokud více komponent využívá stejný parametr (např. médium) nemusí se při změně přepisovat údaj v každé z nich na nový, ale jen ve zmíněném SimCenter.



Obr. 29 Ikona SimCenter

V rámci dalšího zefektivnění zadávání hodnot systému, konkrétně nominálního průtoku, tlaku, enthalpie (teploty), tlakové ztráty třením a inicializačních podmínek, byla vytvořena komponenta (např. obr. 30) obsahující matici těchto parametrů pro větší celek modelu. Kupříkladu v případě obr. 30 obsahuje blok všechny výše uvedené parametry pro definování celého primárního okruhu smyčky. Data se do této komponenty vkládají rovnou v podobě matice. Pro tyto účely byl vytvořen výpočtový sešit v MS Excel, který po zadání geometrických a fyzikálních parametrů (použité médium, zkoumaný tlak a teplota) vypíše všechna potřebná data vhodně uspořádaná do tabulky pro export do matice. Proces zadávání parametrů se tak značně urychluje oproti manuální změně v každé komponentě zvlášť. Nevýhodou takového řešení je samozřejmě nutnost dodržení topologie modelu, respektive pozic prvků dané matice.



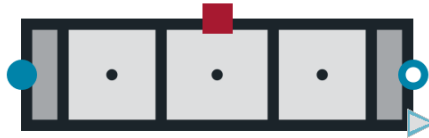
Obr. 30 Externí definice parametrů systému

Napevno jsou v jednotlivých komponentách definovány jen ty hodnoty, u kterých se předpokládá jejich neměnnost (např. geometrické specifikace nebo modely pro výpočet přenosu tepla, či tlakových ztrát).

6.2 Objemové komponenty

6.2.1 PipeFlowVLE_L4_Simple

Komponenta PipeFlowVLE_L4_Simple (obr. 31) z knihovny ClaRaPlus slouží k definici objemu média válcového tvaru a umožňuje výpočet proudění při zohlednění přestupu tepla na vnější ploše objemu. V modelu je používána pro popis objemu média vnitřního potrubí primárního i sekundárního okruhu, trubkových částí výměníků a průtočné části elektricky vyhřívané topné zóny.



Obr. 31 Ikona PipeFlowVLE_L4_Simple

Model zohledňuje zákon zachování hmoty řešením hmotnostní bilance pro všechny kontrolní objemy i dle vztahu (1).

$$\frac{d\rho_i}{dt} V_i = \dot{m}_{in,i} + \dot{m}_{out,i} \quad (1)$$

Zachování hybnosti s uvažováním stacionární rovnováhy, působení gravitačního zrychlení na médium a třecích tlakových ztrát, které jsou počítány pomocí uživatelem zvoleného modelu pro každý kontrolní objem i viz rovnice (2).

$$p_{in,i} = p_i + \rho_i g \Delta x_i + \Delta p_{fric,i} \quad (2)$$

Modelů pro výpočet třecí tlakové ztráty obsahuje knihovna ClaRaPlus hned několik. V této práci je využit model QuadraticNominalPoint_L4, který z definovaného nominálního stavu tlakové ztráty dopočítává bezrozměrný ztrátový součinitel ζ (3) (Darcy-Weisbach), který následně používá pro výpočty $\Delta p_{fric,i}$ v nových stavech systému.

$$\zeta = \frac{2 \Delta p_{fric,nom} D_H}{\rho_{nom} u_{mean}^2 L} \quad (3)$$

Pro výpočet nominálních tlakových ztrát třením, respektive Darcy-Weisbach ztrátového součinitele, bylo pro většinu komponent použito explicitní vyjádření Colebrook-White rovnice v podobě Swamee-Jain (1976) dle vztahu (4). Nominální hodnoty byly dopočítány v MS Excel.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D_H}{3,7} + \frac{2,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

$$5\,000 < Re < 5 \times 10^7$$

$$1 \times 10^{-5} < \varepsilon/D_H < 0,04$$

Hodnota absolutní drsnosti ε byla stanovena ze zadání na 0,015 mm pro celé zařízení.

V rovnici zachování energie (5) uvažuje model příchozí, odchozí toky enthalpie a transport tepelné energie do okolí pro každý kontrolní objem i .

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{\dot{m}_{in,i}(h_{in,i} - h_i) + \dot{m}_{out,i}(h_{out,i} - h_i) + V_i \frac{dp}{dt} + \dot{Q}_i}{m_i} \quad (5)$$

Hodnota \dot{Q}_i se počítá dle vztahu (6).

$$\dot{Q}_i = \alpha_i A_i dT \quad (6)$$

Pro výpočet konvektivního přestupu tepla má ClaRaPlus několik různých modelů. Pro účely závěrečné práce je použito modelu NusseltPipe_L4, který v první řadě počítá hodnoty Reynoldsova (7) a Prandtlova čísla (8).

$$Re_{D,i} = \frac{u_{mean,i} D_H}{\nu_i} \quad (7)$$

$$Pr_i = \frac{\nu_i}{a_i} \quad (8)$$

Pokud je hodnota $Re < 2200$ řeší proudění jako laminární. Pro tento režim má model k dispozici rovnou 4 volitelné stavy. Zahrnují plně vyvinuté nebo nevyvinuté proudění s konstantní teplotou stěny nebo konstantním tepelným tokem.

Plně vyvinuté proudění s konstantní teplotou stěny (9).

$$Nu_i = \left\{ 3,66^3 + 0,7^3 \left[\left(1,615 Re_i Pr_i \frac{D_H}{L_i} \right)^{1/3} - 0,7 \right]^3 \right\}^{1/3} \quad (9)$$

Nevyvinuté proudění s konstantní teplotou stěny (10).

$$Nu_i = \left\{ 3,66^3 + 0,7^3 \left[\left(1,615 Re_i Pr_i \frac{D_H}{L_i} \right)^{1/3} - 0,7 \right]^3 + \left(\frac{2}{1 + 22 Pr_i} \right)^{1/6} \left(Re_i Pr_i \frac{D_H}{L_i} \right)^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (10)$$

Plně vyvinuté proudění s konstantním tepelným tokem (11).

$$Nu_i = \left\{ 4,364^3 + 0,6^3 \left[\left(1,953 Re_i Pr_i \frac{D_H}{L_i} \right)^{1/3} - 0,6 \right]^3 \right\}^{1/3} \quad (11)$$

Nevyvinuté proudění s konstantním tepelným tokem (12).

$$Nu_i = \left\{ 4,364^3 + 0,6^3 \left[\left(1,953 Re_i Pr_i \frac{D_H}{L_i} \right)^{1/3} - 0,6 \right]^3 + 0,924 Pr_i^{1/3} \left(Re_i \frac{D_H}{L_i} \right)^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (12)$$

Pokud je hodnota $Re > 10\,000$ počítá model proudění jako turbulentní. Výpočet se i zde odvíjí dle uživatelem nastavitelného parametru. Jedná se o výběr mezi korelacemi pro přestup tepla Gnielinski (13) nebo Dittus and Boelter (14).

$$\text{Nu}_{D,i} = \frac{\left(\frac{f_i}{8}\right) (\text{Re}_{D,i} - 1000) \text{Pr}_i}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (\text{Pr}_i^{2/3} - 1)}$$

$$f = (0,79 \ln \text{Re}_{D,i} - 1,64)^{-2}$$

$$3\,000 \leq \text{Re}_D \leq 5e^6$$

$$0,5 \leq \text{Pr} \leq 2\,000$$
(13)

Pro korelaci Dittus and Boelter (14) lze navíc měnit i parametry C a m , které jsou jinak pro tento vztah definovány jako $C = 0,023$ a $m = 0,8$. Možnost změnit tyto parametry propůjčuje modelu NusseltPipe_L4 variabilitu v podobě aplikace vlastních korelačních vztahů získaných např. pomocí CFD analýzy nebo z naměřených dat. Čehož je využito při modelování elektricky vyhřívané topné zóny v kapitole 7.3.1 a v kapitolách věnující se modelování výměníků tepla (kapitoly 7.2 a 7.3.4).

$$\text{Nu}_{D,i} = C \text{Re}_{D,i}^m \text{Pr}_i^{1/3}$$

$$\text{Re}_D \geq 10\,000$$

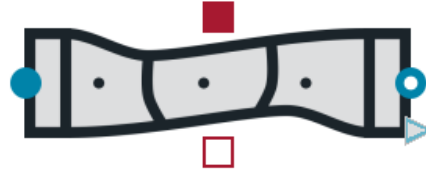
$$0,6 \leq \text{Pr} \leq 160$$

$$\frac{L}{D} \geq 10$$
(14)

Pro přechodnou oblast využívá model interpolace mezi laminárním a turbulentním režimem. Výhodou NusseltPipe_L4 zároveň je, že při výpočtu kontroluje splnění všech zadaných podmínek platnosti použitých korelačních vztahů. Pokud dané podmínky splněny nejsou, výpočet se ukončí s varovným upozorněním.

6.2.2 ShellFlowVLE_L4

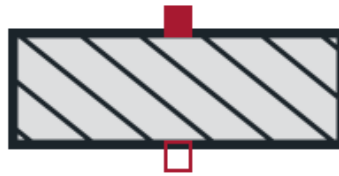
Komponenta ShellFlowVLE_L4 (obr. 32) vznikla v rámci spolupráce CVŘ a XRG Simulation GmbH. Slouží k definici geometrie válcového tvaru a umožňuje výpočet proudění v mezikruží (případně v plášti trubkového výměníku). Dále umožňuje zohlednění přestupu tepla na vnitřní i vnější straně objemu. ShellFlowVLE_L4 vychází z komponenty PipeFlowVLE_L4 uvedené v předchozí kapitole 6.2.1. Fyzikální chování je tedy shodné, jen došlo k upravám vztahů vzhledem ke geometrii. V modelu je komponenta používána pro popis objemu média vnějšího potrubí primárního i sekundárního okruhu, mezitrubkových částí výměníků a sestupné šachty reaktoru.



Obr. 32 Ikona ShellFlowVLE_L4

6.2.3 CylindricalThinWall_L4

CylindricalThinWall_L4 (obr. 33) je modelem válcové stěny v knihovně ClaRaPlus. Definuje použitý materiál a geometrii stěn všech aparátů a potrubí.



Obr. 33 Ikona CylindricalThinWall_L4

Řeší akumulaci vnitřní energie (15) a bilanci energie mezi vnitřní a vnější plochou (16).

$$U_i = T_i \rho_i \frac{\pi}{4} (d_{outer}^2 - d_{inner}^2) L_i c_{p_i} \quad (15)$$

$$\frac{dU_i}{dt} = \dot{Q}_{inner} + \dot{Q}_{outer} \quad (16)$$

Kde \dot{Q}_{inner} vychází ze vztahu (17). Analogicky tomu je definován i vztah pro \dot{Q}_{outer} (18).

$$\dot{Q}_{inner,i} = \frac{\lambda_i 2\pi L_i}{\ln \left[\frac{d_{outer} + d_{inner}}{2 d_{inner}} (T_{inner,i} - T_i) \right]} \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{outer,i} = \frac{\lambda_i 2\pi L_i}{\ln \left[\frac{2 d_{outer}}{d_{outer} + d_{inner}} (T_{outer,i} - T_i) \right]} \quad (18)$$

6.3 Kompresory

6.3.1 PumpVLE_L1_affinity

Knihovna ClaRaPlus sice v rámci turbostrojů obsahuje i kompresor, ale ten je použitelný jen pro média typu Gas, navíc v rovnicích využívá vztahy pro ideální plyny. Z důvodu působení gravitačních sil na médiu se v modelu uvažuje helium ve formě VLE, proto bylo z počátku namísto kompresoru použito čerpadlo PumpVLE_L1_affinity (obr. 34). Komponenta ze své podstaty neumožňuje řešení stlačitelného proudění, ale byla používána jen pro první stacionární modely a to po úpravě řídicí rovnice do podoby pístového stroje (tzn. udržovala v systému nastavený průtok v závislosti na otáčkách). Pro finální použití v modelu je toto řešení nedostačující.



