

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Akademický rok 2020/2021

Bc. Matěj JEŘÁBEK

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270013
Stavba energetických strojů a zařízení

Specializace: N0715A270013S01
Stavba energetických strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh systému svrchního chlazení elektromagnetického kalorimetru

Autor: **Bc. Matěj JEŘÁBEK**

Vedoucí práce: **Ing. Michal VOLF**

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Matěj JEŘÁBEK**
Osobní číslo: **S19N0149P**
Studijní program: **N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Téma práce: **Návrh systému svrchního chlazení elektromagnetického kalorimetru**
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Zásady pro vypracování

1. Obecný popis kalorimetru a jeho konstrukce.
2. Variantní řešení chladicího systému.
3. Analýza teplotního pole.
4. Analýza tlakových ztrát.
5. Zhodnocení variantních řešení chladicího systému.
6. Závěr.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- BLAŽEK, J.: Computational fluid dynamics: principles and applications, ELSEVIER SCIENCE Ltd, 2001, ISBN 0080430090
- WHITE, Frank M.: Fluid Mechanics, McGraw-Hill Education, 2015, ISBN 978-0073398273
- Jiyuan Tu, Guan Yeoh, Chaoqun Liu: Computational Fluid Dynamics – A Practical Approach, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, ISBN-13: 978-0080982434
- ANSYS, ANSYS CFX-Solver Theory Guide [online], dostupné z: www.ansys.com
- KOZUBKOVÁ, M.: Modelování proudění tekutin Fluent, CFX [online], VŠB-TU Ostrava, 2008, 154 s., dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Volf**
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant diplomové práce: **RNDr. Daniel Duda, Ph.D.**
Katedra energetických strojů a zařízení

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Volfovi za velmi cenné a odborné rady, bez kterých by tato práce nevznikla. Dále děkuji své rodině a blízkému okolí za podporu při celém studiu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Bc. Jeřábek	Matěj
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení	
VEDOUcí PRÁCE	Ing. Volf	Michal
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKE	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ
NÁZEV PRÁCE	Návrh systému svrchního chlazení elektromagnetického kalorimetru	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	51	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	<p>Diplomová práce se zabývá numerickými simulacemi proudění v chladicím systému elektromagnetického kalorimetru, a to jak analýzami teplotního, tak i tlakového pole. K analýze tlakového pole byly použity dva principiálně odlišné přístupy – analytický 1D výpočet a dále numerická 3D simulace proudění. Práce obsahuje podrobné vyhodnocení a popis jednotlivých simulací, přičemž k jejich tvorbě byl využit komerční software ANSYS 2020 R1 a jeho části.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	chladicí systém, PANDA, CFD, EMC, numerická simulace, tlaková ztráta

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Bc. Jeřábek	Matěj
STUDY PROGRAMME	N0715A270013 Design of power system machines and equipment	
SUPERVISOR	Ing. Volf	Michal
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Design of an electromagnetic calorimeter top cooling system	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Design of Power machines and equipment	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	--	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	51	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	<p>The diploma thesis deals with a numerical simulations of flow in the cooling system of an electromagnetic calorimeter, namely by analysis of the temperature and pressure field. Two fundamentally different approaches were used to analyze the pressure field - analytical 1D calculation and numerical 3D flow simulation. The work contains a detailed evaluation and description of individual analyses, while the commercial software ANSYS 2020 R1 and its parts were used for this purpose.</p>
KEY WORDS	cooling system, PANDA, CFD, EMC, numerical simulation, pressure loss

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Seznam fyzikální veličiny a jejich jednotek.....	12
1 Úvod	13
2 Popis detektoru PANDA	15
3 Chladicí systémy	20
3.1 Požadavky na návrh chladících systémů	20
3.2 Volba pracovního média.....	21
3.3 Horní chladicí okruh.....	22
3.4 Spodní chladicí okruh.....	24
3.5 Metodika návrhu chladících systémů	24
4 Návrh chladicího systému z hlediska teplotního pole	25
4.1 Výchozí studie teplotního pole	25
4.2 Rozšířená simulace teplotního pole.....	28
4.2.1 Nastavení numerické simulace teplotního pole.....	29
4.3 Analýza teplotního pole.....	31
5 Návrh chladicího systému z hlediska proudového pole	32
5.1 Úskalí návrhu proudového pole.....	32
5.2 Numerická simulace proudového pole	32
5.2.1 Nastavení numerické simulace proudového pole.....	37
5.3 Výpočetní síť a její verifikace	38
5.4 Analýza proudového pole.....	41
6 1D bilanční výpočet proudového pole	43
6.1 Analýza variace chladicího systému.....	47
7 Závěr	50
8 Zdroje	51

Přehled použitých zkratk a symbolů

CFD	Počítačová dynamika tekutin (angl. Computational Fluid Dynamics)
EMC	Elektromagnetický kalorimetr (angl. Electromagnetic Calorimeter)
FAIR	Zařízení pro antiprotonový a iontový výzkum
GSI	Centrum pro výzkum těžkých iontů
HESR	Urychlovač částic (angl. High Energy Storage Ring)
PANDA	Antiprotonový anihilační detektor
QCD	Kvantová chromodynamika

Seznam obrázků

Obr. 1. FAIR [3]	13
Obr. 2. HESR [2].....	15
Obr. 3. Model subsystémů detektoru PANDA [2]	15
Obr. 4. Elektromagnetický kalorimetr [5]	16
Obr. 5. Zadaná geometrie (barel)	17
Obr. 6. Detail zakrytovaného segmentu	17
Obr. 7. Prototyp segmentu s měřicí technikou [4]	18
Obr. 8. Detail segmentu bez krytů.....	18
Obr. 9. Rozstřelená sestava modulu 7	19
Obr. 10. Předběžný návrh chladících okruhů	22
Obr. 11. Detail prototypu segmentu s měřicí technikou [4].....	23
Obr. 12. Výpočetní oblast analýz teplotního pole [4]	25
Obr. 13. Výpočetní doména výchozí studie [4].....	26
Obr. 14. Rozložení teplotního pole u výchozí studie [4]	27
Obr. 15. Rozšířená výpočetní doména (přední pohled).....	28
Obr. 16. Rozšířená výpočetní doména (zadní pohled)	29
Obr. 17. Komponenty výpočetní domény	30
Obr. 18. Teplotní pole krystalů	31
Obr. 19. Schéma instalace chladicího systému [7].....	33
Obr. 20. Návrh chladicího systému.....	33
Obr. 21. Horní systém	34
Obr. 22. Spodní systém	35
Obr. 23. Výpočetní doména horního systému.....	36
Obr. 24. Výpočetní doména spodního systému.....	36
Obr. 25. Rozdělení výpočetní domény	37
Obr. 26. Verifikační doména.....	38
Obr. 27. Upravený předběžný návrh trubičky horního okruhu	38
Obr. 28. Matematický model verifikační domény (var. a.).....	39
Obr. 29. Matematický model verifikační domény (var. b.).....	40
Obr. 30. Varianty mezní vrstvy verifikační výpočetní domény.....	40
Obr. 31. Tlakové pole horního chladicího systému.....	41
Obr. 32. Tlakové pole spodního chladicího systému	42
Obr. 33. Porovnání přestupu tepla u laminárního a turbulentního proudění [9]	44

Obr. 34. Závislost Δp horního systému na průměru r.p. 47
Obr. 35. Závislost Δp horního systému na délce a průměru r.p. 49

Seznam tabulek

Tab. 1. Prvotní požadavky na chladicí systémy 20
Tab. 2. Materiálové vlastnosti chladiva 21
Tab. 3. Nastavení CFD pro numerickou simulaci teplotního pole..... 30
Tab. 4. Nastavení CFD pro numerickou simulaci proudového pole 37
Tab. 5. Porovnání velikosti výpočetních sítí 39
Tab. 6. Porovnání velikostí mezní vrstvy vybrané varianty b..... 41
Tab. 7. Primární hodnoty veličin pro 1D výpočet..... 43
Tab. 8. Porovnání hodnot tlakové ztráty v trubičce 46
Tab. 9. Porovnání výsledné tlakové ztráty systému 46

Seznam fyzikální veličiny a jejich jednotek

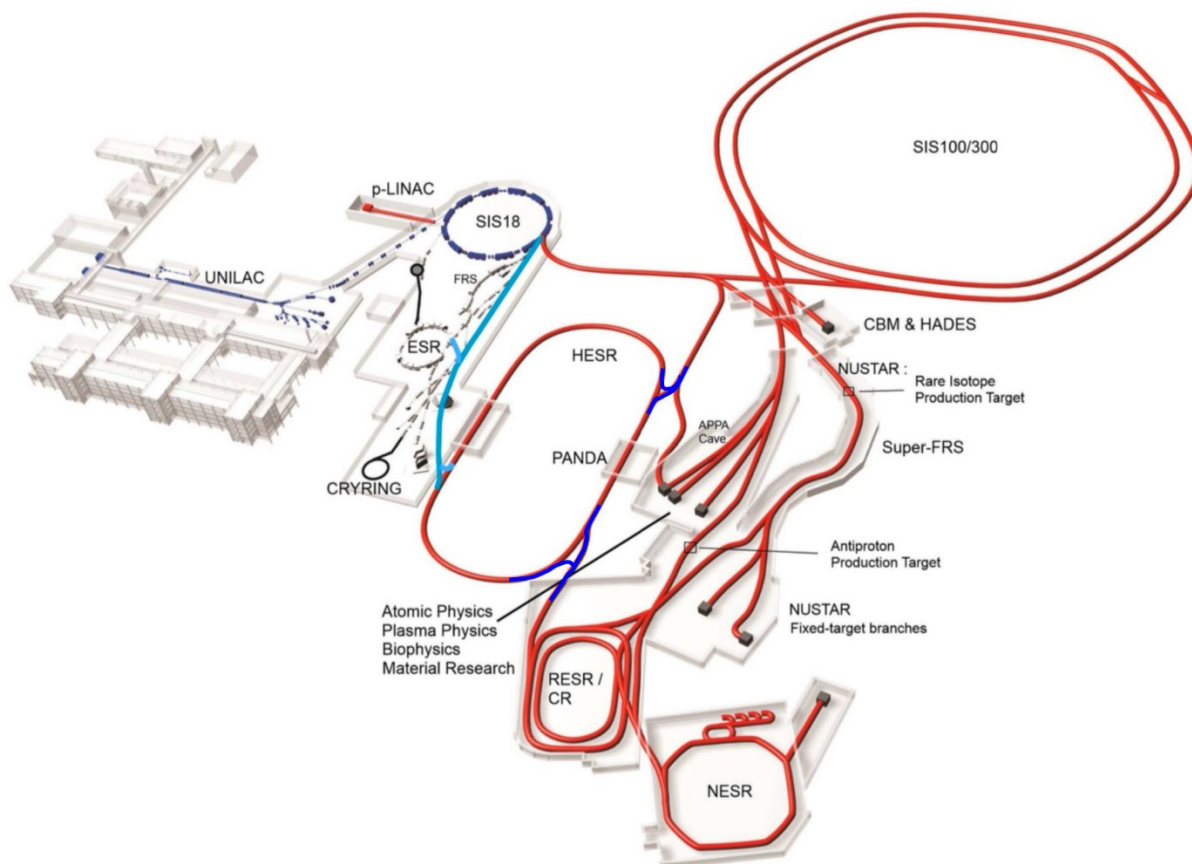
NÁZEV VELIČINY	ZNAČKA VELIČINY	JEDNOTKY SI, dekadické nás. / díly SI a uznané CIPM
termodynamická teplota	T	K
Celsiova teplota	t	°C
teplo, množství tepla	Q	J
tepelný tok	\dot{Q}	W
součinitel tepelné vodivosti	λ	W/(m · K)
součinitel prostupu tepla	k	W/(m ² · K)
součinitel přestupu tepla	α	
hustota	ρ	kg/m ³
dynamická viskozita	μ	Pa · s
kinematická viskozita	ν	m ² /s
měrná tepelná kapacita	c	J/(kg · K)
tlak	p	bar
hmotnostní průtok	\dot{m}	kg/s
molární hmotnost	M	kg/mol
ztrátový součinitel	β	-
rychlost	w	m/s
průměr	d	průměr
délka	l	m
plocha	S	mm ² , m ²
(zrychlení volného pádu), gravitační zrychlení	g	m/s ²
poloměr	r	m
součinitel místních ztrát	ζ	-

1 Úvod

Co je to hmota, kde se vzala a jaká je její struktura? To jsou otázky, na které bychom mohli najít odpovědi, při experimentech v nově vznikajícím komplexu urychlovačů FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), jenž bude součástí stávajícího zařízení pro výzkum těžkých iontů GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research). Nově vznikající komplex FAIR je možno vidět na Obr. 1, kde je vyznačen červeně. Součástí zmiňovaného komplexu je mimo jiné i urychlovač částic HESR (High Energy Storage Ring), ve kterém se nachází detektor PANDA (antiProton ANihilation at DArmstadt).

Účelem zmiňovaného detektoru je fyzikální výzkum témat týkajících se silné interakce, exotických stavů a struktury hadronů [1]. Ale proč? Účel souvisí s větou, kterou už jsme možná všichni někdy slyšeli, a to, že celek není pouhým součtem jednotlivých jeho částí. Pro některé fyzikální případy tato věta jistě nevyhovuje, avšak pro proton nabývá tato věta své pravdivé hodnoty, jelikož součet hmotností valenčních kvarků v protonu tvoří méně než 2 % z jeho celkové hmotnosti. Zbytek hmotnosti je výsledkem kinetické a vazebné energie mezi kvarky, způsobené dynamikou silné jaderné interakce [2].

Kvantová chromodynamika neboli QCD (Quantum ChromoDynamics) je přijatá teorie silné interakce, která popisuje vlastnosti kvarků a jejich interakce prostřednictvím gluonů, které jsou prostředníky sil silné interakce [2]. Fyzika silných interakcí je nepochybně jednou z nejnáročnějších oblastí fyziky moderní doby. Nejen proto, se na projektu podílí mezinárodní spektrum výzkumných pracovníků z oblastí jaderné energie a částicové fyziky, aby tak pokryli celé pole subatomární fyziky [1].



Obr. 1. FAIR [3]

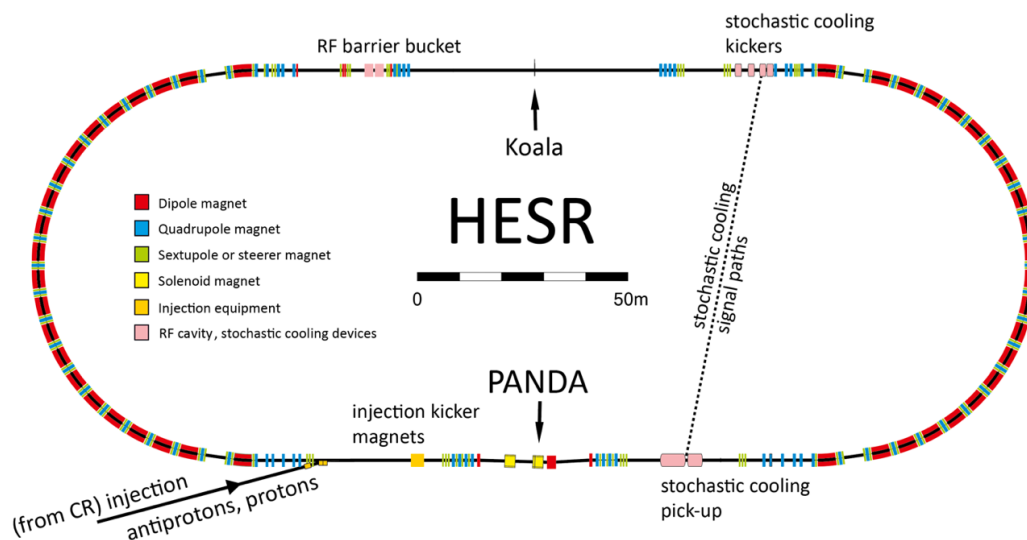
Za účelem shromáždění všech potřebných informací z antiproton-protonových srážek, bude sestaven víceúčelový elektromagnetický kalorimetr neboli EMC (Electro Magnetic Calorimeter), který bude schopen poskytovat přesnou rekonstrukci trajektorie, měření energie a hybnosti a velmi efektivní identifikaci nabytých částic. Elektromagnetický kalorimetr pracuje na principu scintilace, tj. záření emitované srážkami částic reaguje se scintilátorem, který produkuje sérii záblesků různé intenzity [4]. Tyto záblesky jsou zachyceny elektronikou a transformovány na digitální signál. Detektor PANDA používá stovky scintilátorů, ve tvaru krychlových krystalů vyrobených z PbWO_4 , jejichž scintilační vlastnosti silně závisí na teplotě. Jelikož výtěžek světla ze scintilačních krystalů roste s klesající teplotou, je zásadní udržovat tyto krystaly na velmi nízkých teplotách. Kromě toho šum produkovaný zesilovací a odečítací technikou též klesá s klesající teplotou. Společně s intenzitou záblesku se mění v závislosti na teplotě také doba rozpadu částic [4]. Snahou je tedy udržovat teplotu krystalů co nejstabilnější.

Tato práce se zabývá koncepčním návrhem takového chladicího systému, který by umožnil během činnosti detektoru udržovat nízké teploty krystalů, homogenní rozložení a stabilitu teploty přes všechny krystaly. Dále, je pro koncepční návrh analyzován i vliv tlakové ztráty celého chladicího systému, od níž se následně odvíjí návrh a požadavky na hlavní čerpadlo systému. Pro analýzy tlakových ztrát bylo použito dvou přístupů, a to analytického 1D výpočtu a dále numerické 3D simulace. Pro numerickou simulaci bylo využito celé geometrie chladicího systému, avšak bez dalších komponent vyskytujících se v kalorimetru (krystaly apod.). Pro analýzy teplotního pole byla vybrána pouze část geometrie kalorimetru, která však byla pro účely analýz vymodelována velmi podrobně.