Obr. 34 Ikona PumpVLE_L1_affinity

PumpVLE_L1_affinity předpokládá stacionární bilanci hmoty (19).

$$0 = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{out} \quad (19)$$

Stacionární bilanci hybnosti k modelování výstupního tlaku čerpadla (20).

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (20)$$

Bilance energie (21), kde účinnost pístového stroje byla definována $\sim 70\%$.

$$h_{out} = \frac{(h_{iso,out} - h_{iso,in})}{\eta} + h_{iso,in} \quad (21)$$

Chování dle upravené řídicí rovnice (22).

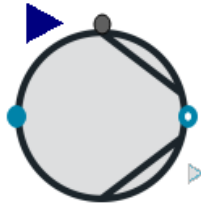
$$\dot{V} = \dot{V}_{max} \frac{n}{n_{nom}} \quad (22)$$

Kde hodnota \dot{V}_{max} odpovídá požadovanému průtoku při nominálních otáčkách.

Tento model byl použit při modelování obtoku elektricky vyhřívané zóny v kapitole 7.1.

6.3.2 Compressor_CVR

Model Compressor_CVR (obr. 35) vznikl v CVŘ kvůli nedostatkům knihovny ClaRaPlus popsaných v předchozí kapitole 6.3.1. Nová komponenta pracuje se stlačitelnými, reálnými plyny a umí adekvátně reagovat na změny v systému dle kompresorové charakteristiky.



Obr. 35 Ikona Compressor_RealGas

Komponenta využívá bezrozměrných charakteristik k výpočtu nového pracovního bodu ze známých hodnot T_{in} , p_{in} , n , p_{out} (výtlak p_{out} je definován tlakovou ztrátou systému) a fyzikálních vlastností média. Compressor_CVR je navržen dle ASME (1998) a pracuje s teorií podobnosti bezrozměrných čísel (23).

$$\chi = \frac{h_{iso,out} - h_{in}}{n^2}$$

$$\Phi = \frac{\dot{V}_{in}}{n} \tag{23}$$

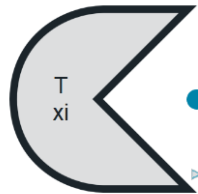
$$\Sigma = \frac{h_{iso,out} - h_{iso,in}}{n^2} = \frac{P}{n^2 \dot{m}}$$

Předpokladem platnosti modelu je zachování Machova čísla, Reynoldsova čísla, Poissonovy konstanty a poměrů hustot výtlaku/sání. (ASME, 1998)

6.4 Okrajové podmínky systému

6.4.1 BoundaryVLE_pTxi

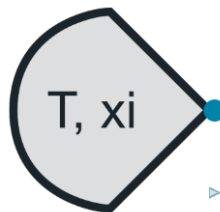
BoundaryVLE_pTxi (obr. 36) z ClaRaPlus, definuje vstupní parametry zvoleného média pro daný model. Umožňuje nastavení jeho tlaku, teploty i složení v podobě konstanty, případně časové proměnné v datovém typu reálných čísel ve spojení například s komponentou TimeTable, která je popsána v kapitole 6.5.2.



Obr. 36 Ikona BoundaryVLE_pTxi

6.4.2 BoundaryVLE_Txim_flow

BoundaryVLE_Txim_flow (obr. 37) z ClaRaPlus, definuje výstupní parametry zvoleného média pro daný model. Umožňuje nastavení hmotnostního toku, teploty i složení jako konstanty, případně časové proměnné ve spojení s TimeTable.



Obr. 37 Ikona BoundaryVLE_Txim_flow

6.4.3 PrescribedHeatFlow

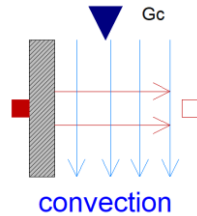
PrescribedHeatFlow (obr. 38) z ClaRaPlus, umožňuje přivádět do systému teplo pomocí datového typu reálných čísel. Stejně jako v předchozích případech v podobě konstanty nebo časové proměnné.



Obr. 38 Ikona PrescribedHeatFlow

6.4.4 Convection

Convection (obr. 39) z knihovny Modelica umožňuje sdílení tepla s okolním prostředím dle rovnice (24), kde Gc značí veličinu konvekční tepelné vodivosti ($W K^{-1}$), která vychází ze vztahu (25). Vstup hodnot Gc a teploty okolí do komponenty je v podobě konstanty, případně časové proměnné v datovém typu reálných čísel. Convection je použita pro odvod tepla z vnějších stěn smyčky do okolního prostředí.



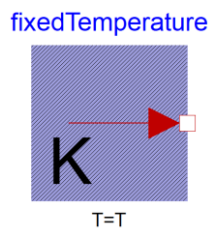
Obr. 39 Ikona Convection

$$\dot{Q}_i = Gc \Delta T_i \quad (24)$$

$$Gc = \alpha A \quad (25)$$

6.4.5 FixedTemperature

Komponenta FixedTemperature obr. 40 z knihovny Modelica definuje na výstupním portu konstantní teplotu v Kelvinech. V modelu se využívá pro definici konstantní teploty okolního prostředí na vnějších stěnách, která je adekvátně definována dle měření na ~ 20 °C.

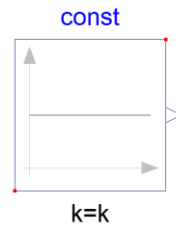


Obr. 40 Ikona fixedTemperature

6.5 Ostatní komponenty

6.5.1 Constant

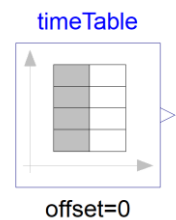
Blok Constant (obr. 41) z knihovny Modelica generuje signál datového typu reálných čísel. Jelikož je smyčka umístěna v hale, je model použit pro definici konstantní hodnoty G_c v komponentě Convection, kde je uvažována konstantní přirozená konvekce. Dle zkušeností z CFD analýz je součinitel přestupu tepla nastaven na hodnotu $\alpha = 4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.



Obr. 41 Ikona Constant

6.5.2 TimeTable

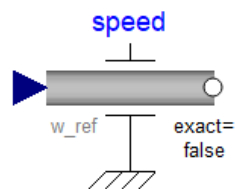
Komponenta TimeTable (obr. 42) z knihovny Modelica generuje signál datového typu reálných čísel v podobě lineární interpolace definovaných dat v tabulce, čehož je v modelu využito pro aplikaci časových proměnných (např. změna otáček, výkonu atp.)



Obr. 42 Ikona TimeTable

6.5.3 Speed

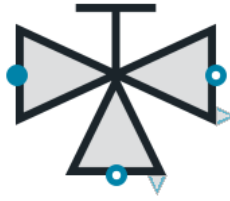
Blok Speed (obr. 43) z knihovny Modelica definuje nucený rotační pohyb hřídele v závislosti na vstupním signálu v podobě úhlové rychlosti v datovém typu reálných čísel, opět v podobě konstanty nebo časově proměnné. Model slouží pro definici otáček použitých turbostrojů.



Obr. 43 Ikona Speed

6.5.4 ThreeWayValveVLE_L1_simple

ThreeWayValveVLE_L1_simple (obr. 44) umožňuje isoenthalpické rozdělení toku.



Obr. 44 Ikona ThreeWayValveVLE_L1_simple

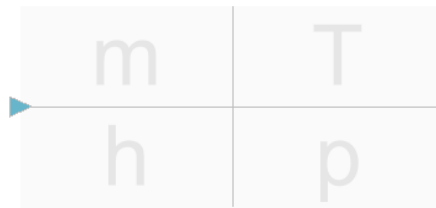
Dělení toku se řídí vztahem (26) při zachování stacionární bilance hmoty (27). SplitRatio se definuje v podobě konstanty, případně časové proměnné, v datovém typu reálných čísel.

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out,1} \text{ SplitRatio} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{in} + \dot{m}_{out,1} + \dot{m}_{out,2} = 0 \quad (27)$$

6.5.5 Quadruple

Komponenta Quadruple (obr. 45) umožňuje pomocí datového vstupu zobrazovat aktuální výsledky simulace jednotlivých komponent během výpočtu přímo v grafickém prostředí modelu. Po skončení simulace uchovává poslední vypočtené hodnoty.



Obr. 45 Ikona Quadruple

7 Termohydraulický model smyčky S-ALLEGRO

V této kapitole bude popsán výpočetní model smyčky S-ALLEGRO, sestavený z jednotlivých komponent představených v předchozí kapitole 6, případně z upravených komponent. Dále budou prezentovány výsledky výpočtů vybraných stavů smyčky, které budou dále porovnány s experimentálními daty, případně s návrhovými výpočty od výrobce ATEKO a.s. Bude tedy možné vyhodnotit schopnost modelu predikovat chování reálného zařízení.

V první fázi byl sestaven model zařízení pro účely jeho validace na experimentálních datech, získaných v roce 2019. Při tomto provozu byl aktivní primární, sekundární a terciární okruh, DHR smyčka byla uzavřena. Z naměřených dat bylo zjištěno neobvyklé chování smyčky, kdy teplota horké větve dosahovala výrazně nižší teploty než teplota nad elektricky vyhřívanou topnou zónou. Z bilance tepelné energie bylo zjištěno, že v primárním koaxiálním potrubí dochází k mísení proudů z chladnější do teplejší větve. Analýza tohoto stavu je popsána v kapitole 7.1.

Další výpočetní analýzy se věnují validaci modelu primárního a sekundárního výměníku tepla na několika ustálených stavech. Výsledky modelů jsou opět porovnávány s experimentálními daty odměřených během kampaně v roce 2019.

Třetí aktivita se věnuje modelování nominálního stavu celého systému. Vzhledem k tomu, že prozatím nejsou k dispozici experimentální data pro nominální stav smyčky, výsledky modelu jsou porovnávány s návrhovými výpočty dodavatele zařízení ATEKO a.s.

7.1 Stanovení obtoku elektricky vyhřívané zóny

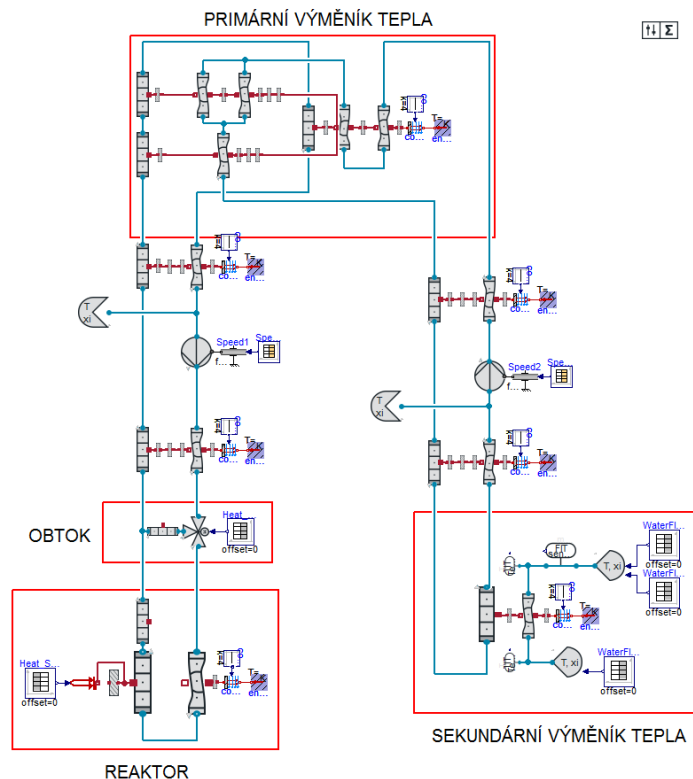
V první fázi experimentálního provozu smyčky byly vybrány dva stacionární stavy primárního okruhu, které jsou definovány v tab. 31.

Tab. 31 Měření obtoku v primárním okruhu

Parametry	Měření 1	Měření 2	Jednotka
Tepelný výkon zóny	0,11	0,129	MW
Teplota nad zónou	400	500	°C
Nominální tlak	4,04	3,45	MPa
Hmotnostní průtok	0,196	0,21	kg s ⁻¹

Ze získaných experimentálních dat S-ALLEGRO bylo ve stacionárních stavech zjištěno nestandardní chování smyčky, které bylo vyhodnoceno jako obtok reaktorové nádoby. V důsledku tedy elektricky vyhřívanou topnou zónou procházela jen část průtoku primárního chladiva, zbytek média recirkuloval z chladnější do teplejší větve a nazpět do primárního výměníku. Hodnota obtoku byla stanovena z experimentálních dat pomocí energetické bilance aparátu reaktoru (z měření je známý výkon reaktoru a rozdíl vstupní/výstupní teploty média). Přesné místo obtoku z měřených dat nelze lokalizovat, ale jednalo se o část primárního potrubí mezi kompresorem a reaktorovou nádobou. Pravděpodobně tedy k obtoku docházelo kvůli netěsnosti spoje koaxiálního primárního potrubí, labyrintové ucpávky koaxiálního uzavíracího ventilu nebo špatně řešené záslepky jedné z přírub reaktorové nádoby.

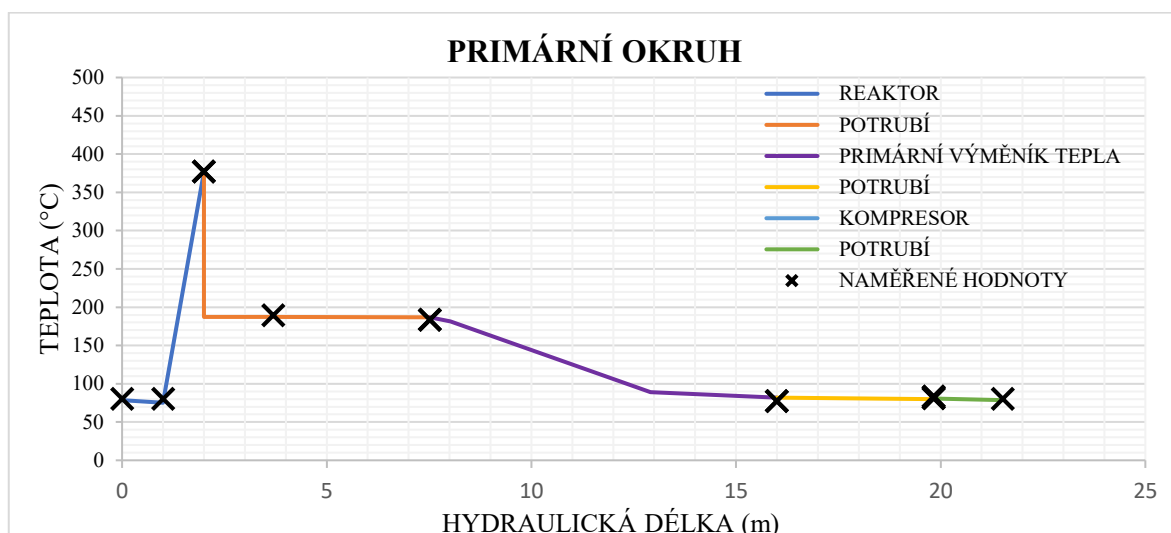
Účelem následujícího výpočetního modelu bylo stanovit za jakých podmínek by byl možný obtok topné zóny přes labyrint ucpávky koaxiálního ventilu. Z naměřených hodnot byl tedy inverzně dopočítán a sestaven zjednodušený stacionární model zařízení (obr. 46).



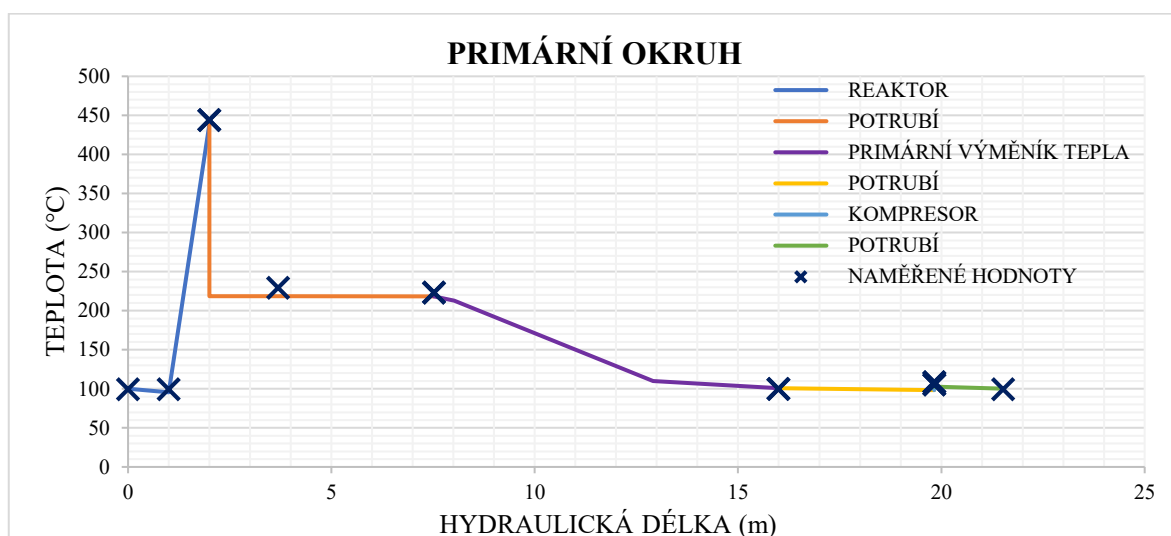
Obr. 46 Simulace obtoku topné zóny

Dle disertační práce Lourens Joubert (2003) byl proveden výpočet labyrintové ucpávky, respektive modifikace její konstrukční radiální vůle takovým způsobem, aby při změřené tlakové ztrátě reaktoru odpovídala tepelná bilance, respektive průtok média skrz labyrint. Z výpočtu vyplynulo, že by radiální vůle labyrintové ucpávky musela být namísto konstrukčních 0,2 mm více než dvojnásobná, konkrétně 0,475 mm. To je velice nepravděpodobné a problém obtoku bude tedy nejspíše nastávat z jiného důvodu. Plánuje se prověření špatného těsnění zaslepení nepoužívaných přírub implementací lokálních teplotních čidel.

Vyhodnocení výsledků modelu a obou experimentů je znázorněno na obr. 47 pro měření 1, respektive obr. 48 pro měření 2. Měřená hodnota po smísení proudů je na horizontální ose posunuta, protože se na smyčce nenachází žádné reaktoru bližší teplotní čidlo a v modelu je obtok umístěný hned na výstupu z reaktoru. Z průběhů lze vidět, že vypočtené hodnoty jsou ve velmi dobré shodě s experimentálními daty a v tomto případě tedy model dokáže předpovídat reálné chování zařízení. Je však nutno dodat, že pro validační výpočty byl detekovaný obtok v modelu nastaven manuálně na základě naměřených dat, což napomohlo k dosažení příznivých výsledků modelu při modelování této části primárního okruhu.



Obr. 47 Porovnání výpočetního modelu a měření 1

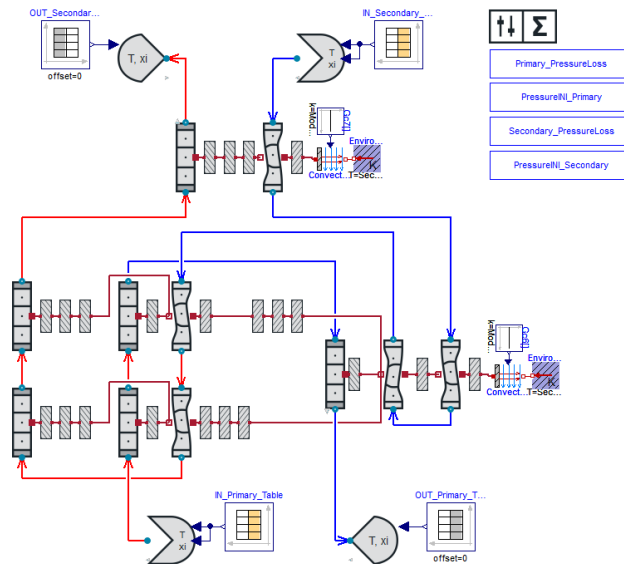


Obr. 48 Porovnání výpočetního modelu a měření 2

7.2 Validace primárního a sekundárního výměníku tepla

Další část experimentální kampaně zařízení S-ALLEGRO byla zaměřena na získávání naměřených dat pro ověření návrhu výměníků tepla smyčky S-ALLEGRO a pro možnosti validace výpočetních modelů. Během kampaně, která trvala zhruba 100 hodin, bylo získáno 20 ustálených stavů, ze kterých byly pro účely validace výpočetních modelů vybrány 4.

Byl vytvořen výpočetní model primárního výměníku tepla (obr. 49).



Obr. 49 Model primárního výměníku tepla

Pro výpočet tlakových ztrát třením, respektive Darcy-Weisbach ztrátového součinitele, bylo použito rovnice Swamee-Jain (1976) dle vztahu (4). Tlaková ztráta primární strany výměníku tepla byla napočítána pro nominální parametry na hodnotu 45 500 Pa. Při výpočtu byl zanedbán vliv vinutí trubkového svazku. Stejně tak i u výpočtu Nusseltova čísla, které je v modelu počítáno pomocí vztahu Gnielinski (13), který je platný jen pro přímé potrubí.

Pro mezitrubkový prostor primárního výměníku tepla je tlaková ztráta z důvodu komplikovanosti geometrie nastavena dle návrhové hodnoty od dodavatele ATEKO a.s., tedy 40 000 Pa pro nominální parametry aparátu. Pro Nusseltovo číslo na straně trubek je použit vztah dodaný taktéž dodavatelem aparátu viz (28). V tomto případě je v modelu využito možnosti změny koeficientů Dittus and Boelter viz kapitola 6.2.1

$$Nu = 0,06 Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad (28)$$

Pro vnější stranu objemu mezitrubkového prostoru je aplikováno vztahu Gnielinski (13).