V této práci bude nejdříve stručně popsána konstrukce detektoru PANDA, viz kapitola 2. V další části práce, tedy v kapitole 3, budou shrnuty požadavky kladené na návrh požadovaného chladicího systému. V neposlední řadě, bude v kapitole 4, detailně popsána numerická simulace chladicího systému, z hlediska rozložení teplotního pole. V kapitole 5, pak bude představena numerická simulace navrženého systému, z hlediska tlakových ztrát. Obě numerické simulace budou diskutovány společně s rozбором jejich výsledků. V závěru této práce, bude v kapitole 6 popsán 1D výpočet tlakových ztrát, jenž bude využit jako nástroj pro návrh variantních řešení chladicího systému. Nutno dodat, že pro validaci 1D výpočtu bylo využito 3D numerické simulace, neboť nejsou k dispozici experimentální data.

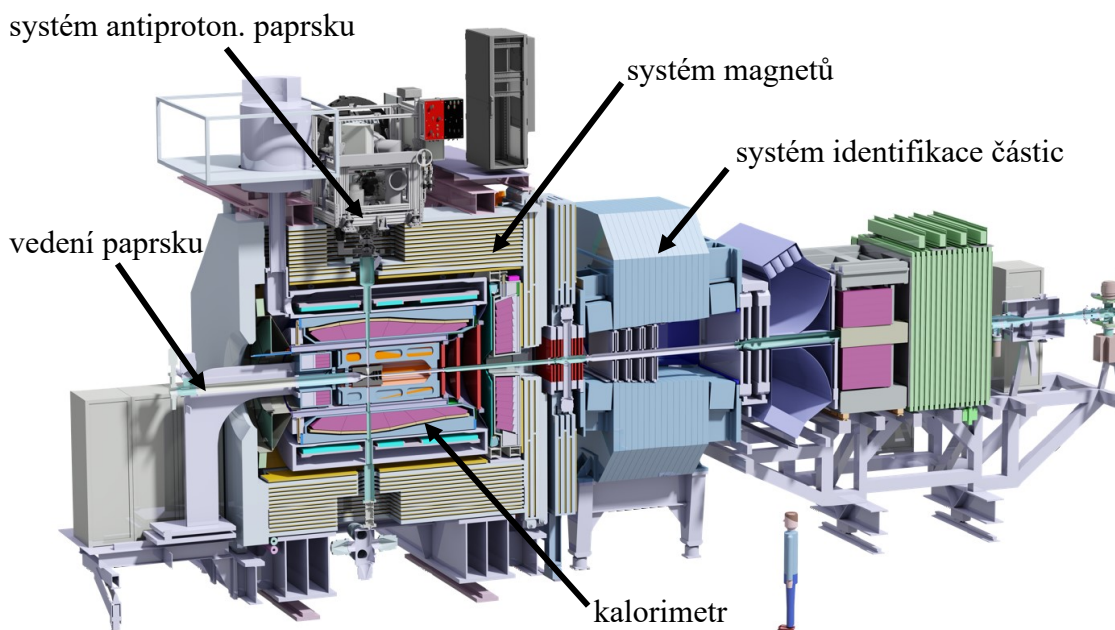
2 Popis detektoru PANDA

Jak již bylo uvedeno, HESR je jedním z urychlovačů umístěných v nově vznikajícím komplexu FAIR. Schematicky je tento urychlovač znázorněn na Obr. 2. Mezi jeho hlavní komponenty patří již zmiňovaný detektor PANDA a dále detektor Koala, jenž slouží k měření diferenciálního průřezu antiproton-protonového elastického rozptylu [2].



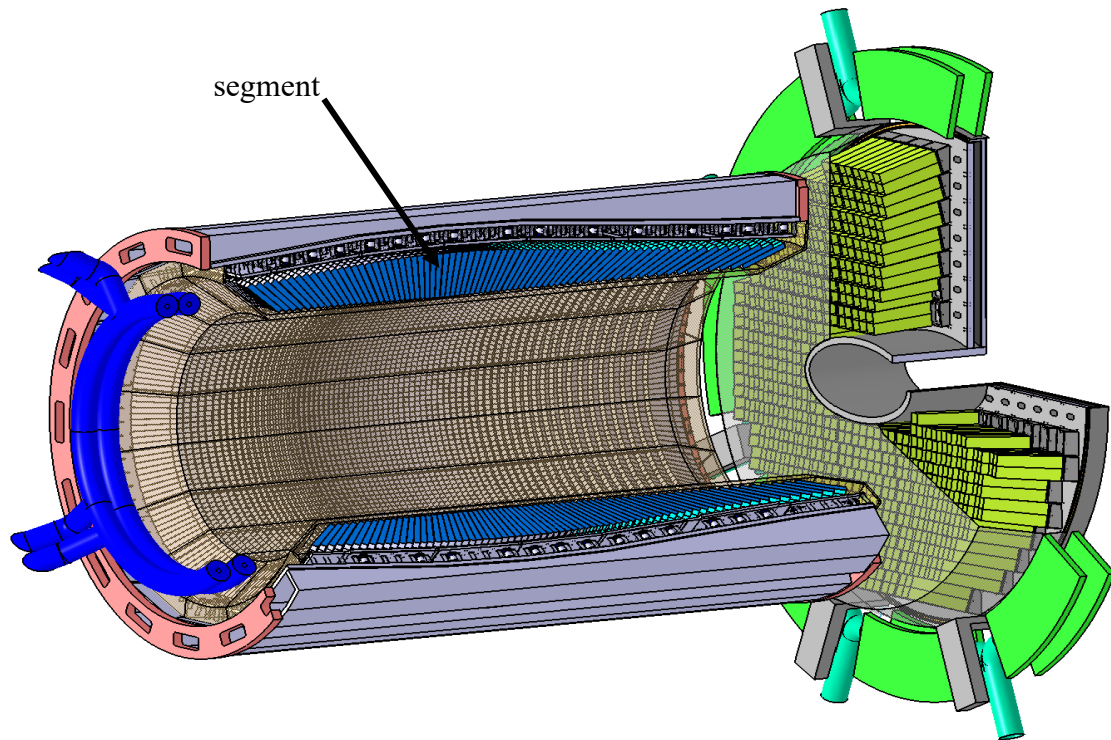
Obr. 2. HESR [2]

Detektor PANDA se skládá z několika velkých subsystémů, které je možno vidět na Obr. 3. Tato práce se však zaměřuje pouze na samotný kalorimetr, jenž je zodpovědný za dobrou identifikaci částic a záření vzniklého antiproton-protonovými srážkami.



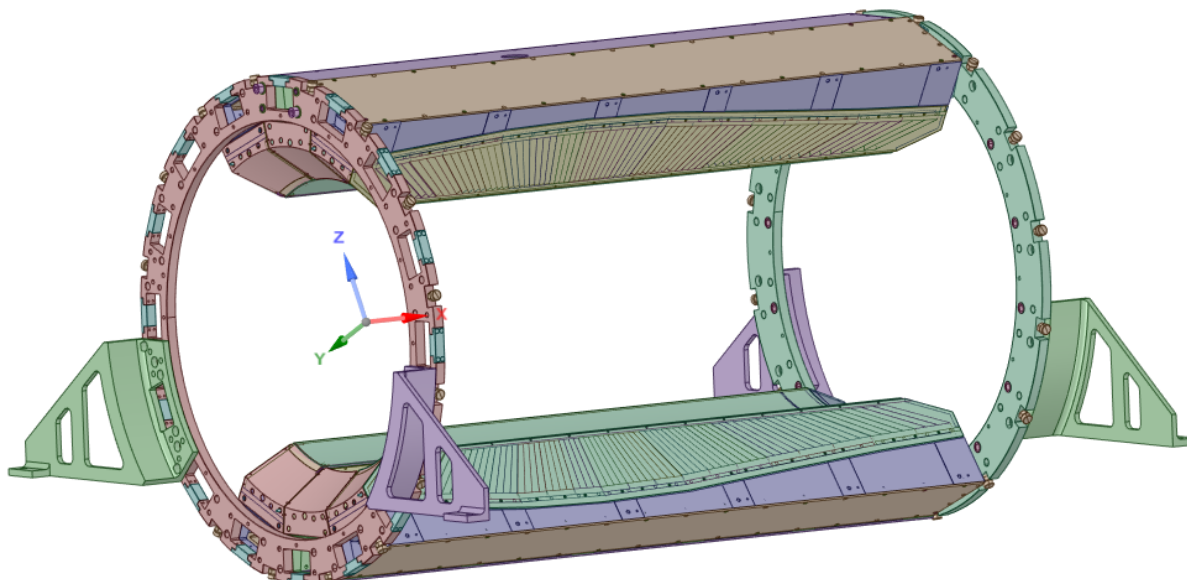
Obr. 3. Model subsystémů detektoru PANDA [2]

Samotný kalorimetr, viz Obr. 4, je tvořen 16 segmenty sestavenými do tvaru válce. Každý segment obsahuje 710 scintilačních detektorů natočených do společného bodu, ve kterém by měl probíhat střet částic. Do stejného bodu směřují i krystaly na bočních stěnách kalorimetru, které však nejsou předmětem této práce, jelikož mají samostatný chladicí systém, který však není výrazně prostorově omezen, a jeho návrh tedy vychází hlavně z potřebného chladicího výkonu. Jak již bylo uvedeno, krystaly převádějí záření na slabé světelné záblesky, které jsou dále převáděny na elektronický signál. Aby však získaná data byla důvěryhodná, je nutné udržovat zmiňovanou teplotní stabilitu krystalů.



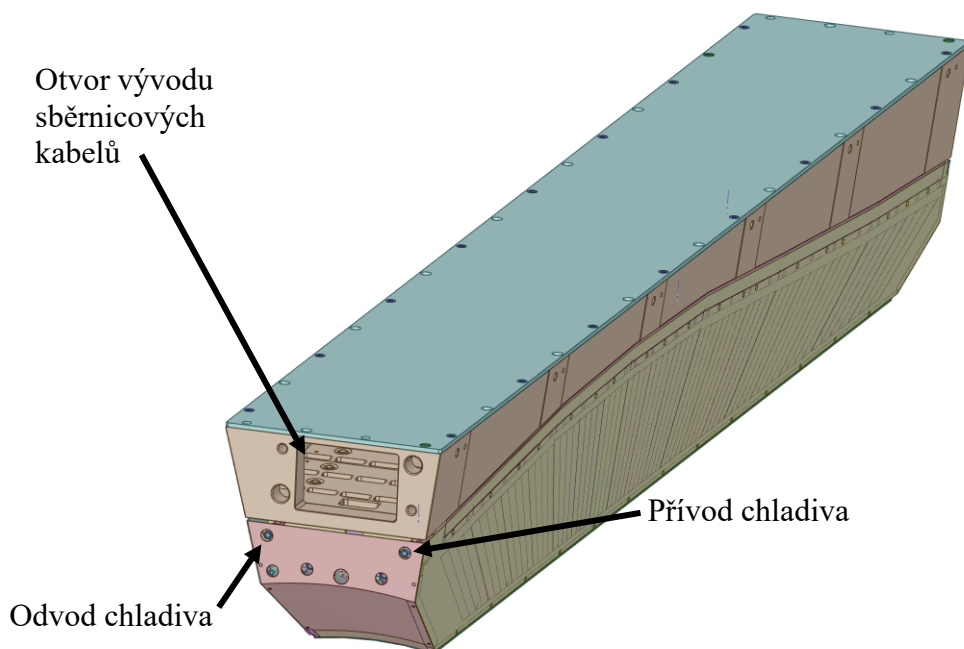
Obr. 4. Elektromagnetický kalorimetr [5]

Pro detailnější popis konstrukčních částí kalorimetru bude využito předběžného modelu kalorimetru, tzv. barelu, který byl dodán konstruktéry kalorimetru, a lze jej vidět na Obr. 5. Tento model je složen z šesti krystalových segmentů a dále z konstrukce, která drží jednotlivé segmenty na svých pozicích.



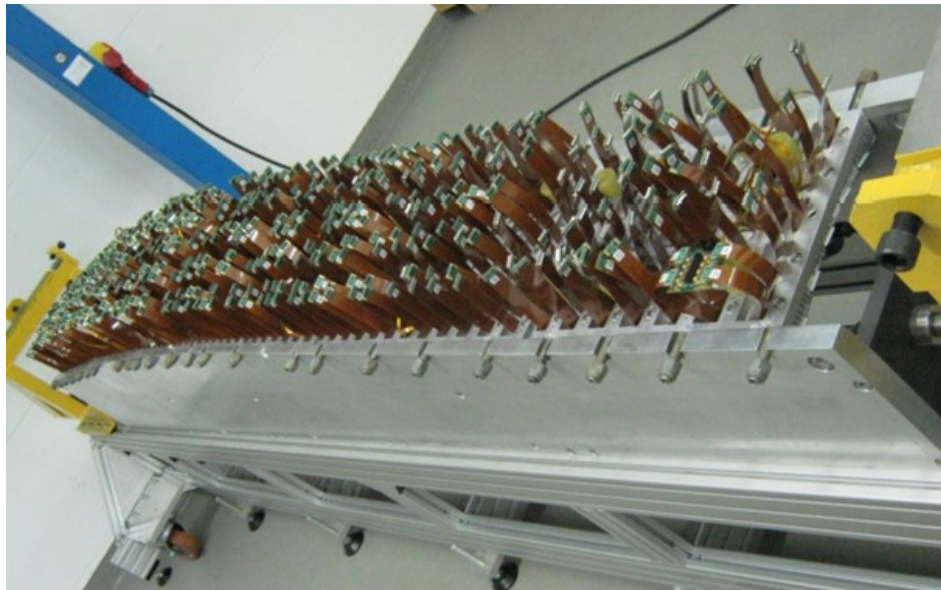
Obr. 5. Zadaná geometrie (barel)

Pro účely této práce se nyní detailněji zaměříme na popis jednoho segmentu, jehož detail je možno vidět na Obr. 6. U tohoto detailu zakrytovaného modelu segmentu je především nutno poukázat na otvor, kterým musejí procházet všechny kabely měřicí techniky vedoucí k jednotlivým krystalům. Z Obr. 6, je mimo jiné možno vidět i vývody z chladicího okruhu jednoho segmentu. Pro lepší představu problematiky pojící se s množstvím kabelů a měřicí techniky je dále uveden Obr. 7, na kterém je možno vidět sestavený prototyp jednoho segmentu. Při pohledu na tento prototyp, viz Obr. 7, je patrné značné množství sběrných kabelů, jenž se nachází v horní části každého ze segmentů kalorimetru.



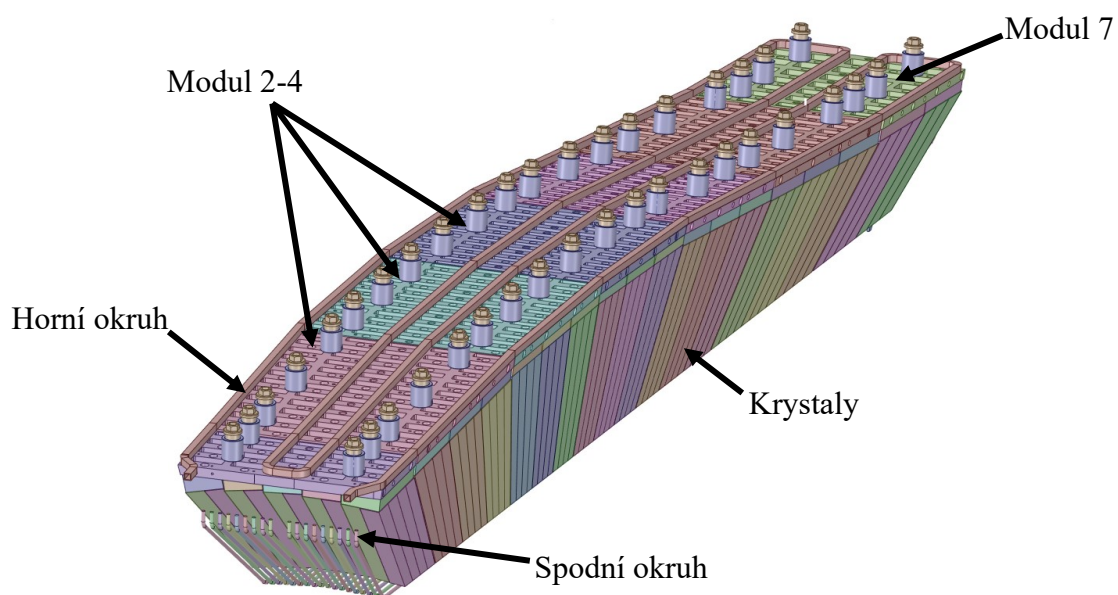
Obr. 6. Detail zakrytovaného segmentu

Množství sběrných kabelů a měřicí techniky bude dále jedním z hlavních omezení, se kterým se při návrhu chladicího systému budeme v této práci muset vypořádat.