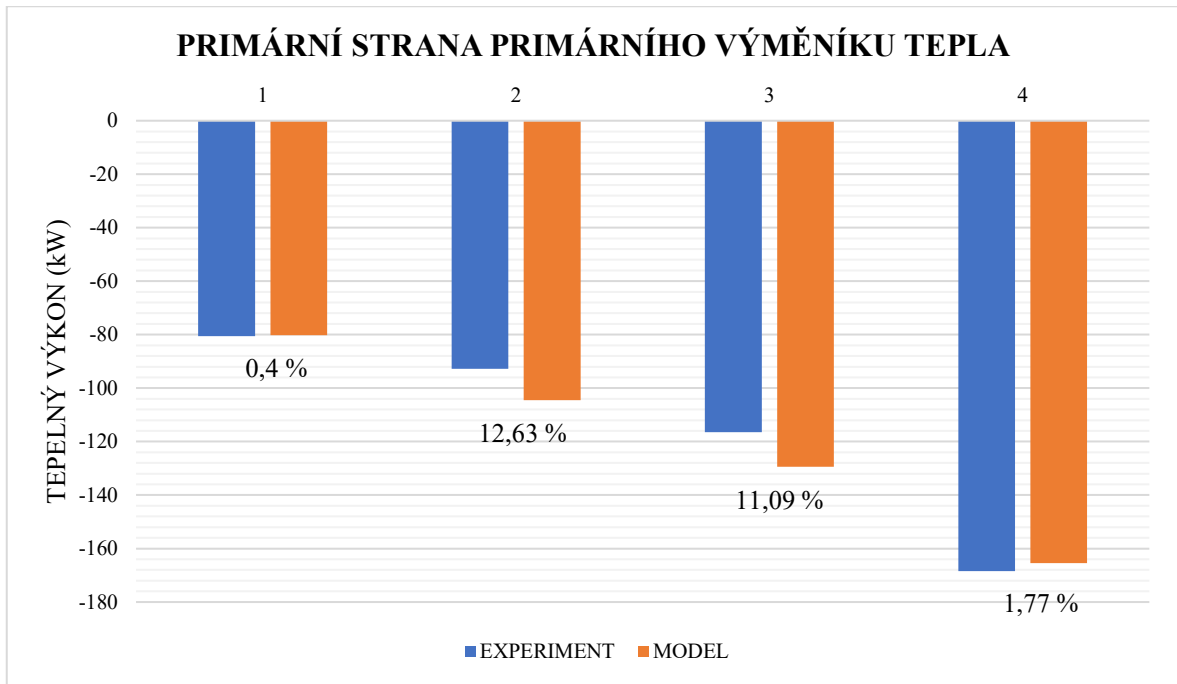
Naměřená data pro jednotlivé stavy primárního výměníku tepla jsou shrnuta v tab. 32 pro primární stranu a v tab. 33 pro stranu sekundární. Pro validaci modelu byla použita naměřená vstupní data, která se definovala jako okrajové podmínky. Následně došlo k porovnání výstupních dat modelu s výsledky experimentů na obr. 50 a obr. 51.

Tab. 32 Primární strana primárního výměníku tepla

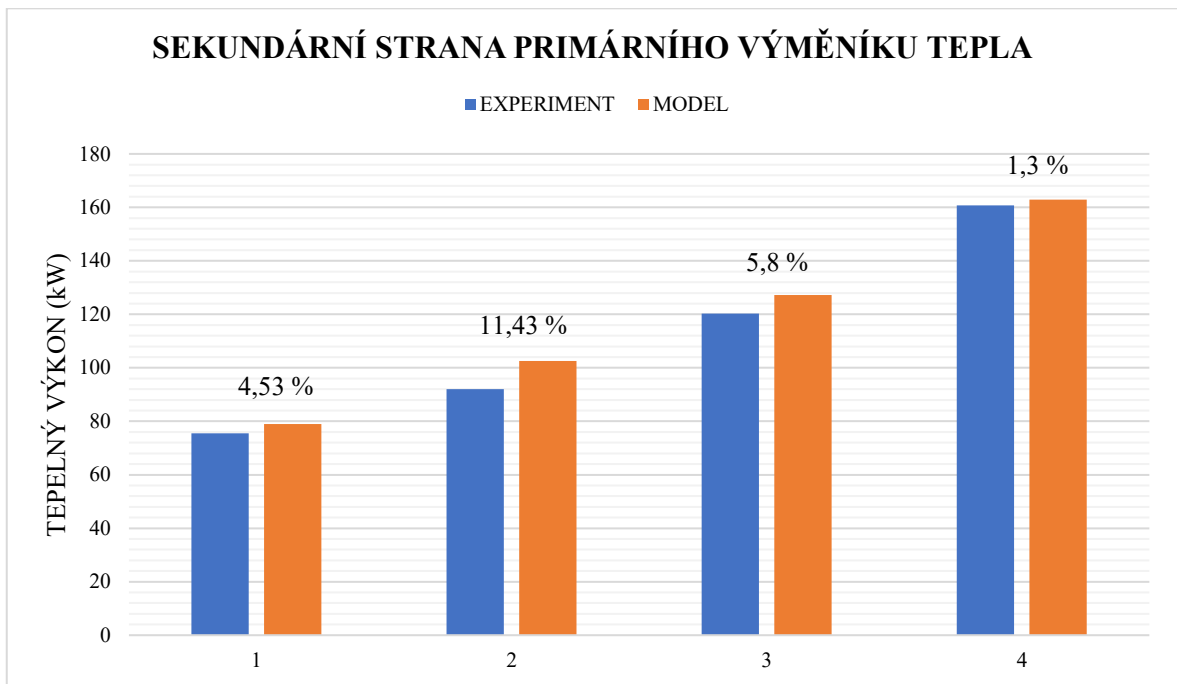
Primární strana primárního výměníku tepla					
Stavy	Vstupní data			Výstupní data	
	T (°C)	p (MPa)	\dot{m} (kg s⁻¹)	Experiment T (°C)	Model T (°C)
1	141,81	3,109	0,2232	72,35	72,62
2	129,62	3,037	0,2467	57,22	48,08
3	164,91	3,110	0,2222	63,92	52,73
4	273,66	3,583	0,2447	141,08	143,43

Tab. 33 Sekundární strana primárního výměníku tepla

Sekundární strana primárního výměníku tepla					
Stavy	Vstupní data			Výstupní data	
	T (°C)	p (MPa)	\dot{m} (kg s⁻¹)	Experiment T (°C)	Model T (°C)
1	44,13	3,144	0,197	117,95	121,29
2	48,57	2,998	0,4973	84,23	88,30
3	53,41	3,052	0,4992	99,80	102,50
4	69,49	3,709	0,1918	230,94	233,05



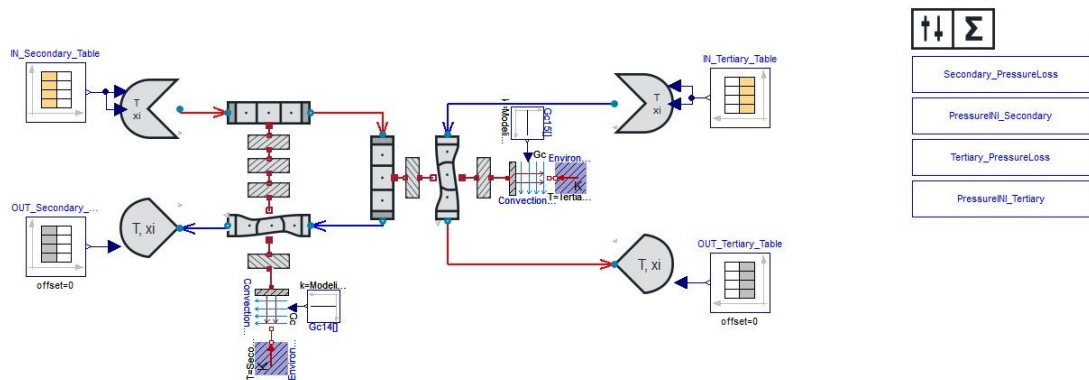
Obr. 50 Srovnání výsledků primární strany primárního výměníku tepla



Obr. 51 Srovnání výsledků sekundární strany primárního výměníku tepla

Z výsledků validace primárního výměníku tepla vyplývá, že pro současný model dosáhla maximální odchylka výpočtů předaného tepla od experimentálních dat hodnoty 12,63 %, avšak průměrná hodnota pro výše uvedené stavy pouze 6,12 %. Dle srovnání tepelných výkonů se výsledky jeví jako uspokojivé, ale z hlediska výstupních teplot je rozdíl zásadní. Především na primární straně výměníku pro stacionární stav 2 a 3, kde rozdíl teplot dosahuje hodnot 9,14 °C pro stav 2, respektive 11,19 °C pro stav 3. Zdrojem této odchylky může být vyšší rychlost proudění média následovaná neplatností korelace Nusseltova čísla pro danou geometrii a podmínky měření.

Následně byl vytvořen výpočtový model sekundárního výměníku tepla (obr. 52).



Obr. 52 Model sekundárního výměníku tepla

Pro sekundární výměník tepla byly napočítány tlakové ztráty i Nusseltova čísla pomocí vytvořeného MS Excel dle vztahů uvedených v práci Západní Michiganské univerzity, která pojednává o výpočtech U-trubkových výměníků (WMU, nedatováno). Výsledné korelace byly poté implementovány do modelu v systému Dymola.

Celková tlaková ztráta sekundární strany výměníku tepla byla pro nominální parametry napočítána na hodnotu 16 950 Pa. Při výpočtu byla zahrnuta i místní tlaková ztráta v podobě změny směru toku (viz geometrie kapitola 4.4) pomocí konstanty (29) (iPotrubi, 2015).

$$\zeta_{os}(90^\circ) = 1,15 \quad (29)$$

Pro snazší implementaci výpočtu Nusseltova čísla dle vztahů WMU do vytvořeného modelu, bylo pomocí MS Excel s doplňkem „Řešitel“ nalezeno řešení rovnice o dvou neznámých ve tvaru (30). K nalezení hodnot bylo použito minimalizace kvadrátu chybové odchylky pro řešené fyzikální vlastnosti média a různé průtoky. Bylo stanoveno $C = 0,0227$ a $m = 0,7905$, což jsou mj. hodnoty dosti blízké konstantám vztahu Dittus and Boelter (14).

$$Nu = C Re^m Pr^{1/3} \quad (30)$$

V mezitrubkovém prostoru byla pomocí vztahů WMU stanovena tlaková ztráta 72 830 Pa. Korelace pro Nusseltovo číslo byla stanovena obdobně jako v předchozím případě. V rozsahu měřených parametrů bylo stanoveno, že $C = 0,553$ a $m = 0,555$.

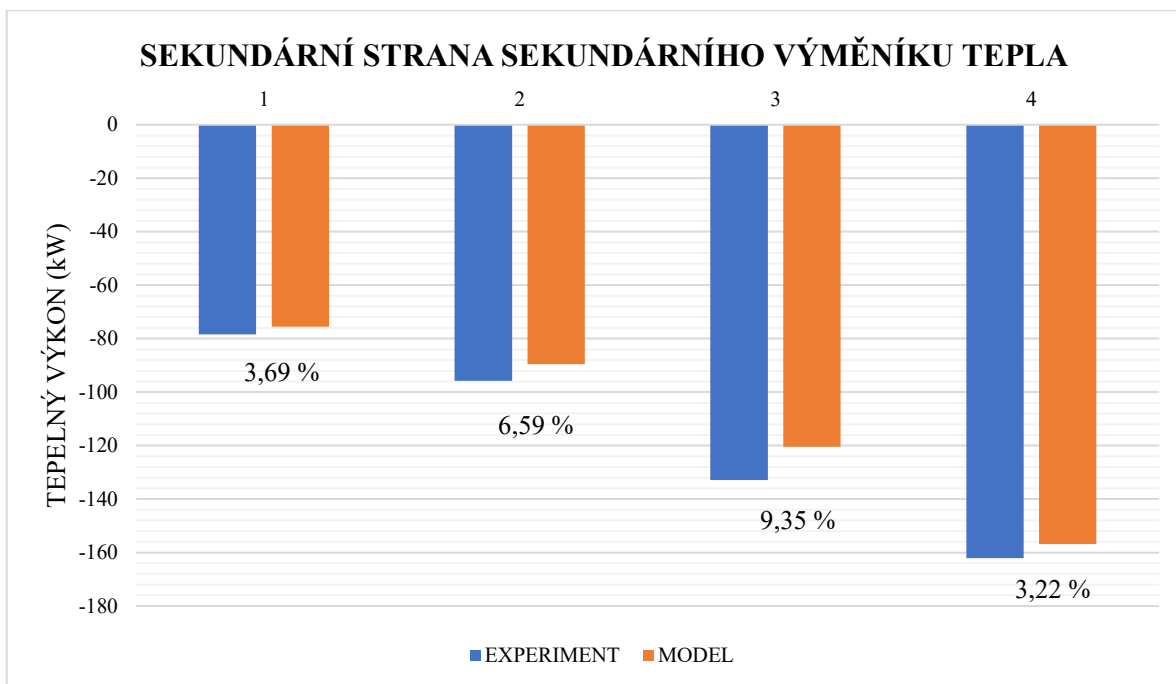
Naměřená data pro jednotlivé stavy sekundárního výměníku tepla jsou shrnuty v tab. 34 pro sekundární stranu a v tab. 35 pro terciární stranu. Pro validaci modelu byla použita naměřená vstupní data, která se definovala jako okrajové podmínky. Následně došlo k porovnání výstupních dat modelu s výsledky experimentů na obr. 53 a obr. 54.

Tab. 34 Sekundární strana sekundárního výměníku tepla

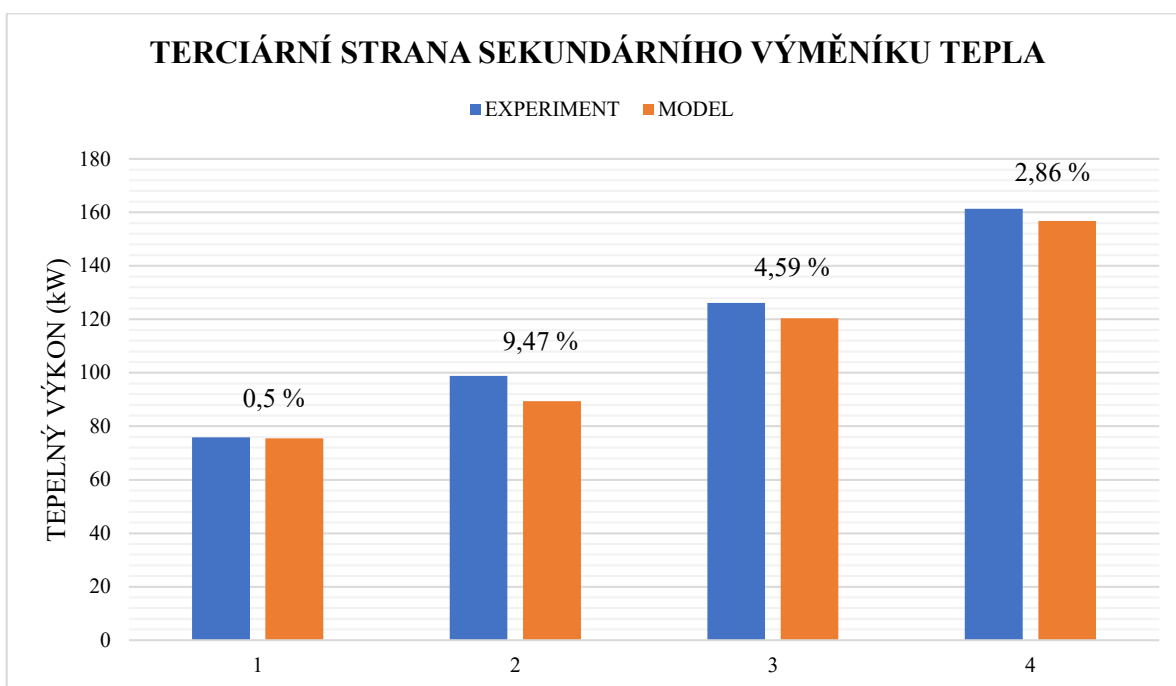
Sekundární strana sekundárního výměníku tepla					
Stavy	Vstupní data			Výstupní data	
	T (°C)	p (MPa)	\dot{m} (kg s⁻¹)	Experiment T (°C)	Model T (°C)
1	117,14	3,141	0,197	40,44	43,28
2	82,33	2,992	0,4973	45,23	47,67
3	101,40	3,045	0,4992	50,14	54,93
4	223,20	3,707	0,1918	60,41	65,66

Tab. 35 Terciární strana sekundárního výměníku tepla

Terciární strana sekundárního výměníku tepla					
Stavy	Vstupní data			Výstupní data	
	T (°C)	p (MPa)	\dot{m} (kg s⁻¹)	Experiment T (°C)	Model T (°C)
1	20,43	0,575	2,7851	26,95	26,92
2	22,72	0,573	2,7589	31,29	30,48
3	21,75	0,570	2,7984	32,54	32,04
4	21,61	0,564	3,6147	32,29	31,99



Obr. 53 Srovnání výsledků sekundární strany sekundárního výměníku tepla

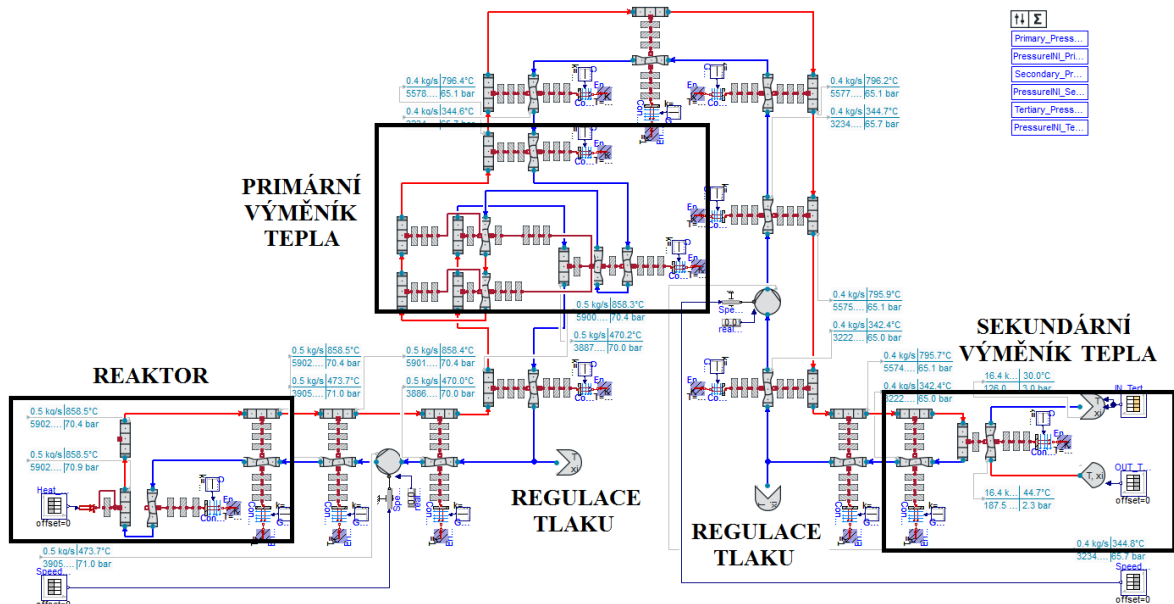


Obr. 54 Srovnání výsledků terciární strany sekundárního výměníku tepla

Z výsledků validace sekundárního výměníku tepla vychází, že pro současný model dosáhla maximální odchylka od experimentu hodnoty 9,47 % a průměrné hodnoty pro výše uvedené stavy 5,04 %. Lze tedy konstatovat, že výpočetní model sekundárního výměníku tepla má dobrou schopnost predikce termohydraulického chování reálného zařízení. Maximální rozdíl výstupních teplot nastal ve stacionárním stavu 4 na sekundární straně výměníku tepla, byl roven hodnotě 5,25 °C. Vyšší rozdíly mohou být způsobeny přesností měřících čidel a ztrátami do okolí, jelikož v rámci měření nebyl výměník tepelně izolován.

7.3 Model primárního a sekundárního okruhu

Pro účely predikce chování celé smyčky v nominálním provozním režimu byl sestaven termohydraulický model primárního i sekundárního okruhu viz obr. 55. Model je porovnáván s návrhovým výpočtem pro nominální parametry společnosti ATEKO a.s. dle kapitoly 4. Umístění komponent Quadruple (viz kapitola 6.5.5) koresponduje s umístěním čidel na reálném zařízení pro rychlejší orientaci při porovnávání výsledných dat.



Obr. 55 Model primárního a sekundárního okruhu

7.3.1 Reaktor

Vzhledem k náročnosti geometrie elektricky vyhřívané topné zóny 4.1.2 bylo v CVŘ provedeno několik CFD analýz, ze kterých se stanovila korelace pro Nusseltovo číslo (31) a nominální tlaková ztráta (32). Analýzy samotné nejsou součástí této závěrečné práce.

$$Nu = 2,4365 Re^{0,3443} Pr^{1/3} \quad (31)$$

$$\Delta p_{fric,nom} = 1\,380 \text{ Pa} \quad (32)$$

V kombinaci se stanovením místních tlakových ztrát dle vztahů ze stránek iPotrubi (2015) v podobě ostré změny směru toku (33), náhlým rozšířením (34) a zúžením průtočné plochy (35) (viz geometrie kapitola 4.1) byla celková nominální tlaková ztráta reaktoru stanovena pomocí vytvořeného výpočetního MS Excel na 52 630 Pa.

$$\zeta_{os}(90^\circ) = 1,15 \quad (33)$$

$$\zeta_{nr} = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2 \quad (34)$$

$$\zeta_{nz} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2 \quad (35)$$

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \frac{A_2}{A_1}}$$

Součinitel přestupu tepla, respektive Nusseltovo číslo, je ve zbylých částech reaktoru počítáno pomocí vztahu Gnielinski (13). Vyjimku tvoří vnitřní strana objemu sestupné šachty (důkladná izolace vestavby topné zóny) a děrovaný plech nad zónou (malé rozměry vůči celému reaktoru), kde sdílení tepla neuvažují.

7.3.2 Potrubí

Pro výpočet tlakových ztrát koaxiálního primárního i sekundárního potrubí, respektive výpočet Darcy-Weisbach ztrátového součinitele, bylo použito explicitní vyjádření rovnice Colebrook-White v podobě Swamee-Jain (1976) dle (4). V kombinaci s místními tlakovými ztrátami pro oblouková kolena (iPotrubí, 2015) (36), byla v MS Excel stanovena celková nominální ztráta primárního potrubí na 4 100 Pa, sekundárního potom na 6 670 Pa.

$$\begin{aligned}\zeta_{ob,inner} &= 0,25 \\ \zeta_{ob,outer} &= 0,35\end{aligned}\tag{36}$$

Nusseltovo číslo je v modelu počítáno pomocí vztahu Gnielinski (13).

7.3.3 Primární výměník tepla

Výpočetní model primárního výměníku tepla je popsán v kapitole 7.2.

7.3.4 Sekundární výměník tepla

Výpočetní model sekundární výměníku tepla je popsán v kapitole 7.2. Jen byly přepočteny koeficienty Nusseltova čísla z důvodu velkých fyzikálních rozdílů chladiva v nominálním stavu od experimentálního měření.