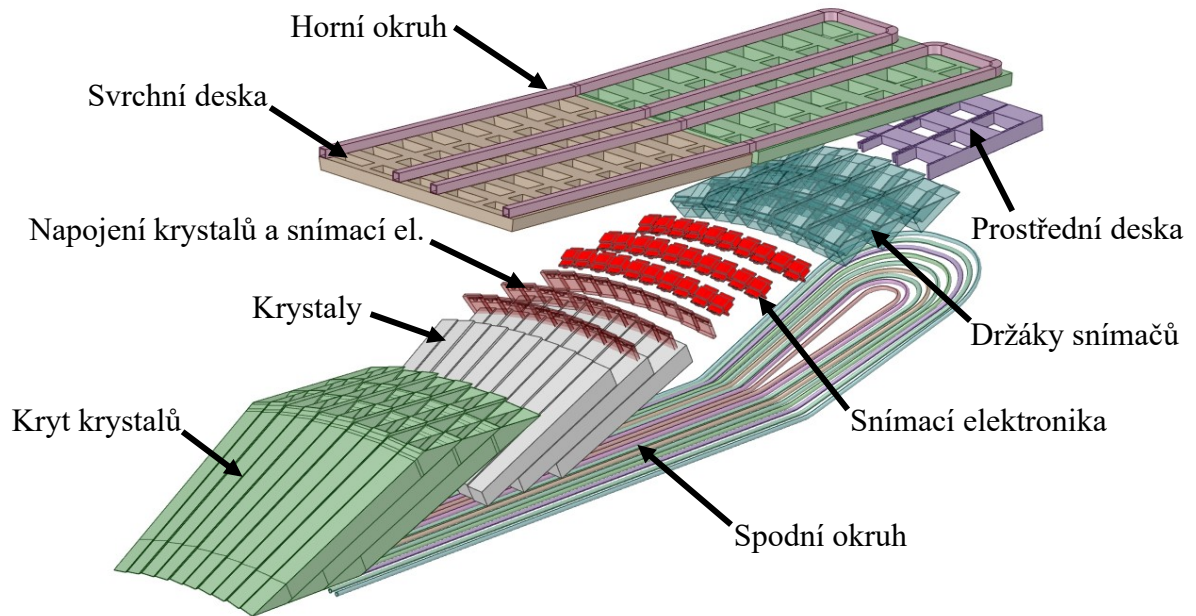
Obr. 7. Prototyp segmentu s měřicí technikou [4]

Na Obr. 8 pak můžeme vidět zmiňovaný segment bez krytů a měřících zařízení, který je rozdělen na sedm modulů, jenž jsou na obrázku barevně rozlišeny. U Obr. 8, je nutno poukázat na skutečnost, že jednotlivé moduly se liší nakloněním krystalů a také jejich počtem. Pro následné analýzy je také důležité zmínit, že u posledního modulu s číslem 7, dochází k otáčení trubiček chladicích okruhů, a proto je možno předpokládat, že zde bude o něco intenzivnější odvod tepla než u ostatních modulů. Jako další, je z Obr. 8 vidět, že segmenty disponují dvěma separátními chladicími okruhy, jedním umístěným nad a druhým umístěným pod segmentem. Pro účely této práce budeme okruhy nazývat jako horní a spodní chladicí okruh, dále jen horní a spodní okruh.



Obr. 8. Detail segmentu bez krytů

Jak již bylo uvedeno, každý segment je rozdělen na 7 modulů, tyto moduly jsou složeny z několika párů krystalů a dalších technických součástí, zajišťujících správné ustavení krystalů z pohledu jednoho modulu. Detailně jsou konstrukční součásti modulů ukázány na Obr. 9, kde je uvedena rozstřelená sestava modelu části modulu 7.



Obr. 9. Rozstřelená sestava modulu 7

3 Chladicí systémy

Hlavním úkolem této práce je, jak již bylo uvedeno v kapitole 1, navrhnout takový chladicí systém kalorimetru, který by během jeho činnosti, umožňoval udržovat velmi nízkou teplotu, její stabilitu a homogenní rozložení přes všechny krystaly. Za tímto účelem bude kalorimetr vybaven vlastním chladicím systémem, jenž musí pokrýt potřebný chladicí výkon.

Požadavky na potřebný chladicí výkon systému, jsou dány zdroji tepla vyskytujícími se v segmentech kalorimetru. Těmito zdroji jsou konkrétně čipy měřící neboli snímací elektroniky, jenž je možno vidět na Obr. 9, a dále sběrníkové kabely. Jako další zdroj tepla je nutno uvažovat i teplo, které se do měřícího prostoru dostává vedením z okolí. Detailně budou zdroje tepla popsány v kapitole 4.2, zabývající se návrhem chladicího systému z hlediska rozložení teplotního pole.

Jak je z Obr. 8, potažmo Obr. 9 možno vidět, u jednoho segmentu se v předběžném návrhu nacházejí dva chladicí okruhy, tedy zmiňovaný horní a spodní okruh. Při návrhu požadovaného chladicího systému tedy budou muset být navrženy dva separátní chladicí systémy. Horní chladicí systém bude sestávat z již zmiňovaného horního chladicího okruhu a dále z rozváděcího potrubí, jenž se bude starat o přívod a odvod chladiva z horních chladicích okruhů jednotlivých segmentů. Spodní chladicí systém, bude sestávat ze stejných konstrukčních částí jako horní, s tím rozdílem, že se bude starat o dodávku a odvod chladiva ze spodních chladicích okruhů. Celý chladicí systém tak bude sestávat ze značného množství trubek, jejichž tvar, rozměr a umístění je předmětem návrhu chladicího systému. Detailně budou návrhy obou chladicích systémů popsány v kapitole 5, zabývající se návrhem chladicího systému z hlediska požadované tlakové ztráty. Druhým hlavním úkolem této práce, je tedy navrhnout zmiňované chladicí systémy, v závislosti na celkové tlakové ztrátě, jenž v konečném důsledku ovlivní výběr hlavního čerpadla systému.

3.1 Požadavky na návrh chladicích systémů

V souladu s hlavními cíli této práce budou v této kapitole shrnuty požadavky, jež jsou zákazníkem kladeny, na navrhovaný chladicí systém, tedy na horní a spodní chladicí systémy zároveň.

Z hlediska rozložení teplotního pole, jsou požadavky následující. Pracovní rozsah teplot, ve kterých se krystaly za chodu kalorimetru musí pohybovat, byl zvolen v oblasti -30 až -20 °C. Zmiňovaná stabilita a homogenita teplotního pole krystalů, je následně dána požadavkem, že maximální rozdíl teplot všech krystalů se musí pohybovat do hodnoty 1 °C.

Z hlediska tlakové ztráty jsou požadavky na chladicí systémy specifikovány zákazníkem tak, že tlaková ztráta obou chladicích systémů, tj. chladicího systému jako celku, by neměla přesáhnout hodnotu 1 bar, a to při požadovaném průtoku chladicího média 2,78 kg/s. Tato podmínka plyne z požadavku na výkon a provozní náklady čerpadla. Shrnutí prvotních požadavků na celý chladicí systém je možno nalézt v Tab. 1.

Tab. 1. Prvotní požadavky na chladicí systémy

t [°C]	Δt [°C]	Δp [bar]	\dot{m} [kg/s]
-30 až -20	≤ 1	≤ 1	$\leq 2,78$

3.2 Volba pracovního média

Pro splnění výše zmíněných požadavků budou oba systémy pracovat s chladicím médiem, jakožto směsí vody a methanolu, v poměru 40/60. Tento typ chladiva je dán zadavatelem výpočtu, nicméně v úvahu by připadaly i další směsi jako například voda a ethanol. Pro všechny druhy chladicího média však platí následující omezující kritéria. Chladicí médium musí zachovat kapalnou fázi i při zmiňovaných velmi nízkých pracovních teplotách. Dále, hraje při výběru chladiva roli i jeho viskozita, jelikož ta v konečném důsledku ovlivní i výsledné tlakové ztráty systému, tedy se zvyšující se viskozitou média by tlaková ztráta rostla. V neposlední řadě hrají při výběru chladiva roli také zdravotní nezávadnost, cena, vznětlivost apod. Materiálové vlastnosti použitého chladiva je možno nalézt v Tab. 2.

Tab. 2. Materiálové vlastnosti chladiva

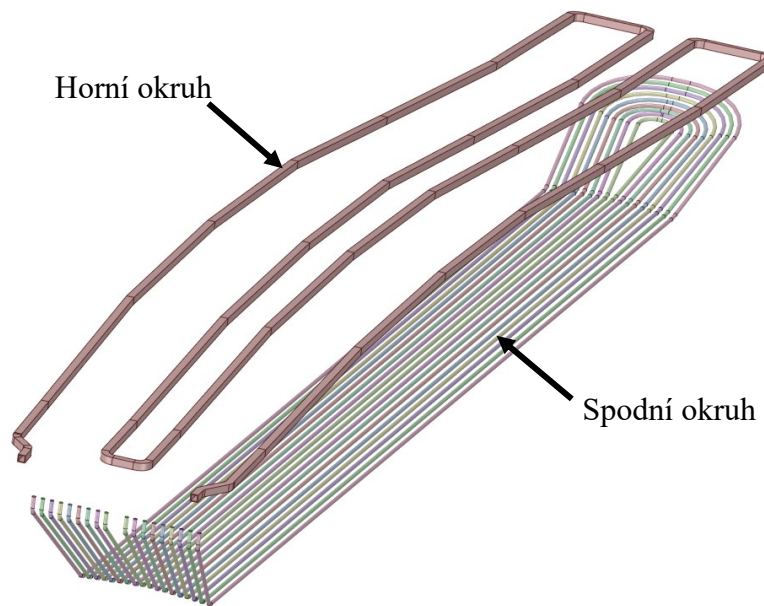
Médium	c_p [J/(kg·K)]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa·s]	λ [W/m·K]	M [kg/mol]
voda/methanol (40/60)	3151	930	$7,7e^{-3}$	0,341	26,5

Kde c_p je měrná tepelná kapacita média, ρ je hustota média, μ je dynamická viskozita, λ je součinitel tepelné vodivosti a M je molární hmotnost.

3.3 Horní chladicí okruh

Celý chladicí systém sestává ze dvou již zmíněných chladicích systému, a to horního a spodního. Detailně budou návrhy geometrie horního a spodního systému pro účely numerické simulace proudového pole popsány v kapitole 5. Nejprve, je však nutno zmínit omezení, jenž se pojí se samotnými chladicími okruhy, vyskytujícími se v chladicích systémech.

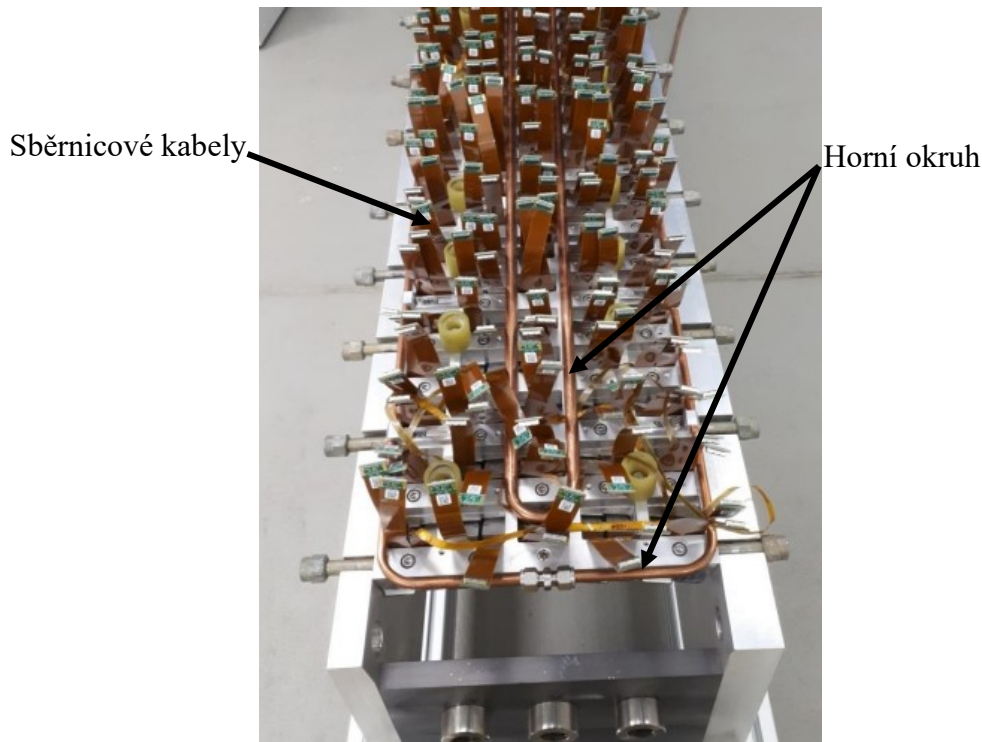
V této kapitole budou popsány úvahy a výzvy spojené s návrhem horního chladicího okruhu. Na Obr. 10, vytvořeného z Obr. 8, odebráním jednotlivých modulů, je možno vidět předběžný návrh chladicích okruhů.



Obr. 10. Předběžný návrh chladicích okruhů

Jak je z Obr. 10 patrné, u předběžného návrhu horního chladicího okruhu, je uvažováno s použitím trubiček čtvercového průřezu. Čtvercový tvar trubiček, se u předběžného návrhu horního okruhu vyskytuje z důvodu předpokládaného vhodnějšího přestupu tepla, vlivem lepšího kontaktu se sousední (svrchní) deskou. Tvar a topologie trubiček horního okruhu, však bude předmětem další optimalizace.

Jak již bylo uvedeno, viz kapitola 2., jednou z nejzávažnějších překážek, se kterou se musíme při konstrukčním návrhu chladicího systému vypořádat, je nedostatek dostupného prostoru pro umístění horního okruhu. Každý z krystalů je totiž vybaven vlastní čtecí elektronikou, která je dále připojena k datové jednotce pomocí sběrníkových kabelů. Omezení prostoru je detailněji možno vidět na Obr. 11.



Obr. 11. Detail prototypu segmentu s měřicí technikou [4]

Restrikce horního okruhu tedy spočívá v konstrukčním omezení maximálního vnějšího průměru trubiček na hodnotu okolo 10 mm, a dále v omezení počtu chladicích trubiček, které se mohou v horním okruhu nacházet, což je dáno volným prostorem mezi jednotlivými sběrníkovými kabely. Dále, vzhledem k tomu, že přívod i odvod chladiva musí být na jedné, a to čelní straně kalorimetru, je počet přívodních trubiček omezen na polovinu. Toto omezení je lépe patrné z Obr. 4, na kterém je vidět, že v zadní části kalorimetru se nachází zmiňované boční krystaly, a není tedy možno na tuto stranu kalorimetru umístit prstence rozváděcího potrubí. S ohledem na prostorové uspořádání bylo stanoveno, že v horním okruhu smí být nanejvýš čtyři paralelní trubice. Je také nutno podotknout, že maximální vnější, tedy i vnitřní průměr trubiček horního okruhu rovněž ovlivňuje hmotnostní průtok okruhem. Protože navýšení hmotnostního průtoku vede ke kvadratickému nárůstu tlakové ztráty, není s ohledem na požadovanou hodnotu tlakové ztráty v systému, vhodné průměr trubiček dále zmenšovat.

Další omezení, souvisí s polohou horního okruhu. Trubičky je totiž možno umístit pouze na svrchní desku, viz Obr. 9. Svrchní deska se však nachází v relativně velké vzdálenosti od elektroniky produkující odpadní teplo, což vede k úvaze, že teplota chladicího média musí být dostatečně nízká na to, aby byl chladicí systém schopen vyhovět požadavkům, na uchazení krystalů. Detailněji bude toto omezení popsáno v kapitole 4.2. Konstrukce horního chladicího okruhu se musí tedy primárně přizpůsobit možnému umístění, s ohledem na další nezbytné komponenty, a to zejména zmiňované sběrníkové kabely, umístěné v horní části každého segmentu. Odvedený tepelný výkon horního okruhu, je tedy nutno do značné míry zajistit vhodným zvolením parametrů chladicího systému. Primárním úkolem u horního okruhu je tedy nalézt vhodný kompromis mezi chladicím výkonem a dostupným prostorem.

3.4 Spodní chladicí okruh

V návaznosti na problematiku spojenou s návrhem horního chladicího okruhu, je dále nutno zmínit omezení, jenž se pojí s návrhem okruhu spodního. Jak je z Obr. 10 možno vidět, předběžný návrh spodního okruhu uvažuje s použitím trubiček kruhového průřezu, a to konkrétně o vnějším průměru 6 mm a vnitřním průměru 4 mm.

Spodní okruh není výrazně dispozičně omezen, jelikož ve spodní části segmentů se nenachází žádná měřicí technika, a jeho návrh tedy bude proveden jen v závislosti na potřebném chladicím výkonu. Vnější průměr trubiček spodního okruhu není vzhledem k dostupnému prostoru, mezi jednotlivými trubičkami, vhodné dále zvyšovat. Tato úvaha však souvisí pouze se skutečností, že u předběžného návrhu se nachází 18 paralelních trubiček. Jejich počet, a tedy i rozměr, by však mohl být předmětem případné optimalizace. Jako další je nutno uvést, že podobně jako tomu bylo v případě horního okruhu, není vhodné průměr trubiček spodního okruhu ani snižovat, a to s ohledem na požadovanou (co nejnižší) tlakovou ztrátu.

3.5 Metodika návrhu chladicích systémů

V důsledku výše zmíněných požadavků, bude v této práci přistupováno k návrhu chladicího systému ze dvou hledisek. V první řadě bude tato práce navazovat na již provedenou numerickou simulaci výzkumnými pracovníky na ZČU [4], přičemž do původní simulace neboli výchozího výpočtu teplotního pole, bude zanesen spodní okruh a pomocí takto připraveného matematického modelu, bude vyhodnocen přestup tepla, mezi jednotlivými chladicími okruhy a krystaly. Důvody k zanesení spodního okruhu do výchozí studie, budou detailně popsány v kapitole 4.1. Dále bude vyhodnoceno rozložení teploty napříč krystaly, s ohledem na splnění, či nesplnění požadavků na chladicí systémy.