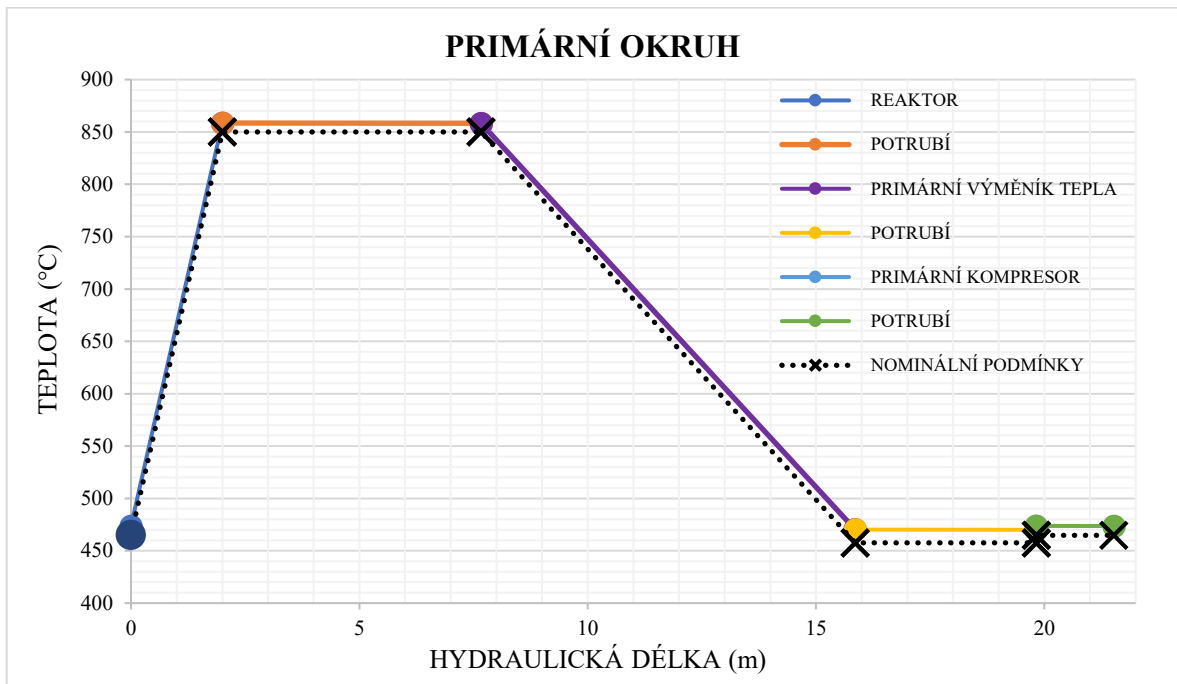
Pro trubkový svazek bylo použito $C = 0,0276$ a $m = 0,7705$.

V mezitrubkovém prostoru se hodnoty příliš nezměnily, konstanty zůstaly tedy stejné.

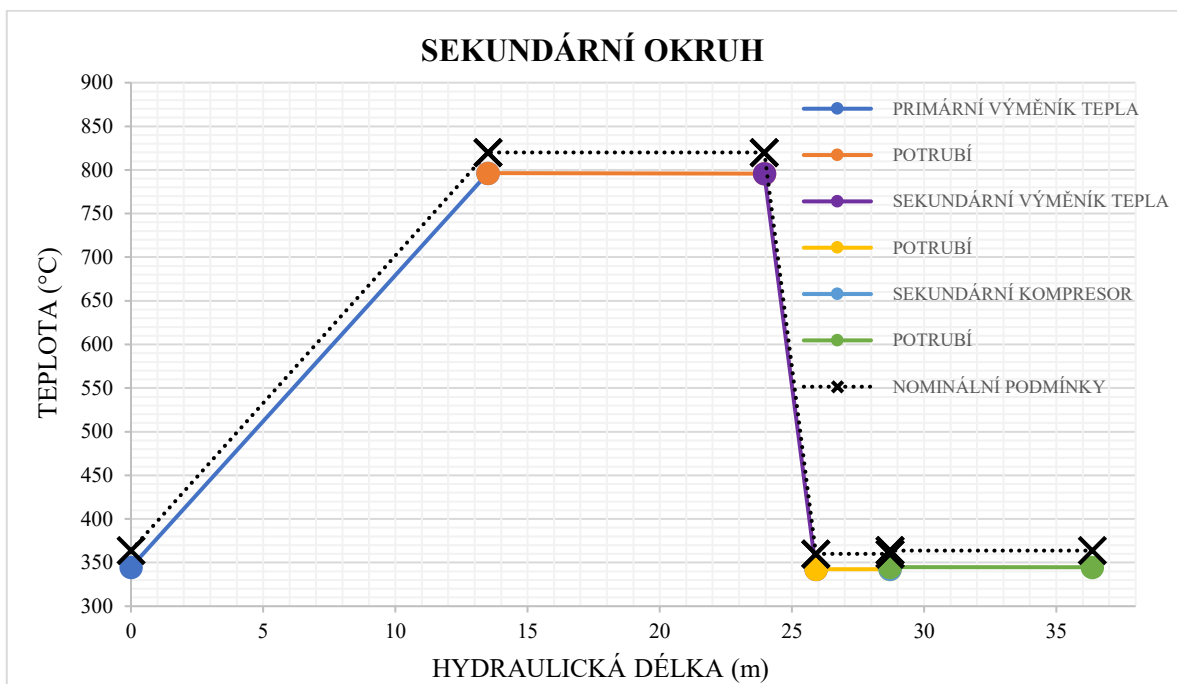
7.3.5 Kompresory

V modelech kompresorů (kapitola 6.3.2) bylo zohledněno chlazení zařízení pomocí RCC (kapitola 4.6.1) úpravou výkonové charakteristiky jednotlivých turbostrojů.

Experimentální smyčka zatím nebyla provozována na nominálních parametrech. Pro validaci tohoto modelu bylo použito výsledků simulace smyčky S-ALLEGRO od dodavatele zařízení ATEKO a.s., který pro tyto účely využil software Aspen HYSYS. Výsledky porovnání modelů jsou shrnuty níže na obr. 56 a obr. 57.

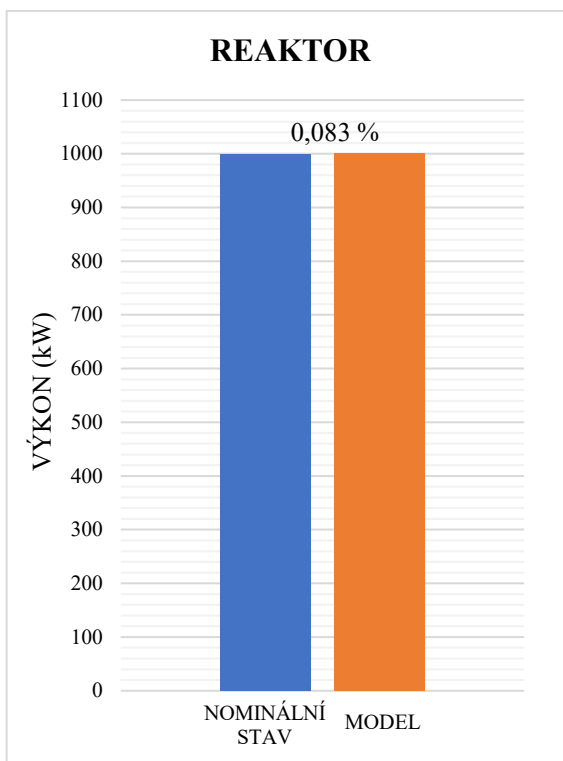


Obr. 56 Nominální stav primárního okruhu



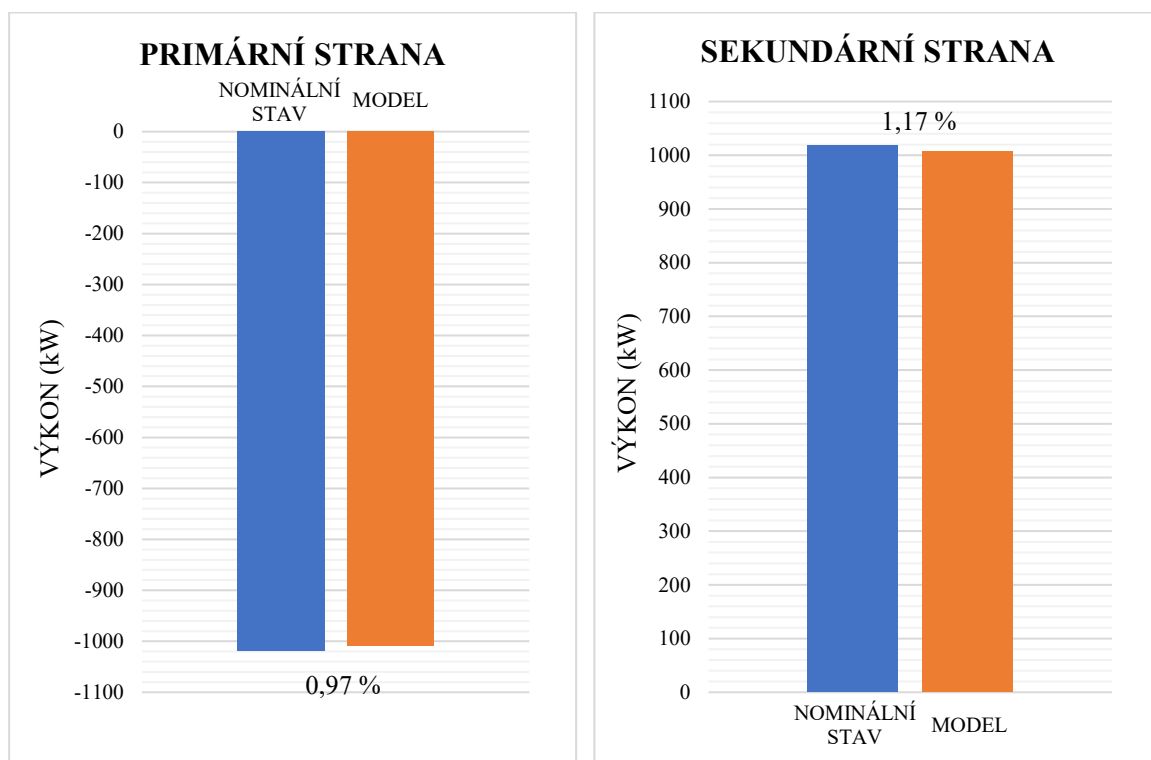
Obr. 57 Nominální stav sekundárního okruhu

Na obr. 58 je srovnání předaného tepla reaktorem primárnímu okruhu. Je patrné, že předávaný výkon se v sestaveném modelu příliš neliší od vypočtených hodnot ATEKO a.s.



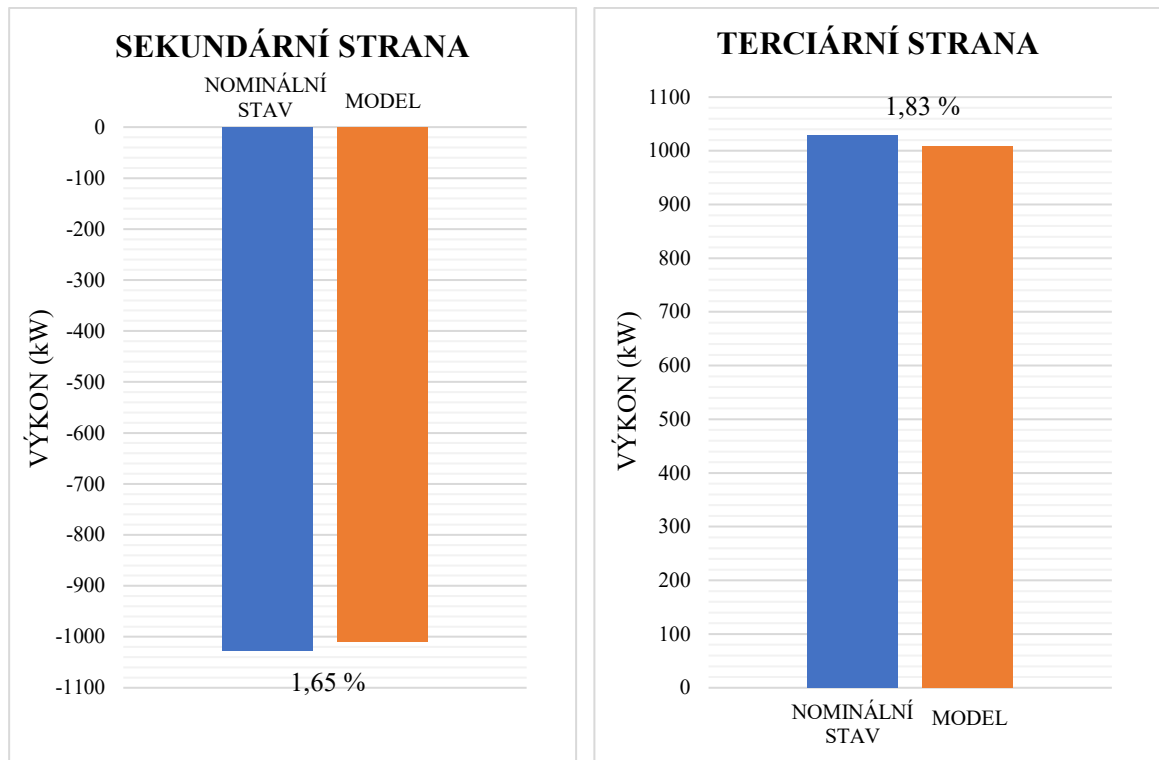
Obr. 58 Srovnání výsledků modelů reaktoru

Na obr. 59 je porovnání jednotlivých stran primárního výměníku tepla. Oproti výsledkům ATEKO a.s. se hodnota sdíleného tepla liší jen minimálně.



Obr. 59 Srovnání výsledků modelů primárního výměníku tepla

Na obr. 60 srovnávám jednotlivé strany sekundárního výměníku tepla. Ve srovnání s vypočtenými hodnotami ATEKO a.s. se vytvořený model také příliš neodlišuje.



Obr. 60 Srovnání výsledků modelů sekundárního výměníku tepla

Z porovnání nominálních stavů výše lze konstatovat, že výpočetní model primárního a sekundárního okruhu predikuje obdobné termohydraulické chování jako výpočetní model dodavatele zařízení S-ALLEGRO. Pro přehlednost ještě porovnání výstupných teplot v klíčových místech smyčky na následující straně (tab. 36, tab. 37 a tab. 38).

Tab. 36 Srovnání teplot nominálního stavu primárního okruhu

Primární okruh	Výstupní teplota T (°C)	
	ATEKO a.s.	Model
Reaktor	850	858,51
Potrubí	850	858,27
Primární výměník tepla	457,6	470,22
Potrubí	457,6	470,03
Primární kompresor	464,9	473,74
Potrubí	464,9	473,67

Tab. 37 Srovnání teplot nominálního stavu sekundárního okruhu

Sekundární okruh	Výstupní teplota T (°C)	
	ATEKO a.s.	Model
Primární výměník tepla	820	796,39
Potrubí	820	795,74
Sekundární výměník tepla	360	342,42
Potrubí	360	342,38
Sekundární kompresor	363,8	344,77
Potrubí	363,8	344,65

Tab. 38 Srovnání teplot nominálního stavu terciární strany

Terciární strana	Výstupní teplota T (°C)	
	ATEKO a.s.	Model
Primární výměník tepla	45	44,73

8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo základní obeznámení s problematikou aktuálně vznikající IV. generace systémů jaderných štěpných reaktorů v podobě rešerše, s následným zaměřením na vývoj systémů typu GFR. Dále byl vytvořen termohydraulický výpočetní model pro experimentální zařízení S-ALLEGRO v software Dymola a provedeno srovnání s experimentálními i návrhovými daty.

V rámci praktické části bylo vytvořeno několik výpočetních modelů řešících různé stavy zařízení S-ALLEGRO. V prvním případě se jednalo o inverzní postup sestavení výpočetního modelu pro neobvyklé chování smyčky, kdy docházelo k mísení proudů v koaxiálním potrubí z chladnější do teplejší větve a tím k obtoku elektricky vyhřívané topné zóny. Výsledkem porovnání modelu s experimentálními daty bylo vyloučení možné příčiny obtoku topné zóny skrz labyrintovou ucpávku koaxiálního uzavíracího ventilu. Zároveň bylo možné porovnat výsledky modelu s naměřenými daty z obou heliových okruhů. Z porovnání vyplynulo, že výsledky modelu jsou v dobré shodě s experimentálními daty. Dále došlo k vytvoření termohydraulických modelů primárního i sekundárního výměníku tepla experimentální smyčky S-ALLEGRO a následné validaci výpočetních modelů pomocí naměřených dat pro stacionární stavy zařízení. Podobně jako v předchozím případě došlo u většiny uvažovaných stavů k velmi dobré shodě mezi modelem a naměřenými daty. V závěru práce byl vytvořen model celého systému S-ALLEGRO bez okruhu odvodu zbytkového tepla. Vzhledem k tomu, že prozatím nejsou k dispozici experimentální data pro nominální stav, výsledky modelu byly porovnávány s návrhovými výpočty dodavatele smyčky S-ALLEGRO. Výsledků práce bylo z části dosaženo v rámci řešení výzkumných projektů TAČR TK01030116 (Návrh konceptu bezpečnostně důležitých prvků rychlého heliem chlazeného demonstračního reaktoru ALLEGRO, podpořený Technologickou agenturou ČR) a R4S (Výzkum pro udržitelnou energetiku).

Na základě provedených analýz lze konstatovat, že vytvořený model je schopný predikovat termohydraulické chování smyčky S-ALLEGRO ve stacionárních stavech. Pro případné další zlepšení predikční schopnosti termohydraulického modelu by mělo dojít k lepší definici komponenty sekundárního výměníku tepla, aby systém nebyl závislý na přepočtu konstant Nusseltových čísel. Zároveň by měl být model validován i pro další experimentální stavy smyčky s větším provozním rozsahem, aby se ověřila platnost rozsahu používaných vztahů a zlepšila se možnost predikce i tranzientního provozu smyčky S-ALLEGRO. Tyto navazující analýzy budou v CVŘ pokračovat v rámci řešení již zmíněných nebo nových výzkumných projektů. Pokud se i v tomto případě prokáže schopnost modelu předpovídat fyzikální chování smyčky, bude možné model využít jako podpůrný nástroj pro vývoj reálného plynem chlazeného reaktoru nebo jeho komponent. Dále bude vytvořený model sloužit pro podporu budoucích experimentálních kampaní na smyčce S-ALLEGRO.

Seznam použitých zkratek

ASME	Americká společnost strojních inženýrů (The American Society of Mechanical Engineers)
BDF	Zpětná diferenciální metoda (Backward Differentiation Formula)
BWR	Varný reaktor (Boiling Water Reactor)
CANDU	Kanadský energetický jaderný reaktor chlazený D ₂ O (Canada Deuterium-Uranium)
CATHARE	Kód pro analýzu termohydrauliky během havarijního stavu reaktoru a hodnocení bezpečnosti (Code for Analysis of Thermal-hydraulics during an Accident of Reactor and safety Evaluation)
CEA	Komise pro alternativní a atomovou energii (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)
ClaRa	Clausius-Rankine cyklus (Clausius-Rankine cycle)
CVŘ	Centrum výzkumu Řež s.r.o. (Research Center Rez)
ČEZ	České energetické závody (CEZ group)
DAE	Diferenciální algebraické rovnice (Differential Algebraic Equations)
DCS	Distribuované řídicí systémy (Distributed Control Systems)
DEMO	Demonstrační energetický fúzní reaktor (Demonstration Power Station)
DHR	Odvod zbytkového tepla (Decay Heat Removal)
Dymola	Prostředí pro dynamické modelování (Dynamic Modeling Laboratory)
ESDIRK	Explicit Singly Diagonally Implicit Runge-Kutta
ETDR	Experimentální demonstrační reaktor technologie (Experimental Technology Demonstration Reactor)
FMI	Funkční rozhraní mock-up (Functional Mock-Up Interface)
FSA	Konečný automat (Finite State Automata)
FZK	Výzkumné centrum Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe)
GFR	Rychlé reaktory chlazené plynem (Gas-Cooled Fast Reactors)
GIF	Mezinárodní fórum pro IV. generaci (The Generation IV International Forum)
HELOKA	Experimentální heliová smyčka v Karlsruhe (Helium Loop Karlsruhe)
HELP	Heliová experimentální smyčka (Helium Experimental Loop)
HEMJ	Modulárního divertor s proudovým chlazením (Helium-cooled Modular divertor with Jet cooling)

HTHL	Vysokoteplotní heliová smyčka (High-Temperature Helium Loop)
HTTR	Vysokoteplotní experimentální reaktor (High Temperature Engineering Test Reactor)
IFMIF-HFTM	Mezinárodní zařízení pro testování materiálů fúzních reaktorů pod vysokými neutronovými toky (International Fusion Materials Irradiation Facility-The High Flux Test Module)
ITER	Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor (International Thermonuclear Experimental Reactor)
JAEA	Japonská agentura pro atomovou energii (Japan Atomic Energy Agency)
KAERI	Korejský institut pro výzkum atomové energie (Korea Atomic Energy Research Institute)
KATHELO	Heliová smyčka pro pokročilé technologie v Karlsruhe (Karlsruhe Advanced Technologies Helium Loop)
LFR	Olovem chlazené rychlé reaktory (Lead-Cooled Fast Reactors)
LOCA	Havárie spojené se ztrátou chladiva (Loss of Coolant Accident)
LVR-15	Výzkumný lehkovodní reaktor tankového typu
LWR	Lehkovodní reaktory (Light Water Reactors)
MATLAB	Simulační software (Matrix Laboratory)
MELCOR	Kód pro analýzu těžkých a projektových havárií jaderných elektráren
MS	Microsoft
MSR	Reaktory využívající roztavené soli (Molten Salt Reactors)
MTA EK	Maďarská akademie věd pro energetický výzkum (Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont)
NCBJ	Národní centrum pro jaderný výzkum (Narodowe Centrum Badań Jadrowych)
ODE	Obyčejné diferenciální rovnice (Ordinary Differential Equations)
PFD	Schéma procesu (Process Flow Diagram)
PR	Stlačení kompresoru (Pressure Ratio)
RCC	Cyklus chlazení rotoru (Rotor Cooling Cycle)
RELAP	Program pro analýzu designu a úniků reaktoru (Reactor Excursion and Leak Analysis Program)
R4S	Výzkum pro SUSEN (Research for SUSEN)
SBO	Výpadek zdroje napájení (Station Blackout)

SCWR	Reaktory využívající vodu v superkritické fázi (Super-Critical Water-Cooled Reactors)
SFR	Sodíkem chlazené rychlé reaktory (Sodium-Cooled Fast Reactors)
STU	Slovenská technická univerzita v Bratislavě
SUSEN	Udržitelná energetika (Sustainable Energy)
TaČR	Technologická agentura ČR (Technology Agency of the Czech Republic)
TBM	Testovací modul blanketu (Test Blanket Module)
TC	Turbokompresor (Turbo Compressor)
TDM	Testovací modul divertoru (Test Divertor Module)
TRISO	Palivová částice pro VHTR (Tri-structural Isotropic particle fuel)
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu Řež a.s. (Nuclear Research Institute Rez)
VaV	Vývoj a Výzkum (R&D, Research and Development)
VHTR	Vysokoteplotní reaktory (Very High Temperature Reactors)
VLE	Rovnováha plyn-kapalina (Vapor-Liquid Equilibrium)
VUJE	Výzkumný ústav jaderné energetiky (Výskumný Ústav Jadrovej Energetiky)
VVER	Tlakovodní reaktor (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor)
V4G4	Konsorcium ÚJV (CZ), MTA EK (HU), NCBJ (PL) a VUJE (SK) (Visegrad Group for Generation IV)
WMU	Západní Michiganská univerzita (Western Michigan University)