V druhé řadě se tato práce bude zabývat návrhem rozváděcího potrubí a implikací tohoto potrubí do předběžného návrhu chladicích okruhů, tak aby byl vytvořen celistvý chladicí systém, jenž zajistí dopravu média k chladicím okruhům a dále jeho odvod zpět do nádrže. Navržený systém bude analyzován dvěma různými výpočetními postupy. Nejprve bude provedena 3D simulace systému pomocí CFD, na reálně tvarovaném potrubí. Vzhledem k náročnosti provedení simulace (dlouhá příprava výpočtu, výpočetní náročnost apod.), není tato simulace ale příliš vhodná pro analýzu vlivu koncepčních změn systému (počet trubek systému, změna průřezu, změna rozměrů apod.), na velikosti tlakové ztráty. Z tohoto důvodu bude vytvořen rychlý a dostatečně přesný 1D výpočtový nástroj, který by umožnil rychlou analýzu vlivu změny geometrie systému na tlakovou ztrátu. Tento 1D nástroj bude validován pomocí provedeného detailního CFD výpočtu, neboť experimentální data nejsou k dispozici. Detailněji budou návrhy systému popsány v následujících kapitolách.

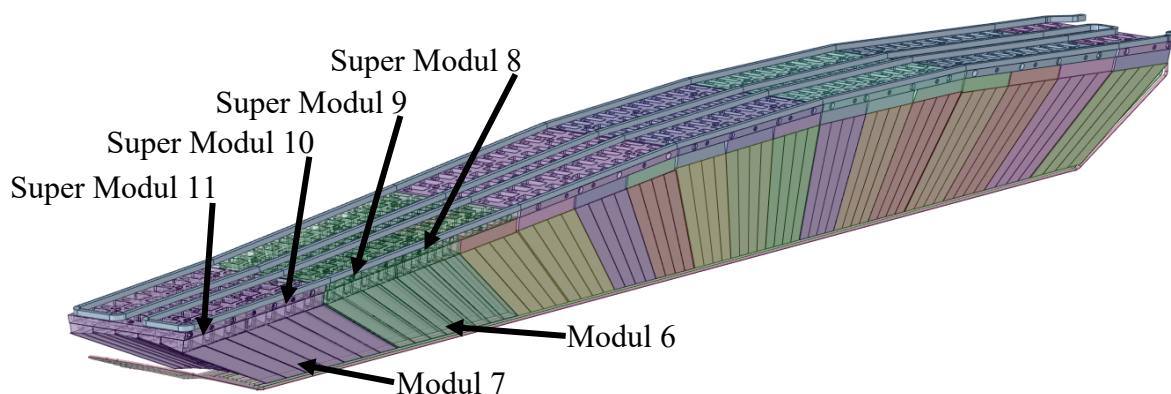
4 Návrh chladicího systému z hlediska teplotního pole

Úvahy při návrhu chladicího systému a omezení, která je nutno při návrhu brát v potaz se liší u obou výše zmíněných hledisek. V této kapitole se bude práce zabývat popisem přípravy výpočetních domén, pro numerickou simulaci chladicího systému, z hlediska rozložení teplotního pole. Následně, se v této kapitole bude práce zabývat úvahami, které byly provedeny během sestavení matematických modelů.

Při sestavování výpočetní domény pro numerickou simulaci teplotního pole, bylo primárně vycházeno z již zmiňované studie [4]. Jelikož tato studie se věnovala tvorbě výpočetní domény a návrhu matematického modelu velmi podrobně, bude v následující kapitole stručně prezentován vytvořený matematický model, získané výsledky a nedostatky provedených analýz. Dále bude prezentován rozšířený matematický model úlohy, který by měl odstraňovat nedostatky předchozích výpočtů a poskytnout tak věrohodnější informace o rozložení teplotního pole v krystalech kalorimetru.

4.1 Výchozí studie teplotního pole

Při popisu výchozí studie se nejdříve zaměříme na návrh a úpravy geometrie výpočetní domény, která je výchozím modelem pro doplňující výpočty teplotního pole, tj. rozšířenou simulaci, viz kapitola 4.2. Na Obr. 12, je ještě jednou možno vidět zadanou geometrii jednoho segmentu. Nyní se však zaměříme na její popis, pro účely návrhu chladicího systému, z již zmiňovaného hlediska. V úvodu, je nutno dodat, že geometrie barelu, viz Obr. 5, je dosti komplikovaná a simulace celého barelu by byla časově příliš náročná, snahou je tedy doménu pro účely analýz značně zjednodušit.



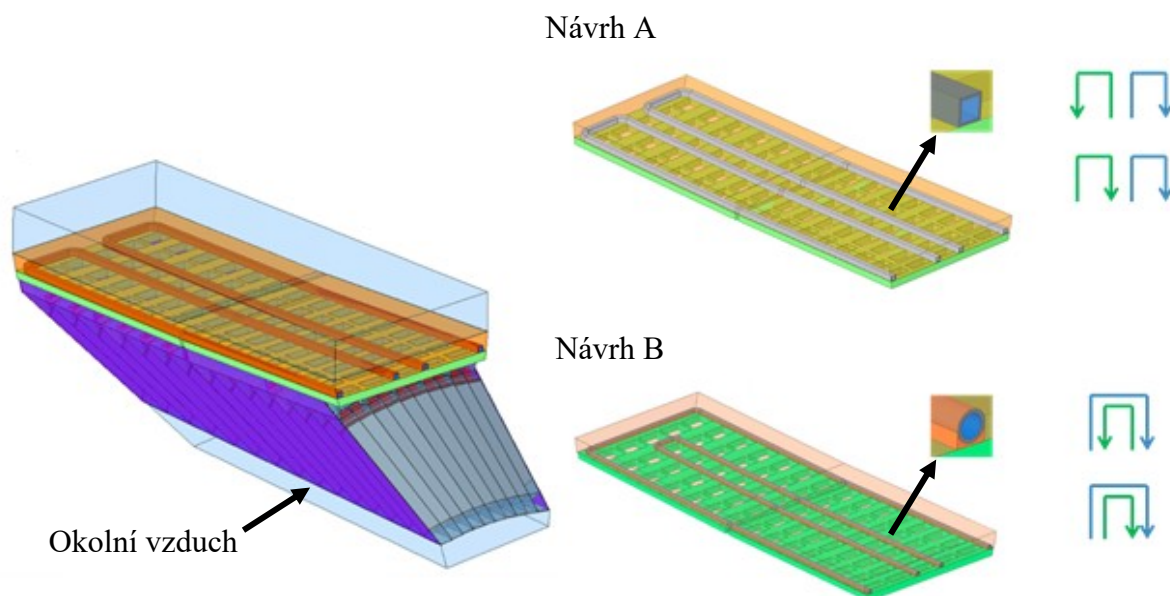
Obr. 12. Výpočetní oblast analýz teplotního pole [4]

Vzhledem k tomu, že každý ze segmentů má svůj vlastní chladicí systém, tzn. existuje jen jeden chladicí systém s paralelními trubicemi pro každý řez, postačí simulovat proces chlazení jen v jednom řezu tzn. u jednoho segmentu, namísto celého barelu. Avšak i samotný segment se skládá ze značného množství komponent. Z Obr. 12, je patrné, že segment je složen z několika modulů, a to konkrétně ze sedmi. Tyto moduly lze dále rozdělit na, tzv. super moduly. Simulování všech modulů, by však opět neúnosně zvyšovalo výpočetní náročnost celé simulace a proto, je snahou simulovat jen část geometrie, a to tak, aby byly zachyceny všechny podstatné jevy, související s fyzikálním popisem úlohy a výsledky byly posléze aplikovatelné i

na celou geometrii. To nám v konečném důsledku umožňuje výrazně snížit výpočetní čas a výpočetní nároky.

Ve studii [4] bylo, s ohledem na výše uvedené, rozhodnuto o simulaci pouze dvou posledních modulů. To vychází z předpokladu, že modul 6 je designem a topologií velmi podobný ostatním modulům a u modulu 7 dochází k otočení proudu chladicího média, a proto se očekává, že se zde bude lišit přenos tepla, oproti ostatním modulům. Nutno dodat, že pro prvotní analýzy se ve výchozí studii počítalo jen se simulací modulu 7, to se však po provedení simulací ukázalo jako nedostatečné, jelikož modul 7, není sám o sobě schopen poskytnout přenositelnost získaných výsledku na celý segment, a to z již zmiňovaného důvodu otáčení proudu chladiva.

Za těchto předpokladů byla výzkumnými pracovníky na ZČU vytvořena výpočetní doména pro účely simulace teplotního pole. Ve zmiňované studii [4], jsou mimo jiné rozebírány různé konfigurace horních chladících okruhů. Geometrii výpočetní domény a dvě rozdílné konfigurace zapojení je možno vidět na Obr. 13.

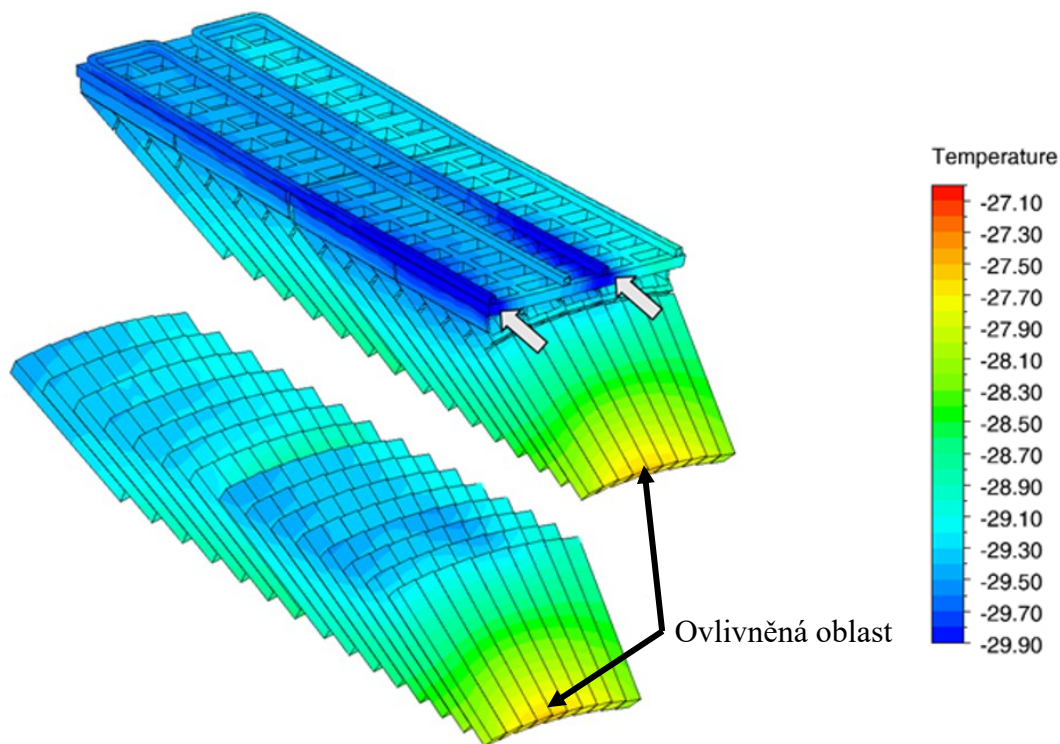


Obr. 13. Výpočetní doména výchozí studie [4]

V návrhu A, se vyskytují totožné smyčky horního okruhu, tvořeny čtvercovými trubkami, jež jsou umístěny vedle sebe. Čtvercové trubičky jsou zde z toho důvodu, že v prvotní fázi návrhu okruhu, se předpokládala jejich aplikace, z důvodu vhodnějšího přestupu tepla, v důsledku lepšího kontaktu se sousední (svrchní) deskou. Později se však ukázalo, že výrobní náklady takovýchto trubek by byly příliš vysoké, a proto bylo ve studii přikročeno k nahrazení čtvercového tvaru, tvarem kruhovým (návrh B). U návrhu s kulatými trubičkami, se předpokládá dosažení požadovaného přestupu tepla, pomocí vloženého materiálu pod trubičkami. Vlastnosti tohoto materiálu nebyly prozatím zákazníkem přesně specifikovány, tudíž je uvažován stejný materiál jako je materiál vlastních trubiček. Oba návrhy byly vyhodnocovány jak pro souproude, tak i protiproude uspořádání.

Pomocí analýz výsledků numerické simulace ve studii [4] bylo zjištěno, že výsledky rozložení teplotního pole jsou do značné míry ovlivněny nastavením okrajové podmínky fixní teploty $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, na spodní část krystalů. Toto ovlivnění, nacházející se u obou návrhů (A, B) i u

obou druhů uspořádání, je možno vidět na Obr. 14, kde je ovlivněná oblast ukázána na teplotních konturách krystalů u návrhu A, se souproutým uspořádáním. Toto ovlivnění je dáno tím, že horní systém odvede příliš tepla, což je způsobeno předimenzováním horního systému a spodní okrajová podmínka fixní teploty se chová tak, jako by do domény uměle vnášela tepelný zdroj.



Obr. 14. Rozložení teplotního pole u výchozí studie [4]

V konečném důsledku, je na základě těchto analýz, studií doporučeno, do výpočetní domény zahrnout i spodní okruh, což je dále předmětem této práce. Jak již bylo uvedeno čtvercové trubky jsou nevhodné z ekonomického hlediska, a proto bylo pro tuto práci zvoleno použití trubek kulatých, a to jak pro simulace teplotního pole, tak posléze i pro simulace pole proudového, tj. tlakových ztrát. Zmiňovaná studie dále předkládá, že všechny konfigurace horního okruhu vyhovují požadavku na maximální rozdíl teplot přes všechny krystaly do hodnoty 1 °C, avšak tato podmínka je u výchozí simulace platná pouze pro horní část krystalů, kde maximální rozdíl činí 0,7 °C. Po zvážení těchto výstupů byl pro doplňující výpočet vybrán návrh B s protiproudým uspořádáním, do kterého byl implementován spodní okruh.

Nejistoty výpočtu

V poslední řadě, je nutno zde zmínit také nejistoty výchozí simulace teplotního pole, platné i pro rozšířenou simulaci. Přenos tepla v segmentu, je povětšinou způsoben vedením tepla. Kontakty mezi jednotlivými komponentami, jsou pro účely CFD považovány za ideální. Skutečná montáž však tomuto předpokladu vyhovovat nemusí, tzn., že při montáži je možno

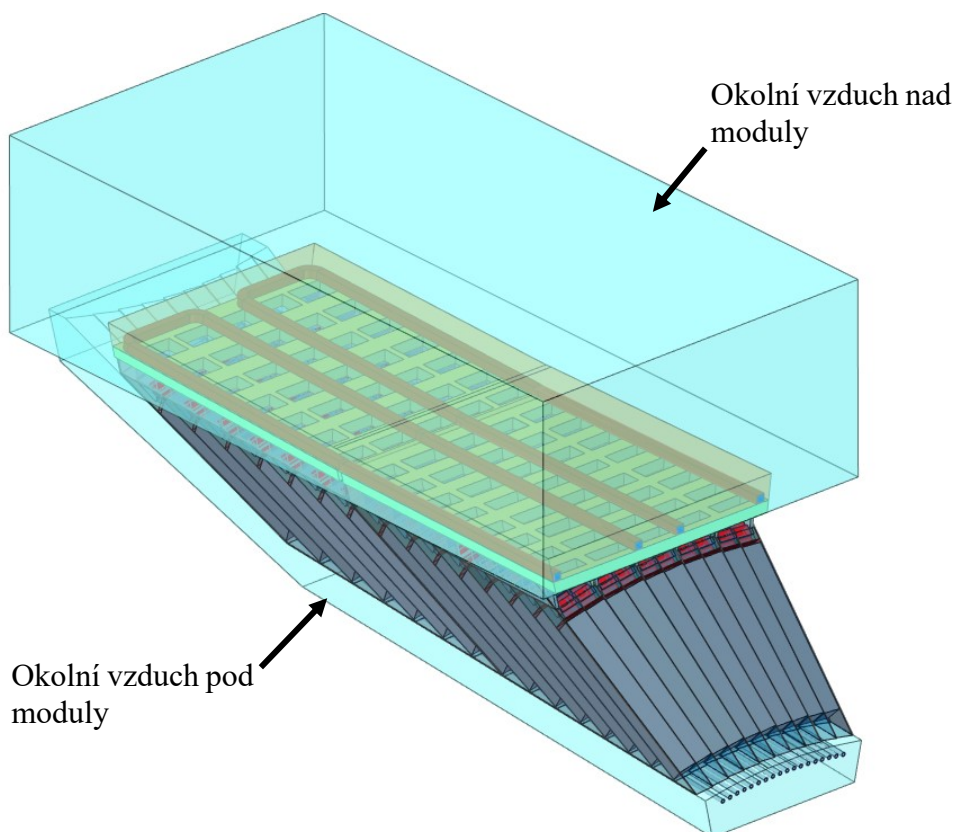
předpokládat například následující – horní chladicí okruh může v důsledku konstrukčního uspořádání sběrnicevých kabelů nepřímo doléhat na svrchní desku, dále je možno předpokládat, že svrchní deska nebude ve všech místech segmentu přímo doléhat na desku prostřední atd.

Jako další nejistotu je možno považovat vlastnosti chladicího média, jež ty je pro požadované velmi nízké pracovní teploty obtížné dohledat. Požadované materiálové vlastnosti směsí, jako je voda/methanol, jsou převážně dostupné jen pro teploty $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jako příklad je možno uvést studii [6], jež jako jediná (dohledaná), uvádí vlastnosti směsi voda/methanol i při teplotách $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, a tudíž byla v této práci do jisté míry využita jako nástroj pro případné variování vlastností požadovaného média.

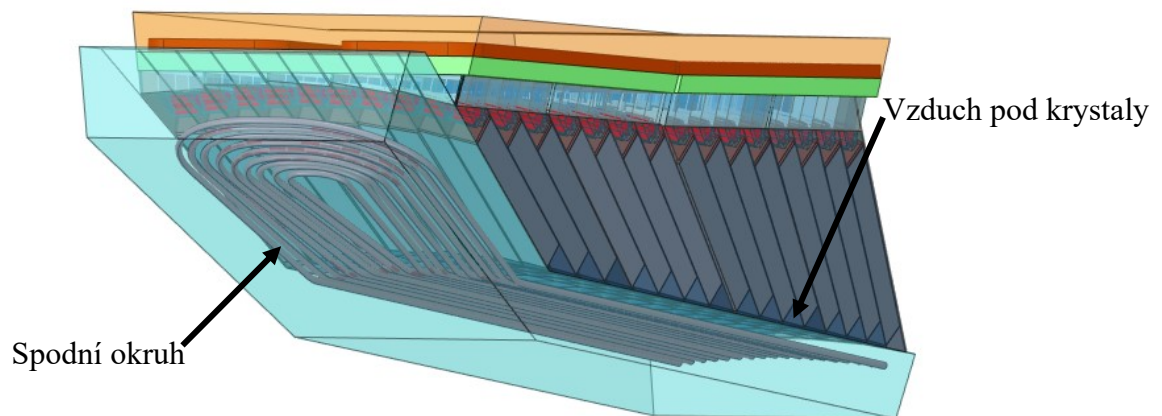
4.2 Rozšířená simulace teplotního pole

S ohledem na omezení, předpoklady, a výstupy popsané v kapitole 4.1, byla sestavena nová výpočetní doména, jež doplňuje výchozí o spodní chladicí okruh. Implementaci nově vytvořené domény do návrhu A je možno vidět na Obr. 15 a Obr. 16.

Pro přípravu doplňující domény byla využita geometrie předběžného návrhu spodního okruhu. Bylo tedy použito 9 trubiček kruhového průřezu s vnějším průměrem 6 mm a vnitřním průměrem 4 mm. Jelikož v této simulaci se bude práce zabývat přestupem, potažmo prostupem tepla, je geometrie trubiček zachována v plném rozsahu, a je navíc doplněna o doménu zastávající chladivo, tj. inverzní objem trubiček, a o doménu zastávající okolní vzduch. Doména okolního vzduchu byla vytvořena pomocí přidaného objemu pod moduly, a jeho následném vymodelování tak, aby přesně kopíroval spodní stranu modulů 6-7 a také zadní stranu modulu 7.



Obr. 15. Rozšířená výpočetní doména (přední pohled)



Obr. 16. Rozšířená výpočetní doména (zadní pohled)

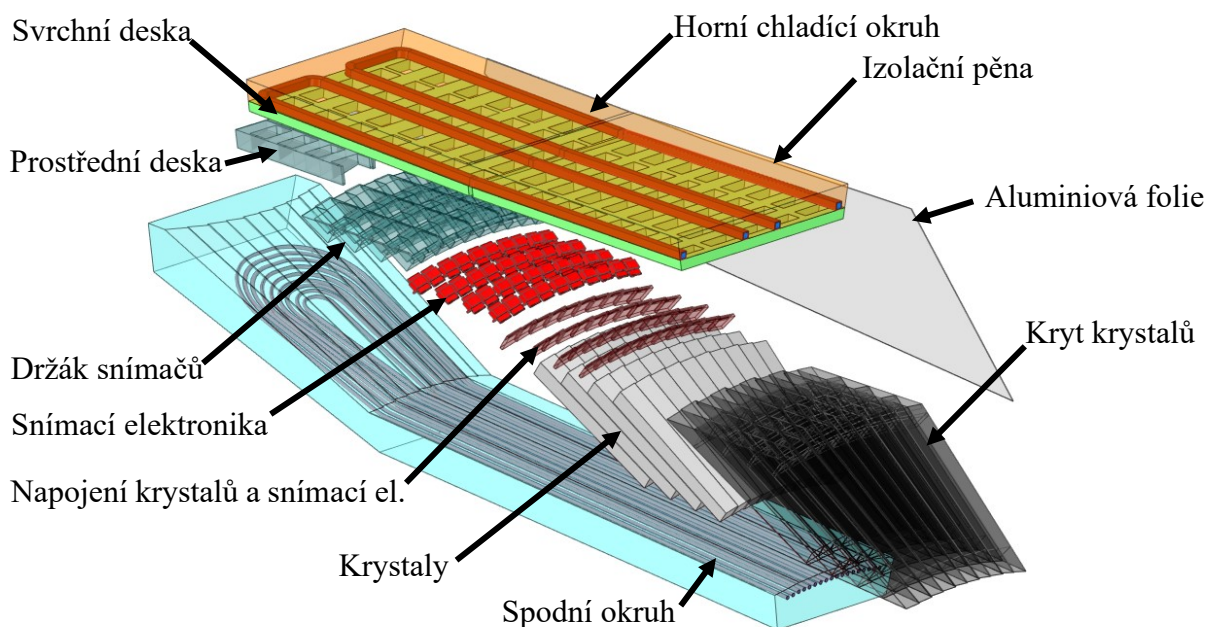
Cílem implementace spodního okruhu do modelu výchozí studie, je zajistit, aby se odvod tepla z krystalů uskutečnil pomocí chladicího média a teplo nebylo odváděno vzduchem pod krystaly, což bylo způsobeno zmiňovanou fixní okrajovou podmínkou na spodní ploše vzduchu vyskytující se pod krystaly. Na tuto plochu byla ve výchozím výpočtu nastavena hodnota $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při jejím nastavení, nebyl samotný horní okruh schopen zajistit homogenní rozložení teploty přes všechny krystaly v celé jejich délce, viz ovlivnění na Obr. 14.

4.2.1 Nastavení numerické simulace teplotního pole

Při nastavování numerické simulace byly do výpočtu zaneseny následující vstupy. Referenční tlak domény chladiva byl nastaven na hodnotu 0 bar, tak, aby nebylo nutno rozlišovat relativní a absolutní tlak při definování tlakových okrajových podmínek na výstupu. Model turbulence byl pro simulaci proděnění v trubičkách okruhů zvolen SST $k-\omega$ ("Shear Stress Transport") s intenzitou turbulence na vstupu 5 %. Do simulace byla zahrnuta i gravitace, jelikož vertikální rozdíly u trubiček, a to především spodního okruhu, nejsou zanedbatelné. Pro definování CFD simulace je zapotřebí také počátečních a okrajových podmínek. Vzhledem k tomu, že tato simulace byla prováděna jako stacionární, bylo využito pouze podmínek okrajových. Na vstupu chladicího média byla nastavena okrajová podmínka teploty na hodnotu $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a hmotnostního průtoku $0,12\text{ kg/s}$. Na výstupu média byla nastavena podmínka výstupního tlaku na hodnotu 1,012 bar, což odpovídá výstupu do atmosféry. Jako médium je použita již zmiňovaná směs vody a methanolu (40/60) jejíž materiálové vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 2.

Za zdroj tepla v doméně jsou považovány čipy měřící elektroniky, jejichž tepelný výkon je odhadován na 150 mW [4]. Tento tepelný tok bude přenesen na vnitřní stěny svrchní desky, kde je předpokládán umístění procesorů. Tepelný tok produkovaný sběrníkovými kabely je uvažován jako 200 mW [4]. Jednotlivé komponenty nacházející se v doméně, je možno vidět na Obr. 17. Jak je z obrázku možno vidět, trubičky horního okruhu jsou umístěny až nad svrchní deskou, nikoli v okolí snímačů, které jsou považovány za zdroj tepla. Odvod tepla probíhá tedy zejména vedením přes řadu komponent a musí tak být zajištěn nejen vhodný kontakt mezi nimi, ale i nižší teplota chladicího média, pro vznik dostatečného teplotního spádu.

S tím souvisí nutnost zajištění turbulizace proudu v jinak dlouhých a rovných úsecích trubiček, kdy by v případě vzniku proudění laminárního nastal pokles přestupu tepla, čímž by se zvýšila teplota chladiva u stěny. To by v konečném důsledku snížilo chladicí efekt a odvod tepla z domény. Tato úvaha bude detailněji popsána v kapitole 6.



Obr. 17. Komponenty výpočetní domény

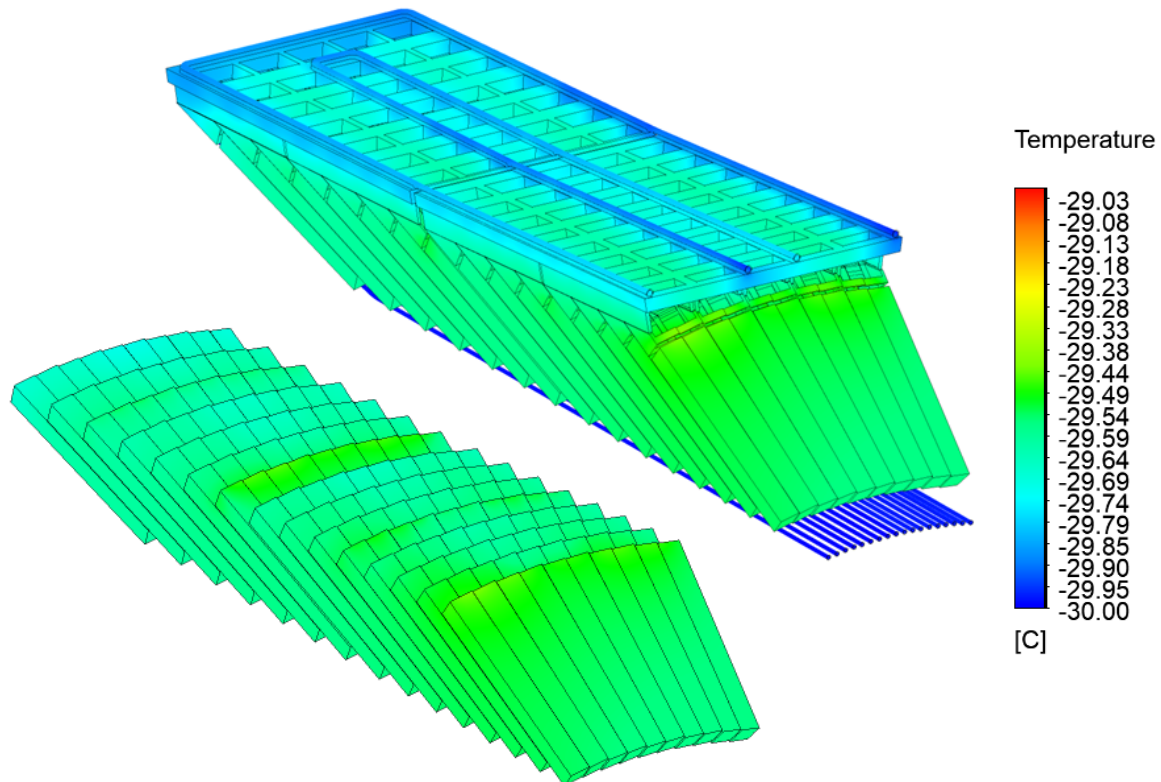
V neposlední řadě, teplota okolního vzduchu nad výpočetní doménou modulů, je nastavena na +25 °C. Takto nastavená okrajová podmínka simuluje přestup tepla, jenž se do kalorimetru dostává vedením z okolí. Teplota okolního vzduchu pod výpočetní doménou modulů, je pak nastavena na hodnotu -25 °C, a simuluje tak ustálený stav, ve kterém se kalorimetr za provozu bude nacházet. Jinými slovy lze ustálený stav chápat tak, že uprostřed, tj. v prázdném prostoru mezi segmenty, bude kalorimetr vzhledem ke krystalům relativně vychlazen. Plyn v obou doménách zastávajících okolní vzduch je uvažován jako ideální. Referenční tlak domén okolního vzduchu, byl nastaven na hodnotu 1 atm. Vzhledem k tomu, že doména okolního vzduchu nemá vstup ani výstup, je nutno nadefinovat tlakovou úroveň přes referenční tlak. Souhrn okrajových podmínek pro numerickou simulaci teplotního pole je možno vidět v Tab. 3.

Tab. 3. Nastavení CFD pro numerickou simulaci teplotního pole

\dot{m}_{in} [kg/s]	t_{in} [°C]	P_{out} [bar]	Model turbulence	Intenzita turbulence
0,12	-30	1,012	SST k- ω	5 %

4.3 Analýza teplotního pole

Z výsledků provedené stacionární CFD simulace teplotního pole vyplývá, že dodání doplňující domény spodního chladicího okruhu, mělo velmi příznivý vliv na výsledné rozložení teplotního pole v krystalech. Teplotní kontury v rámci výpočetní domény, sestavené pro účely numerické simulace teplotního pole je možno vidět na Obr. 18.



Obr. 18. Teplotní pole krystalů

Zatímco u výchozí studie se při vyhodnocování výsledků vyskytovala ovlivněná oblast, viz Obr. 14, která zapříčinila nesplnění požadavku na homogenní rozložení teploty přes všechny krystaly, u doplněné domény, se již tato oblast nevyskytuje. Tato změna představuje zásadní vylepšení výsledků teplotního pole. Z Obr. 18 je možno vidět, že rozdíl teploty mezi všemi krystaly je nyní 0,3 °C, a tak je možno konstatovat, že požadavek na maximální rozdíl teploty přes všechny krystaly, do hodnoty 1 °C je splnitelný. Z Obr. 18 je dále možno vidět, že chladivo horního okruhu se ohřívá výrazněji než chladivo u okruhu spodního. To je dáno tím, že všechny zdroje tepla v segmentu se nacházejí v jeho horní části. Z toho mimo jiné vyplývá, že u spodního okruhu může být menší hmotnostní průtok než u okruhu horního. Dále je možno konstatovat, že předběžný návrh spodního okruhu, je pro potřeby požadovaného chlazení krystalů vyhovující.

5 Návrh chladicího systému z hlediska proudového pole

Po provedení analýz rozložení teplotního pole a určení základních parametrů chladicího systému, bylo přistoupeno k analýze tlakových ztrát. Příprava výpočetní domény se liší v závislosti na hlediscích popsaných v kapitole 3.5. V případě proudového pole bylo vymodelováno rozváděcí potrubí, které bylo napojeno na horní a spodní okruh. Pro analýzu tlakových ztrát, byla uvažována kompletní doména chladicího systému, tj. chladicích okruhů na všech segmentech, včetně přívodního a odvodního rozváděcího potrubí. Detailně bude tvorba výpočetních domén popsána v následujících podkapitolách.

5.1 Úskalí návrhu proudového pole

Nejdříve se však zaměříme na omezení, která s sebou nese návrh geometrie pro numerickou simulaci tlakové ztráty celého chladicího systému. Vzhledem k zadané geometrii, kterou je možno vidět na Obr. 5, je nutno navrhnout rozváděcí potrubí tak, aby nezasahovalo do jednotlivých konstrukčních komponent kalorimetru. Dále, je nutno dodržet geometrické a prostorové restriktce týkající se trubek horního okruhu, popsané v kapitole 3.3. V případě horního okruhu, bylo navíc pro simulaci proudového pole, přistoupeno k úpravě geometrie trubiček. Topologie trubiček horního okruhu koresponduje s návrhem A, zmíněným v kapitole 4.1, a to s jeho protiproudou variantou uspořádání. Geometrie trubiček, je však zaměněna z původního čtvercového průřezu, na kruhový, a to v důsledku zmiňovaného předpokladu, že čtvercové trubičky by byly neúnosně náročné z ekonomického hlediska.

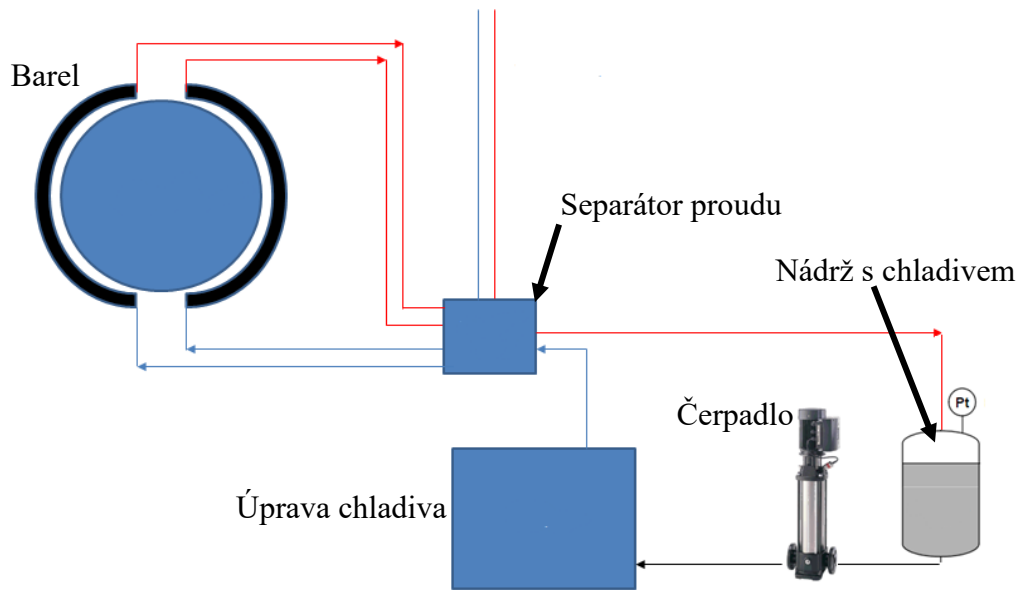
Nově vymodelované trubičky horního okruhu, však musejí splňovat požadavky na maximální vnější průměr 10 mm. Vzhledem k tomuto omezení, byly vymodelovány trubičky s požadovaným vnějším průměrem a s vnitřním průměrem 8 mm. Trubiček spodního okruhu se relativně žádné restriktce netýkají, a proto jsou topologicky a geometricky totožné s předběžným návrhem geometrie okruhů, a jsou tedy kruhové s vnitřním průměrem 4 mm. Rozváděcí potrubí bylo navrženo s vnitřním průměrem 30 mm a vnějším průměrem 32 mm. Vnitřní průměr, byl zvolen na základě předpokládaných možností prostorového umístění, bude však předmětem další optimalizace.