Seznam použitých veličin

Značka	Veličina	Rozměr
A	teplosměnná plocha (area)	(m ²)
C	konstanta Nu čísla zohledňující geometrii	
D, d	průměr (diameter)	(m)
Gc	konvekční tepelná vodivost	(W K ⁻¹)
L	délkový rozměr (length)	(m)
Nu	Nusseltovo číslo	
P	výkon (power)	(W)
PR	stlačení kompresoru (Pressure Ratio)	
\dot{Q}	tepelný tok	(W)
Re	Reynoldsovo číslo	
SplitRatio	dělicí poměr	
T	teplota	(K)
U	vnitřní energie	(J)
\dot{V}	objem	(m ³ s ⁻¹)
a	součinitel teplotní vodivosti	(m ² s ⁻¹)
c	měrná tepelná kapacita	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)
f	Darcy-Weisbach ztrátový součinitel	
g	gravitační zrychlení	(m s ⁻²)
h	měrná enthalpie	(J kg ⁻¹)
m	konstanta Nu čísla, mocnina Reynoldsonova čísla	
\dot{m}	hmotnostní průtok	(kg s ⁻¹)
n	počet prvků	
	otáčky	(min ⁻¹)
p	absolutní tlak	(Pa)
	relativní tlak	(Pa(g))
t	čas	(s)
u	rychlost	(m s ⁻¹)
x	délkový úsek ve směru toku	(m)
	směr proudění	

Značka	Veličina	Rozměr
Δ, d	změna veličiny	
Σ	příkonový součinitel	
Φ	průtokový součinitel	
χ	tlakové číslo	
α	součinitel přestupu tepla	(W m ⁻² K ⁻¹)
ε	absolutní drsnost	(m)
	pomocná veličina pro výpočet ztrátového součinitele	
ζ	bezrozměrný ztrátový součinitel třením	
η	účinnost	
λ	součinitel tepelné vodivosti	(W m ⁻¹ K ⁻¹)
μ	dynamická viskozita	(Pa s)
ν	kinematická viskozita	(m ² s ⁻¹)
π	Ludolfovo číslo	
ρ	hustota	(kg m ⁻³)

Indexy

<i>D</i>	charakteristický rozměr
<i>H</i>	hydraulický
<i>b</i>	přepážky výměníku tepla (baffles)
<i>e</i>	elektrický
<i>fric</i>	tření (friction)
<i>i</i>	značený <i>i</i> -tého prvku
<i>in</i>	vstup (inlet)
<i>inner</i>	vnitřní
<i>iso</i>	izoentropický
<i>l</i>	laminární
<i>max</i>	maximální
<i>mean</i>	průměrný
<i>nom</i>	nominální stav (nominal)
<i>nr</i>	náhlé rozšíření
<i>nz</i>	náhlé zúžení
<i>os</i>	ostré koleno
<i>ob</i>	oblé koleno
<i>outer</i>	vnější
<i>out</i>	výstup (outlet)
<i>p</i>	izobarický
<i>passes</i>	průchody výměníku tepla
<i>th</i>	tepelný

Reference

- AIP Conference Proceedings 2017: *Research of natural circulation in the experimental helium loop of STU* [online] Urban F. et al. AIP Publishing LLC: ©2020 [23.05.2020]. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5004381>
- Andreades C. et al, 2016: „Design Summary of the Mark-I Pebble-Bed, Fluoride Salt–Cooled, High-Temperature Reactor Commercial Power Plant“. *Nuclear Technology*, Vol. 195, pp. 223 – 238. ISSN: 0029-5450.
- ATEKO a.s., 2015 – 2018: *Technická zpráva*. Interní dokument CVŘ.
- Berka J. et al., 2010: „Vysokoteplotní heliová smyčka – nové experimentální zařízení v ÚJV Řež a.s.“. *Paliva 2*, Vol. 2, pp. 64 – 70.
- Centrum výzkumu Řež s.r.o. [online]. CVŘ: ©2020 [08.04.2020]. Dostupné z: <http://cvrez.cz/>
- Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives [online]. CEA: ©2020 [08.04.2020]. Dostupné z: <http://www.cea.fr/>
- České energetické závody a.s.: *Budoucnost jaderných technologií* [online]. ČEZ a.s.: ©2020 [08.04.2020]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/budoucnost-jadernych-technologii>
- Dassault Systèmes®, 2020: *Dymola* [online]. Dassault Systèmes®: ©2020 [08.04.2020]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola/>
- Dassault Systèmes®, 2011: *Dymosim Integrators* [online]. [06.07.2020]. Dostupné z: <https://catiahelp.azurewebsites.net/English/SemUserMap/svecommon-c-DymosimIntegrators.htm>
- Department of Economic and Social Affairs, Population Dynamics [online]. United Nations: 2019 [08.04.2020]. Dostupné z: <https://population.un.org/wpp/>
- Encyclopaedia Britannica: *Helium, chemical element* [online]. Encyclopaedia Britannica, inc.: ©2019 [08.04.2020]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/helium-chemical-element>
- EUROSAFE, 2020: *STU – Helium Loop* [online]. Eurosafe-forum.org: ©2020 [23.05.2020]. Dostupné z: <https://www.eurosafe-forum.org/node/370>
- Fiberfrax®: *Parametry výroby* [online]. [06.07.2020]. Dostupné z: <http://www.inheat.cz/doc/td/cz/39/fiberfrax-durablanket-s-cz.pdf>
- Ghidersa B. E. et al., 2006: „Helium Loop Karlsruhe (HELOKA): A valuable tool for testing and qualifying ITER components and their He cooling circuits“. *Fusion Engineering and Design*, Vol. 81, pp. 1471 – 1476.
- Heraltová L., nedatováno: „Příběh jaderného paliva“ [online]. Katedra jaderných reaktorů, FJFI, ČVUT v Praze [08.04.2020]. Dostupné z: http://fyzu3v.fjfi.cvut.cz/current/web/prednasky/heraltova_palivovy_cyklus.pdf

- Ionescu-Bujor M. et al., nedatováno: „*Helium Loop Karlsruhe (HELOKA) – large experimental facility for the in-vessel ITER and DEMO components*“ [online]. Forschungszentrum Karlsruhe, Germany [16.05.2020]. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/PDFplus/fusion-20-preprints/FT_P7-12.pdf
- iPotrubi, 2015: *Místní tlakové ztráty* [online]. eStranky.cz: ©2020 [10.04.2019]. Dostupné z: <https://www.ipotrubi.cz/clanky/6.-hydrodynamicke-a-termodynamicke-vypocty/2.-vypocet-tlakovych-ztrat/3.-mistni-tlakove-zraty.html>
- Joubert L., 2003: *Mathematical modeling of leakage flow through labyrinth seals*. Dissertation at the Potchefstroom University for Christian Higher Education. Promoter: Dr. Botha
- Kamide H., Pivet S., 2019: „Development and deployment of advanced nuclear power technologies to increase the use of lowcarbon energy“ [online]. *IAEA conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power*. Vienna, 2019. [08.04.2020]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_115483/pivet-gif-pres-iaea-cn-275-vdef
- Kanthal®: *Material datasheets* [online]. Sandvik AB: ©2019 [10.04.2019]. Dostupné z: <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/kanthal-af/>
- Kim C. S. et al., 2013: „Performance Test of Very High Temperature Helium Experimental Loop“ *Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2013*. Korea Atomic Energy Research Institute.
- Kuba J., 2009: *Metodický pokyn č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací* [online]. ČVUT v Praze, 1. července 2009. [08.04.2020]. Dostupné z: <https://www.cvut.cz/sites/default/files/content/d1dc93cd-5894-4521-b799-c7e715d3c59e/cs/20191114-metodicky-pokyn-c-12009-o-dodrzovani-etickyh-principu-pri-priprave-vysokoskolskych.pdf>
- Lee W. E., Rainforth W. M., 1994: *Ceramic Microstructures: Property Control by Processing*. Chapman and Hall, London, 1994, pp. 290 – 360. ISBN 0-412-43140-8.
- LTX Simulation GmbH* [online]. LTX Simulation GmbH: ©2018 [12.10.2019] Dostupné z: <https://www.ltx.de>
- Ohashi H. et al., 2006: „Development of control technology for HTTR hydrogen production system with mock-up test facility: System controllability test for loss of chemical reaction“ *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, pp. 1396 – 1410.
- Proceedings of the 10th International Modelica Conference 2014: *Modelica Evolution – From My Perspective* [online]. Elmquist H. [06.07.2020]. Dostupné z: <https://ep.liu.se/ecp/096/001/ecp14096001.pdf>
- Promalight®: *Technical data sheet* [online]. Promat: ©2020 [10.04.2019]. Dostupné z: <https://www.promat-hpi.com/downloads/get/en-US/B9399CFD5CDA4D1EB8DF9DCF216F1ED3?rev=3800e813-304b-4708-9183-d7ffe0c8911a>

ProRox®: *Technické parametry* [online]. ROCKWOOL: ©2017 [06.07.2020]. Dostupné z: https://rti.rockwool.com/siteassets/tools--documentation/documentation/countries/industrial---cz/technicke-listy/rti-prorox-wm-950-alu_cz.pdf

Schlömer S. et al., 2014: „Annex III: Technology-specific cost and performance parameters“. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Serp J. et al., 2014: „The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives“. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 77, pp. 308 – 319. ISSN: 0149-1970.

Stainsby R. et al., 2011: „Gas cooled fast reactor research in Europe“. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, pp. 3481 – 3489. ISSN 0029-5493.

Sustainable Energy (SUSEN) [online]. CVR: ©2020 [08.04.2020]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/>

Swamee P., Jain A., 1976: „Explicit equations for pipe-flow problems“. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 102, pp. 657 – 664.

The American Society of Mechanical Engineers: *Performance Test Code on Compressors and Exhausters*. ASME: ©1998.

The Generation IV International Forum [online]. GIF: ©2019 [08.04.2020]. Dostupné z: <https://www.gen-4.org/gif/>

The Generation IV International Forum: *GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems: 2018 Update* [online]. GIF: ©2019 [08.04.2020]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_108744/gif-r-d-outlook-for-generation-iv-nuclear-energy-systems-2018-update?details=true

The Modelica Association [online]. Modelica®: 2020 [12.10.2019]. Dostupné z: <https://www.modelica.org/>

Tilghman M., 2011: „*The Helium Crisis: Real and Avoidable*“ [online]. Stanford University [08.04.2020]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/tilghman1/>

Vácha P., Bělovský L., 2016: „Analyses of severe accidents in GFR demonstrator ALLEGRO with MELCOR 2.1“. *Proceedings of the 2016 24th International Conference on Nuclear Engineering*. Charlotte, NC, USA.

Visegrad Group [online]. International Visegrad Fund: ©2019 [08.04.2020]. Dostupné z: <http://www.visegradgroup.eu/>

World Nuclear Association: *Nuclear Power in the World Today* [online]. World Nuclear Association: ©2020 [23.05.2020]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>

WMU, nedatováno: *Shell-and-Tube Heat Exchangers* [online] [12.10.2019] Dostupné z: http://homepages.wmich.edu/~leehs/ME539/Section%205.4%20Shell-and-tube%20heat%20exchanger_corrected.pdf