Jako další, je však nutno podotknout, že zadaný model barelu není kompletní, tzn. chybí části subsystémů a celková představa o polohách částí, vyskytujících se v bezprostřední blízkosti kalorimetru. Z tohoto důvodu, tak není možno navrhnout rozváděcí potrubí, s ohledem na všechny konstrukční součásti vyskytující se v subsystémech detektoru PANDA, viz Obr. 3. Návrh tedy vychází z předpokládaného uložení rozváděcího potrubí v okolí kalorimetru. Co naopak jisté je, je výšková úroveň čerpadla, které se bude nacházet přibližně 2-3 m pod osou kalorimetru.

5.2 Numerická simulace proudového pole

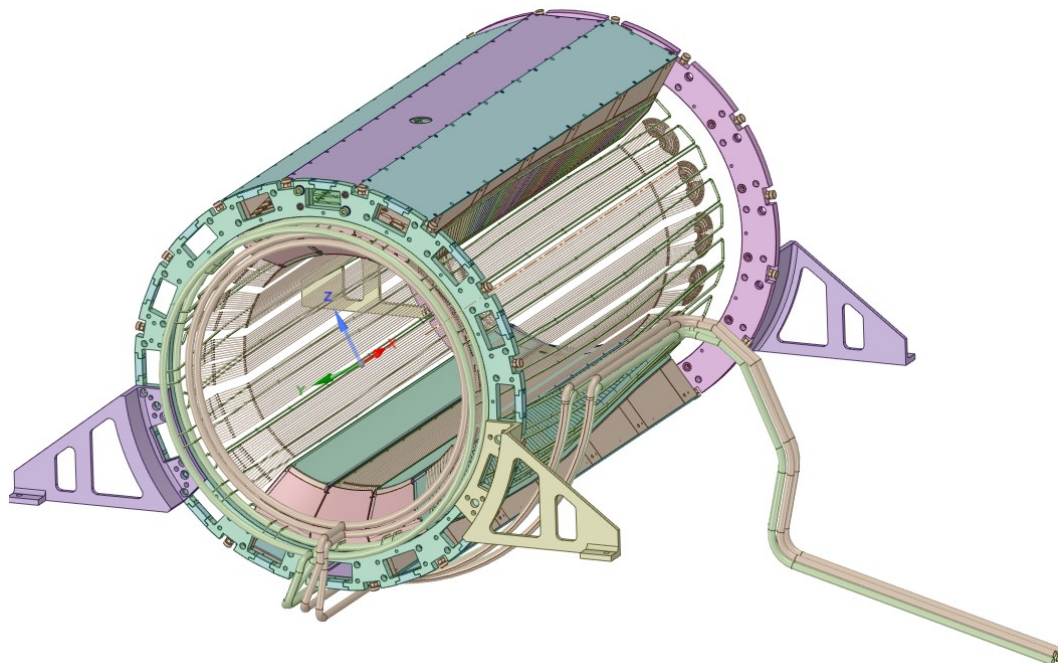
V této kapitole se bude práce zabývat detailním popisem tvorby výpočetní domény, pro účely numerické simulace proudového pole, tj. tlakových ztrát. Kompletní chladicí systém je schematicky znázorněn na Obr. 19. Z tohoto schématu je možno vidět, že celý systém je složen ze tří hlavních úseků, a to z úseku čerpadlo + nádrž, jenž se stará o kontinuální dodávku, požadovaný tlak, a zásobu chladiva. Dále z úseku úpravy + separátoru chladiva, který se stará o správnou teplotu a vhodnou distribuci chladiva do horního a spodního chladicího systému krystalů a v poslední řadě ze samotného barelu v němž se krystaly nachází. Dále je systém vybaven měřením parametrů proudu pro správnou optimalizaci dodávky chladiva [7]. Nicméně

úseky čerpadlo + nádrž a úprava + separace, nejsou objektem této práce, a proto se budeme dále zabývat jen návrhem rozváděcího potrubí v bezprostřední blízkosti kalorimetru.



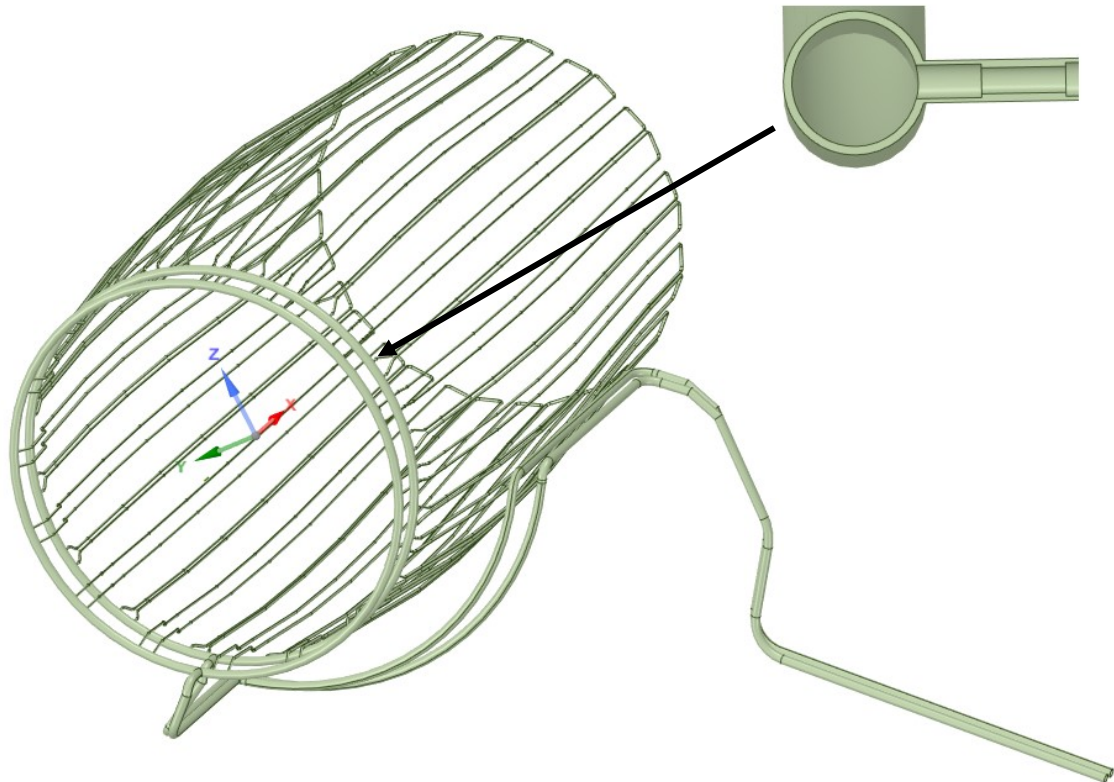
Obr. 19. Schéma instalace chladicího systému [7]

Na základě studie [7] a úvah o omezení popsanych v kapitole 5.1, bylo k hornímu a spodnímu okruhu vymodelováno rozváděcí potrubí. Implementaci navržené geometrie rozváděcího potrubí a jednotlivých okruhů do geometrie zadané, je možno vidět na Obr. 20.



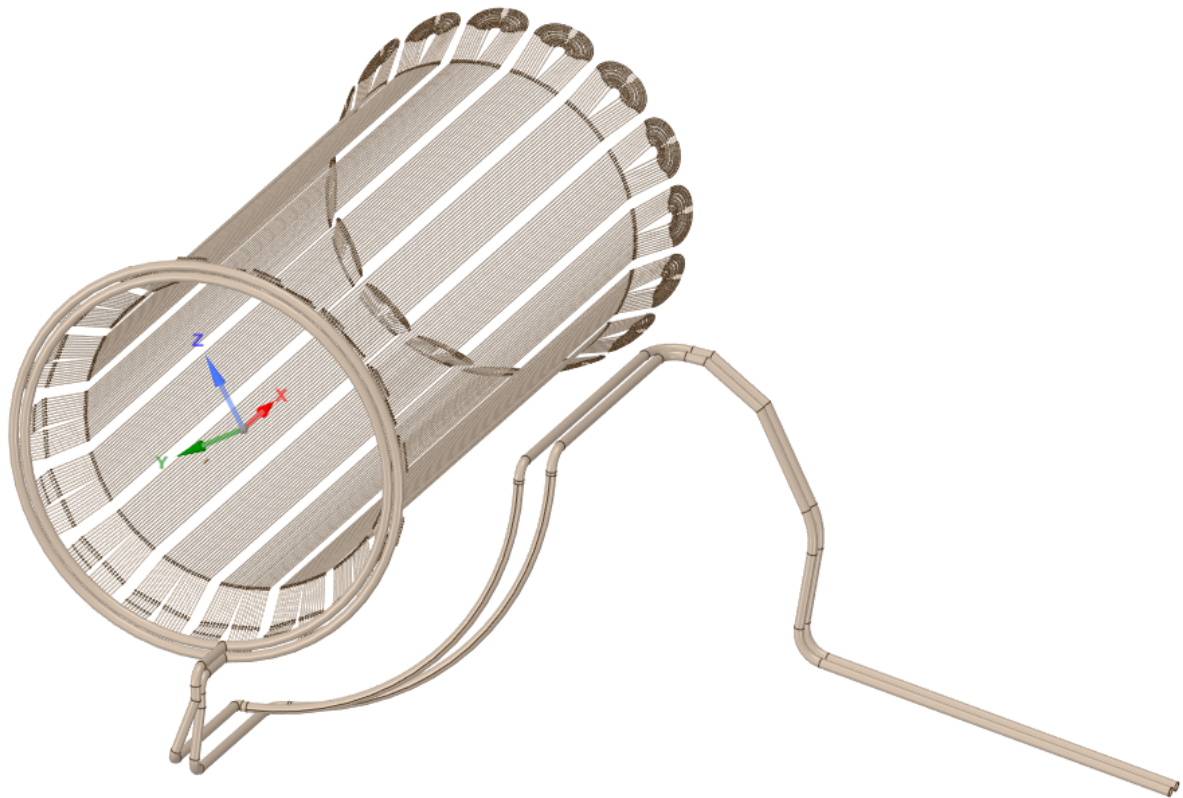
Obr. 20. Návrh chladicího systému

Pro účely CFD simulace byla tato sestava dále zjednodušena, tj. byly zanedbány všechny konstrukční součásti, jenž nemají žádný vliv na proudové pole připravované numerické simulace tlakové ztráty. Je nutno zmínit, že konstrukční součásti mohou být zanedbány, a to z toho důvodu, že u této simulace nebude simulován přestup tepla. Celkem tedy byly vytvořeny dva chladicí systémy, a to zmiňovaný horní a spodní chladicí systém, dále jen horní a spodní systém. Vytvořený model horního systému je možno vidět na Obr. 21, model spodního systému pak na Obr. 22.



Obr. 21. Horní systém

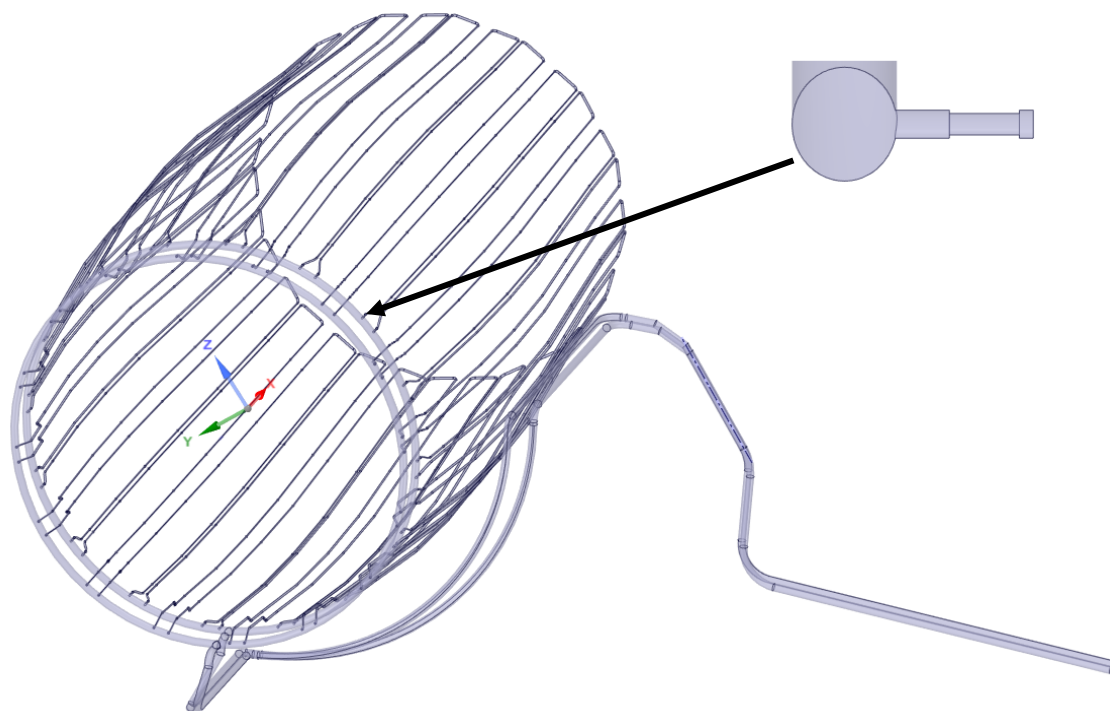
Pro účely případné regulace chladicího systému, bylo do geometrie, na vstupu chladicího média do jednotlivých horních okruhů, přidáno zúžení, které je možno vidět na Obr. 21 v detailu. Toto zúžení má za úkol simulovat škrtení průtoku do jednotlivých trubek horních okruhů tak, aby bylo v případě potřeby, možno dosáhnout rovnoměrného průtoku přes všechny okruhy. Tato úvaha souvisí s předpokladem, že barel je konstrukčně velice rozměrný, a tudíž se předpokládá, že v důsledku gravitačního působení, se bude chladivo lépe distribuovat ve spodních oblastech systému a bude tedy nutno tyto okruhy přiškrtit tak, aby došlo k rovnoměrné distribuci chladiva i v horní části chladicího systému. Takto předpřipravená geometrie, může pak dále sloužit jako podklad, pro studie zabývající se optimalizací chladicího systému z hlediska tlakových ztrát, tj. dimenzování čerpadla.



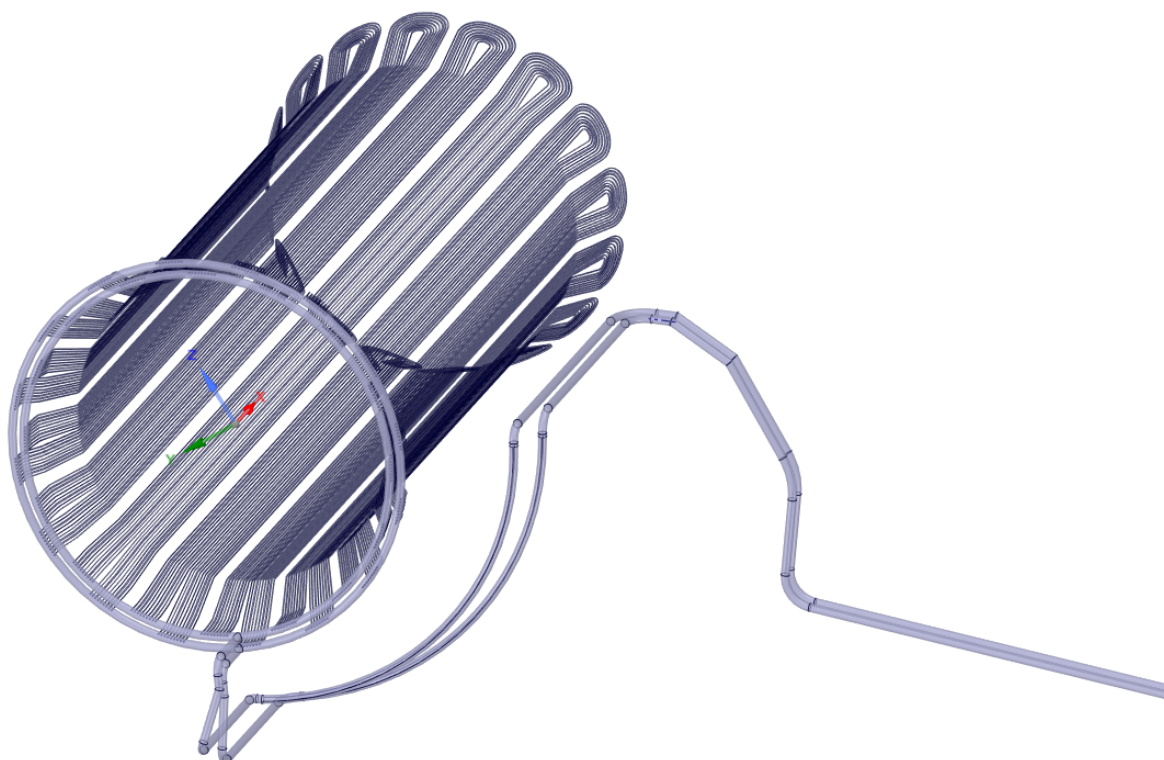
Obr. 22. Spodní systém

Vzhledem ke skutečnosti, že se při numerické simulaci proudového pole, nebude vyhodnocován přestup tepla, byla geometrie horního a spodního systému dále zjednodušena. Toto zjednodušení spočívá v tvorbě inverzního objemu, jenž zastává chladicí médium, tzn. zanedbání materiálu konstrukce trubiček. Takto připravenou výpočetní doménu horního systému, je možno vidět na Obr. 23, doménu spodního systému pak na Obr. 24.

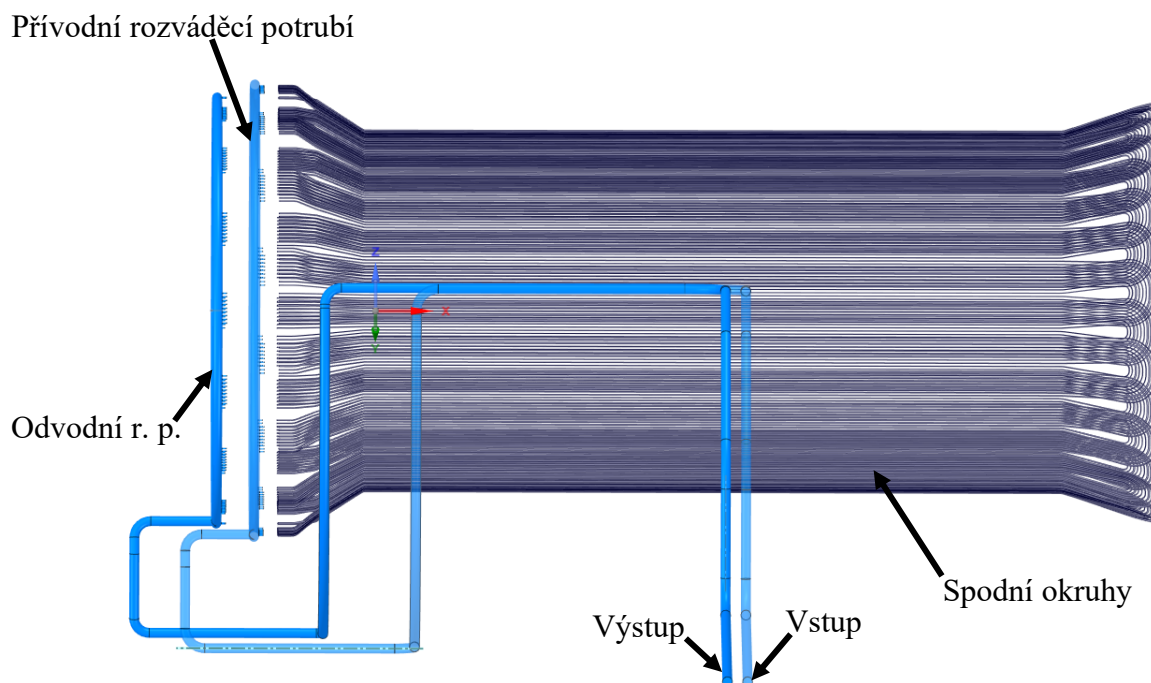
Dále bylo potřeba obě výpočetní domény pro účely diskretizace výpočetní sítě rozdělit, na rozváděcí potrubí a samotné okruhy. Jelikož oba systémy sestávají ze značného množství trubek s rozdílnými rozměry, je žádoucí optimalizovat výpočetní síť pro každou z částí chladicího systému zvlášť, aby bylo docíleno nižší výpočetní náročnosti výsledné simulace. Rozdělení výpočetní domény je reprezentováno jen na spodním systému, viz Obr. 25, neboť pro horní systém je rozdělení analogické.



Obr. 23. Výpočetní doména horního systému



Obr. 24. Výpočetní doména spodního systému



Obr. 25. Rozdělení výpočetní domény

5.2.1 Nastavení numerické simulace proudového pole

Po nastavení výpočetní sítě, jež bude detailně popsáno v kapitole 5.3, bylo dále přistoupeno k nastavení numerické simulace proudového pole. Při nastavování numerické simulace byly do výpočtu zaneseny, z hlediska chladiva, totožné vstupy jako v případě simulace pole teplotního, avšak s tím rozdílem, že hmotnostní průtok chladiva byl nastaven na hodnotu 3,84 m/s. Takto nastavený hmotnostní průtok na vstupu do chladicího systému, odpovídá průtoku 0,12 kg/s v jedné trubičce horního okruhu. Dalším rozdílem v nastavení okrajových podmínek je teplota chladiva, jež byla nastavena na hodnotu -25 °C. Dále je nutno zmínit, že materiálové vlastnosti chladiva odpovídají hodnotám uvedeným v Tab. 2. Shrnutí okrajových podmínek použitých pro numerickou simulaci proudového pole je možno vidět v Tab. 4.

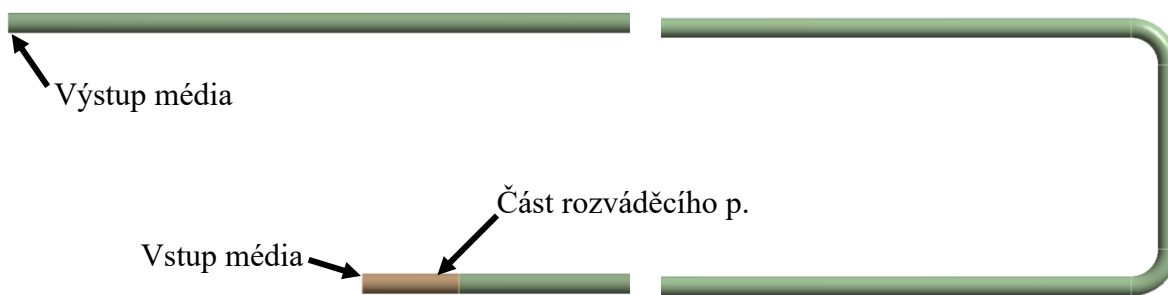
Tab. 4. Nastavení CFD pro numerickou simulaci proudového pole

\dot{m}_{in} [kg/s]	t_{in} [°C]	P_{out} [bar]	Model turbulence	Intenzita turbulence
3,84	-25	1,012	SST k- ω	5 %

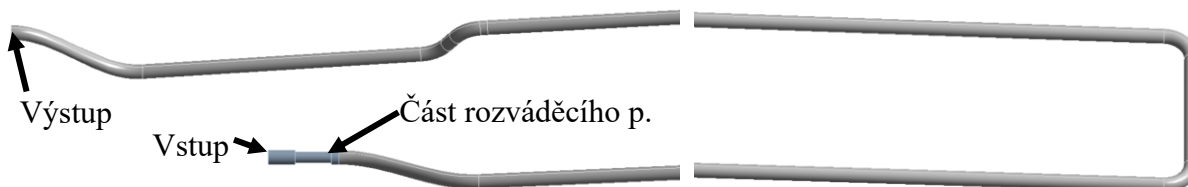
5.3 Výpočetní síť a její verifikace

Po rozdělení výpočetní domény, viz Obr. 25, bylo následně přistoupeno k diskretizaci samotné výpočetní sítě. Pro tyto účely bylo vybráno prostředí Workbench Meshingu. Při diskretizaci byl kladen největší důraz na hospodárnost, strukturovanost a konformnost výpočetní sítě. Nastavení sítě a její verifikace bude detailněji popsána v následujících odstavcích.

Pro posouzení nezávislosti CFD simulace, na zvolené výpočetní síti, je potřeba vytvořenou síť nejdříve verifikovat. Pro tyto účely byla připravena doména sestávající z jedné zjednodušené trubičky horního okruhu a ze zjednodušené části rozváděcího potrubí. Zjednodušení domény jsou výhodná, z hlediska snížení výpočetní náročnosti, snížení doby přípravy simulace a tím i možnosti testovat různé výpočetní sítě a jejich vliv na získané výsledky. Verifikační doménu sestávající z výše zmíněných komponent je možno vidět na Obr. 26, nezjednodušenou geometrii trubičky pak na Obr. 27. Jelikož je trubička velmi dlouhá (5,7 m), je na obrázcích zobrazena v řezu.



Obr. 26. Verifikační doména

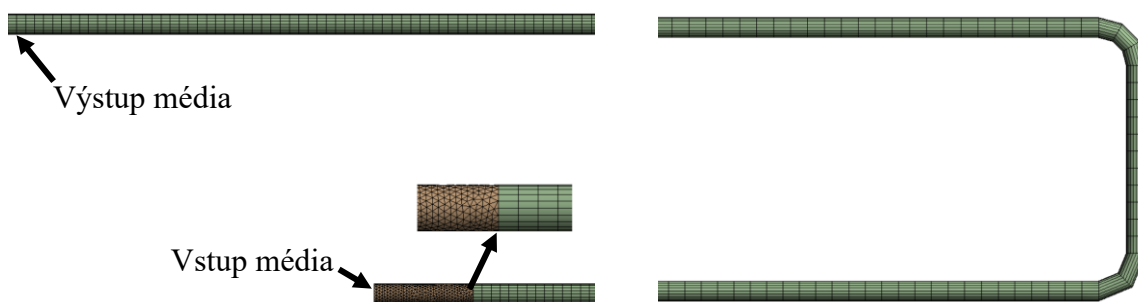


Obr. 27. Upravený předběžný návrh trubičky horního okruhu

Jak je vidět z Obr. 26, zjednodušení spočívá v tom, že trubička verifikační domény neobsahuje většinu armatur (kolena, clony apod.), vyskytujících se u upraveného předběžného návrhu trubičky horního okruhu. Dále je nutno zmínit, že pro účely zjednodušení je uvažován vstup i výstup chladicího média na jedné výškové úrovni tak, aby se neprojevil vliv gravitačního zrychlení na proudění v trubičce. Geometrickými a topologickými rozměry však verifikační doména odpovídá upravenému předběžnému návrhu.

Na verifikační doménu připravenou podle výše zmíněných specifikací bylo aplikováno následné nastavení výpočetní sítě. Na část domény reprezentující rozváděcí potrubí, bylo použito prvků tetrahedrálních o velikosti 3 mm, s tloušťkou první mezní vrstvy 0,1 mm. Tetrahedrální prvky se vyznačují svou vhodností pro složité topologické tvary, proto jsou s výhodou použity na část rozváděcího potrubí, kde se u předběžného návrhu vyskytuje zúžení.

Tetrahedrální prvky však nejsou vhodné z hlediska stability výpočtu a velikosti výpočetní sítě, a proto byly pro část domény zastávající trubičku použity prvky hexahedrální s velikostí 5 mm a s totožnou výškou první vrstvy mezní vrstvy. Hexahedrální prvky se vyznačují vysokou stabilitou a hospodárností výpočtu, avšak jsou nevhodné pro pokrytí tvarově složitě topologie, proto jsou s výhodou použity na rozměrově velmi náročnou trubičku, která však nedisponuje výraznou tvarovou složitostí. Konformní výpočetní síť nastavenou podle výše zmíněných specifikací je možno vidět na Obr. 28.



Obr. 28. Matematický model verifikační domény (var. a.)

Za použití zmíněného nastavení výpočetní sítě, byla provedena numerická simulace tlakové ztráty na verifikační doméně. Okrajové podmínky zadané do této numerické simulace jsou totožné jako v případě numerické simulace teplotního pole, viz Tab. 3, avšak s tím rozdílem, že teplota chladiva na vstupu je nastavena na hodnotu $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po provedení numerické simulace byla vyčíslena výsledná hodnota tlakové ztráty v doméně, jenž se rovná $\Delta p = 1,271\text{ bar}$.

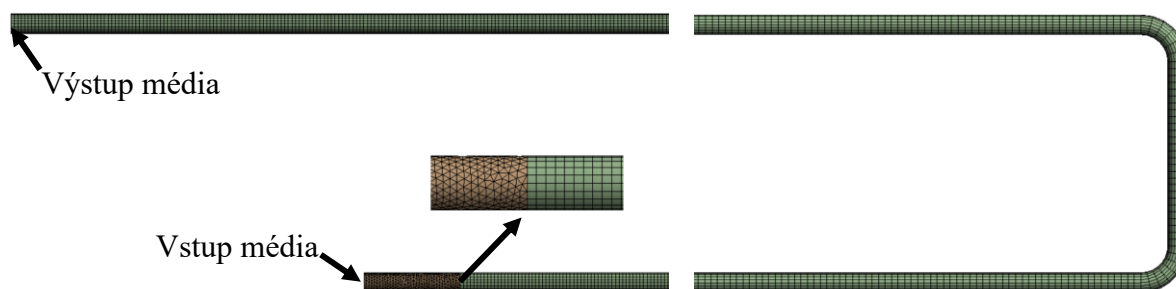
Pro ověření nezávislosti sítě na její velikosti, tj. počtu prvků, byly připraveny další dvě simulace, a to s 3x a 7x větší hustotou sítě, jinými slovy s větším množstvím prvků v síti. Porovnání hodnot těchto simulací je možno vidět v Tab. 5. Kde a. je simulace prvotní, b. je simulace s 3x zvýšenou hustotou sítě a c. je simulace se 7x zvýšenou hustotou.

Tab. 5. Porovnání velikosti výpočetních sítí

Var.	Mezní vrstva [mm]	Počet prvků	Δp [bar]	y+ [-]
a.	0,1	69932	1,271	4,9
b.	0,1	194463	1,136	4,8
c.	0,1	470057	1,112	4,8

Jako první se zaměříme na difference hodnot Δp u provedených simulací. Jak je vidět z Tab. 5, rozdíl hodnoty tlakové ztráty mezi variantou a. a b. je 10 %, rozdíl mezi variantou b. a c. je pak již jen 2 %. Vzhledem k tomu, že při vytváření výpočetní sítě, je jedním z hlavních požadavků na síť co nejvyšší hospodárnost a s tím spojená malá výpočetní náročnost, a dále, vzhledem k tomu, že přijatelná hodnota difference mezi jednotlivými zhušťujícími se variantami výpočetní sítě je $<5\%$. Lze pro potřeby numerické simulace, jak proudového, tak teplotního

pole, vybrat variantu b. za optimální nastavení výpočetní sítě na doméně zastávající chladivo. Vybranou variantu sítě b., je možno vidět na Obr. 29.

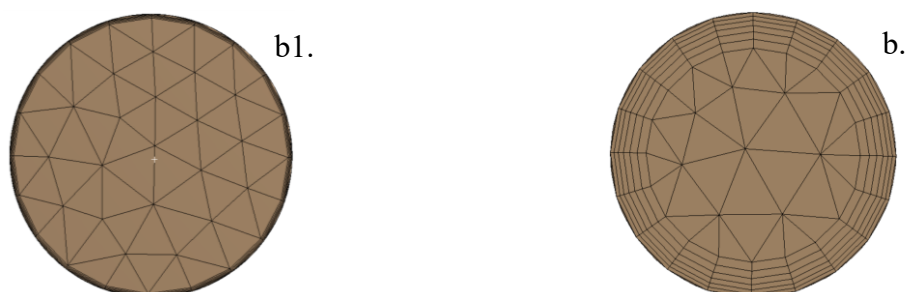


Obr. 29. Matematický model verifikační domény (var. b.)

Ve zmiňované Tab. 5, se kromě výsledných tlakových ztrát a počtů prvků v síti objevuje i stěnová funkce y^+ , jenž vyjadřuje závislost rychlosti proudu na vzdálenosti od stěny, ve formě bezrozměrné vzdálenosti. Zatímco pro simulace řešící přestup tepla by bylo vhodné držet hodnotu $y^+ \sim 1$, pro numerické simulace bez přestupu tepla je přijatelná hodnota $y^+ \leq 11$ [8]. Vzhledem k tomu, že cílem této práce je optimalizovat chladicí systém, jak z pohledu tlakových ztrát, tak z pohledu přestupu tepla, musí být učiněn kompromis v této hodnotě.

Je nutné zmínit, že hodnota y^+ , ovlivněná převážně nastavením velikosti první tloušťky mezní vrstvy v síti, byla předmětem rozsáhlé studie prováděné v souvislosti s touto prací. Výsledná hodnota tloušťky první mezní vrstvy 0,1 mm, byla zjištěna iterativně. Na Obr. 30 je možno vidět porovnání dvou variant výpočetní sítě, přičemž vlevo na obrázku je možno vidět výpočetní síť s tloušťkou první mezní vrstvy 0,02 mm, vpravo pak síť s tloušťkou 0,1 mm. Hodnoty y^+ pojící se s těmito nastaveními jsou pak vidět v Tab. 6.

Během studie prováděné za účelem optimalizace hodnoty y^+ , bylo zjištěno, že při hodnotě $y^+ = 1,4$, je výsledná hodnota tlakové ztráty v trubičce skoro dvojnásobná, oproti variantě výpočetní sítě s $y^+ = 4,8$, což je vzhledem k předběžně provedenému vyhodnocení tlakové ztráty hodnota naprosto neodpovídající. Porovnání výsledných tlakových ztrát, mezi jednotlivými variantami nastavení první tloušťky mezní vrstvy u vybrané varianty b. ukazuje, viz Tab. 6, nutnost optimalizace této hodnoty. Provedenou studií tak byla odhalena vysoká náchylnost programu CFX na nastavení této hodnoty.



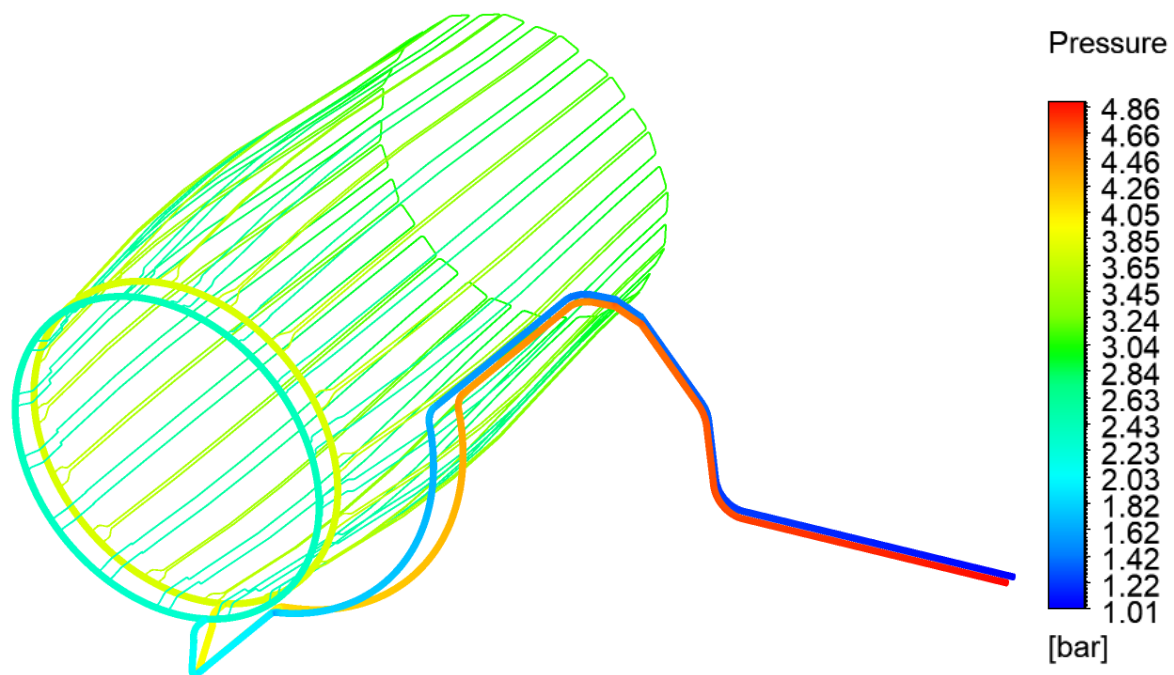
Obr. 30. Varianty mezní vrstvy verifikační výpočetní domény

Tab. 6. Porovnání velikostí mezní vrstvy vybrané varianty b.

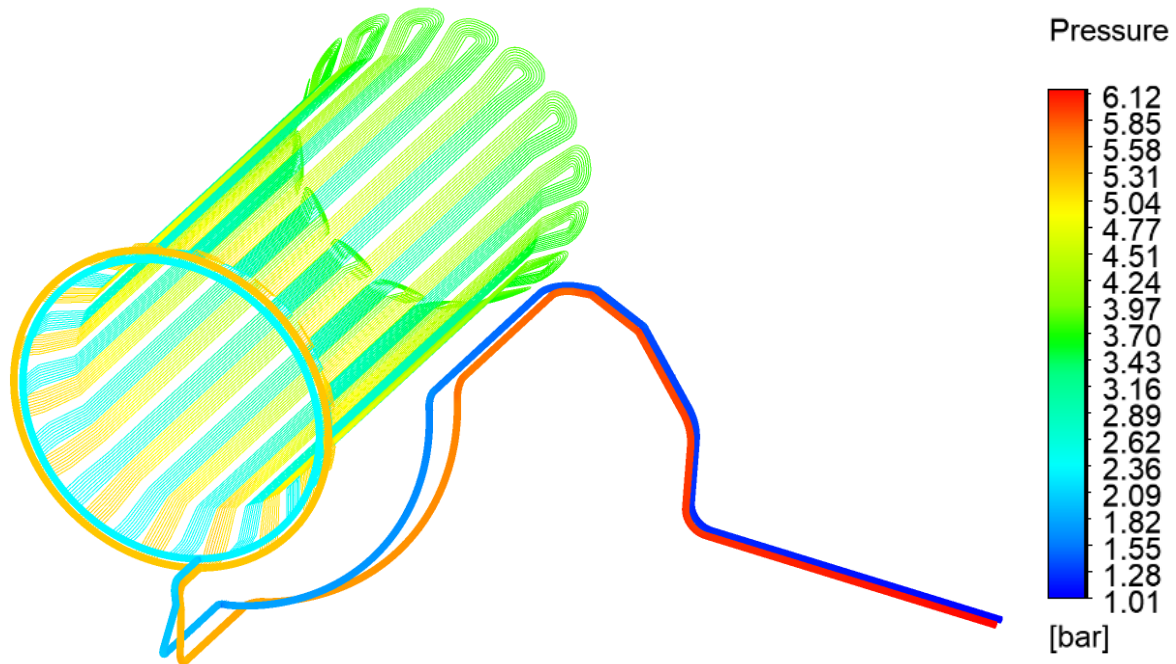
Var.	Mezní vrstva [mm]	Počet prvků	Δp [bar]	y+ [-]
b1.	0,02	213838	2,098	1,4
b.	0,1	194463	1,136	4,8

5.4 Analýza proudového pole

Z výsledků provedených stacionárních CFD simulací proudového pole vyplývá, že nebylo naplněno požadavků zákazníka na celkovou tlakovou ztrátu chladicího systému. Jak je možno vidět z Obr. 31, celková tlaková ztráta horního systému je 3,9 bar. U spodního systému, jak je možno vidět z Obr. 32, činí celková tlaková ztráta 5,1 bar. Po sečtení ztrát obou chladicích systému tedy dostáváme tlakovou ztrátu celého chladicího systému, rovnu $\Delta p = 9$ bar.



Obr. 31. Tlakové pole horního chladicího systému



Obr. 32. Tlakové pole spodního chladicího systému

V souvislosti s uvedenými výsledky je dále možno konstatovat, že zákazníkem požadovaná tlaková ztráta celého chladicího systému, zmiňovaná v kapitole 3.1, je jen počátečním koncepčním návrhem. Tato úvaha souvisí i se zjištěním, že ani tlaková ztráta samotné jedné trubičky horního chladicího okruhu, viz kapitola 5.3, není schopna naplnit požadavky kladené na hodnotu celkové tlakové ztráty $\Delta p \leq 1$ bar.

Tlaková ztráta, je totiž nejvíce ovlivněna střední rychlostí v trubičkách. Tuto rychlost však není možno u jedné trubičky snížit pod hodnotu 2,5 m/s, spojenou s hmotnostním průtokem 0,12 kg/s. Jelikož snižování této rychlosti by vedlo k výskytu laminárního proudění v trubičkách horních okruhů, což je z hlediska požadovaného přestupu tepla nepřijatelné. Toto omezení bude detailněji diskutováno v kapitole 6.

Z výstupů analýz proudového pole tedy vyplývá, že je nutno přistoupit ke kompromisu mezi požadovaným tepelným výkonem chladicího systému a požadovanou tlakovou ztrátou. To v konečném důsledku znamená, že bude potřeba podstatně výkonnějšího čerpadla, než se u počátečního koncepčního návrhu předpokládalo.

6 1D bilanční výpočet proudového pole

Součástí této práce je také tvorba nástroje, jenž má s dostatečnou přesností pokrýt variantní návrh chladicího systému z hlediska tlakových ztrát. Za tímto účelem, bylo přistoupeno k tvorbě 1D bilančního výpočtu, jenž je založen na známých analytických vzorcích místních a třecích tlakových ztrát. Velkou výhodou popisovaného výpočtu je významné snížení výpočetního času, jenž je u numerické simulace takto rozsáhlé úlohy značný.

Bilanční výpočet však zahrnuje určitá zjednodušení, která je nutno při používání tohoto nástroje brát v úvahu. Předně je to zanedbání výškové hladiny, ve které se potrubí nachází, poté jde o zanedbání výškového rozdílu mezi vstupem a výstupem média. Dále není u 1D výpočtu brána v úvahu možnost vzniku různého charakteru proudění v trubičce, tj. že v celé délce potrubí je uvažován jen jeden typ proudění. Vzhledem k uvedeným zjednodušením bude 1D výpočet nejdříve uveden pro verifikační výpočetní doménu, jenž sdílí některá zjednodušení platná i pro tento výpočet. Pro přehlednost je souhrn vstupních hodnot do 1D výpočtu uveden v Tab. 7.

Tab. 7. Primární hodnoty veličin pro 1D výpočet

\dot{m} [kg/s]	ρ [kg]	μ [Pa·s]	d [m]	l [m]
0,1	930	$7,7e^{-3}$	0,008	5,7

Jako první bude představen postup pro získání hodnot potřebných pro výpočty. Pro výpočet třecích ztrát bylo použito vztahu (6-1).

$$\Delta p_t = \frac{\beta}{d} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \cdot l \quad (6-1)$$

Kde β je ztrátový součinitel, d je vnitřní průměr trubičky, w je střední rychlost v trubičce, ρ je hustota chladicího média a l je délka trubičky. Vnitřní průměr, délka trubice a hustota jsou známy (Tab. 7), ostatní veličiny však bylo nutno dopočítat. Pro výpočet střední rychlosti, bylo použito vztahu (6-2), ve kterém opět vystupuje neznámá, a to \dot{m} . Hmotnostní průtok \dot{m} v jedné trubičce, byl předběžně stanoven na základě zmiňované studie [4], ve které byla při návrhu použita hodnota $\dot{m} = 0,1$ kg/s. Tato hodnota však bude předmětem další optimalizace.

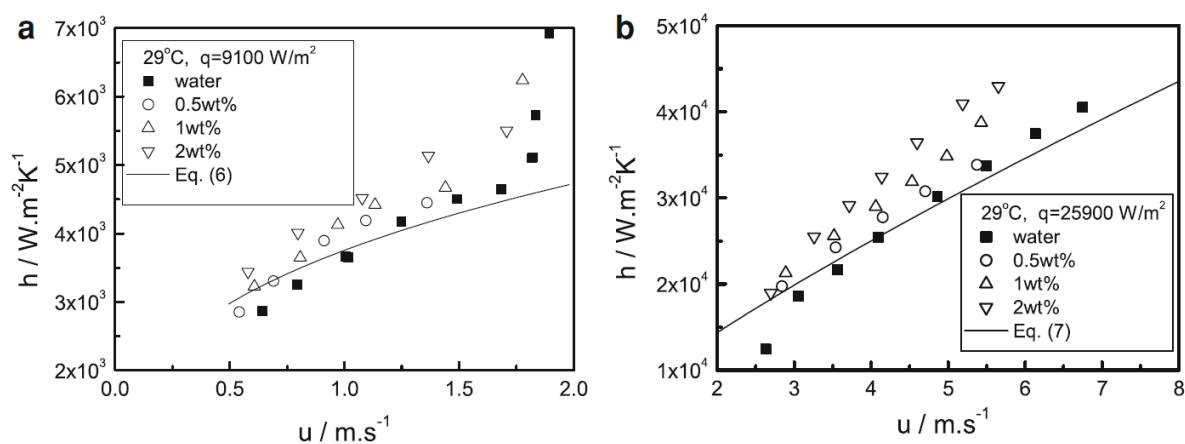
$$w = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,1}{930 \cdot \pi \cdot 0,008^2} = 2,14 \text{ m/s} \quad (6-2)$$

Pro stanovení třecího součinitele β je nejprve nutné určit typ proudění v trubičce. K tomu bylo využito bezrozměrného Reynoldsova čísla, jenž stanovuje orientační hranici pro výskyt turbulentního proudění v trubici na hodnotu $Re \geq 2300$. Pomocí vztahu pro výpočet Reynoldsova čísla, viz (6-3), kde μ je zadaná dynamická viskozita (Tab. 7), je možno vidět, že

v trubičce se pravděpodobně nachází proudění intermitentní až laminární. Tento typ proudění, je však nevhodný pro zajištění požadovaného přestupu tepla, tj. odvodu tepla z krystalů do chladicího média.

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\mu} = \frac{930 \cdot 2,14 \cdot 0,008}{0,0077} = 2068 \quad (6-3)$$

Tuto skutečnost, lze ukázat pomocí Obr. 33 [9], na kterém je vlevo, viz graf a, vynesena závislost součinitele přestupu tepla (h), na rychlosti proudění (u) a to mimo jiné i pro vodu. Rozmezí hodnot rychlostí je stanoveno pro laminární charakter proudění v trubičce. V kontrastu s tím je, vpravo na Obr. 33, graf b, u něhož je rozmezí hodnot rychlostí stanoveno pro turbulentní charakter proudění. Z vynesených hodnot je patrné, že přestup tepla u laminárního proudění je řádově 10x menší než u proudění turbulentního. Nutno dodat, že graf je vynesena pro vodu a další tekutiny jimiž se studie [9] zabývá, při 29 °C a průměru trubičky 1,02 mm. Stejný fenomén lze však předpokládat i pro chladivo použité v této studii.



Obr. 33. Porovnání přestupu tepla u laminárního a turbulentního proudění [9]

Jelikož hlavním úkolem chladicího systému je odvádět teplo, je žádoucí, aby součinitel přestupu tepla do chladiva byl co nejvyšší, tedy aby uvnitř trubiček bylo proudění turbulentní. Aktuální hodnota Reynoldsova čísla ze simulací teplotního pole je na hranici oblasti mezi laminárním a turbulentním prouděním. Lze sice předpokládat, že v trubičce bude proudění turbulentní, a to vzhledem k vyskytujícímu se zúžení průřezu (clona) na vstupu, které bude generovat poruchy proudu, dále je možno předpokládat, že bude docházet k zavření vlivem změny tvaru trubiček apod. Nicméně pro účely přípravy 1D výpočetního nástroje bylo rozhodnuto o mírném navýšení průtoku tak, aby byla hodnota Reynoldsova čísla zcela jistě v oblasti turbulentního proudění, pro které je 1D výpočetní nástroj připraven.

Je však nutno zde uvést, že navýšení hmotnostního průtoku, tedy rychlosti proudění, je jen jednou z možností, jak dosáhnout turbulizace proudu. Zároveň je vhodné dodat, že u této úlohy je to volba rozporuplná, neboť navýšením hmotnostního průtoku a tím i rychlosti proudění, dojde k navýšení tlakové ztráty, a to především její třetí složky. Vhodnější metodou by mohlo být zařazení clon či jiných segmentů po délce potrubí, čímž by sice vzrostla místní

složka tlakových ztrát, nicméně její vliv je na celkové tlakové ztrátě výrazně menší. U 1D výpočtu, se ale tímto způsobem práce zabývat nebude, neboť optimalizace rozmístění takovýchto segmentů by si vyžádala vlastní a podrobnější analýzu.

S ohledem na výše uvedené, byl navýšen hmotnostní průtok jen mírně, a to tak aby byla překročena pomyslná hranice mezi laminárním a turbulentním typem proudění. Nová hodnota hmotnostního průtoku tak byla stanovena jako $\dot{m} = 0,12$ kg/s. Jak je možno vidět ze vztahu (6-4), v návaznosti na zvýšení hmotnostního průtoku došlo k navýšení střední rychlosti proudu na hodnotu $w = 2,57$ m/s, a tudíž i k navýšení Reynoldsova čísla, viz vztah (6-5).

$$w = \frac{4 \cdot 0,12}{930 \cdot \pi \cdot 0,008^2} = 2,57 \text{ m/s} \quad (6-4)$$

Při takovéto hodnotě Reynoldsova čísla, se již dá předpokládat vznik požadovaného turbulentního proudění v jednotlivých trubičkách horních chladících okruhů.

$$Re = \frac{930 \cdot 2,57 \cdot 0,008}{0,0077} = 2483 \quad (6-5)$$

Po stanovení nového hmotnostního průtoku \dot{m} , bylo dále přistoupeno k výpočtu třecího součinitele β . Jelikož je v trubičkách předpokládáno turbulentní proudění, bylo využito vztahu (6-6) [10], jenž je platný pro oblast turbulentního proudění. Dále je nutno poukázat na to, že použitý vztah přichází v platnost u hydraulicky hladkého potrubí. Jelikož se však nepředpokládá značná drsnost materiálu potrubí, je tato úvaha korektní.

$$\beta = \frac{1}{(1,8 \cdot \log Re - 1,64)^2} = \frac{1}{(1,8 \cdot \log 2483 - 1,64)^2} = 0,05 \quad (6-6)$$

Aby byl bilanční výpočet kompletní, je nutno do něj zahrnout také místní tlakové ztráty v armaturách (kolena, clony apod.) trubičky. Ty lze vyjádřit pomocí vztahu (6-7) [11]. Kde ξ , je součinitel místních ztrát a n je počet 90° kolen v trubičce.

$$\Delta p_m = \xi \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \cdot n \quad (6-7)$$

Za účelem stanovení ξ , bylo zapotřebí pro trubičku určit bezrozměrný poměr r/d , kde r je poloměr křivosti kolene a d je známý vnitřní průměr potrubí. V případě všech trubiček horního i spodního okruhu, je hodnota $r/d = 1,5$. Pro takovouto hodnotu r/d , platí pro 90° koleno výpočet hodnoty součinitele místních ztrát pomocí vztahu (6-8) [11].

$$\xi = \frac{r}{d} \cdot \left[9,69 \cdot \frac{r}{d} - 4,24 \right]^{-1} = 1,5 \cdot [9,69 \cdot 1,5 - 4,24]^{-1} = 0,146 \quad (6-8)$$

U verifikační domény je možno nalézt dvě 90° kolena, tedy je možno stanovit $n = 2$. Pro určení celkové tlakové ztráty v jedné trubičce, pak bylo využito vztahu (6-9), po dosazení (6-10).

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_m \quad (6-9)$$

$$\Delta p = \frac{0,05}{0,008} \cdot 930 \cdot \frac{2,57^2}{2} \cdot 5,7 + 0,145 \cdot 930 \cdot \frac{2,57^2}{2} \cdot 2 = 1,103 \text{ bar} \quad (6-10)$$

Po provedení bilančního výpočtu a numerické simulace, korespondující s nastavením výpočetní sítě b. popsaným v kapitole 5.3, byly porovnány výsledné hodnoty tlakové ztráty v trubičce. Toto porovnání, viz Tab. 8, ukazuje, že rozdíl v hodnotě tlakové ztráty mezi jednotlivými výpočty, je <3 %, což je hodnota, kterou je vzhledem k podstatně jednoduššímu 1D výpočtu možno akceptovat.

Tab. 8. Porovnání hodnot tlakové ztráty v trubičce

Veličina	1D výpočet	Num. simulace	Rozdíl [%]
Δp [bar]	1,103	1,136	2,7

Pro úplnost, byly dále porovnány hodnoty výsledných tlakových ztrát obou chladicích systémů získaných numerickými simulacemi, s hodnotami získanými 1D výpočtem. Porovnání výsledků tlakových ztrát mezi CFD simulacemi a 1D výpočtem, je možno vidět v Tab. 9.

Tab. 9. Porovnání výsledné tlakové ztráty systému

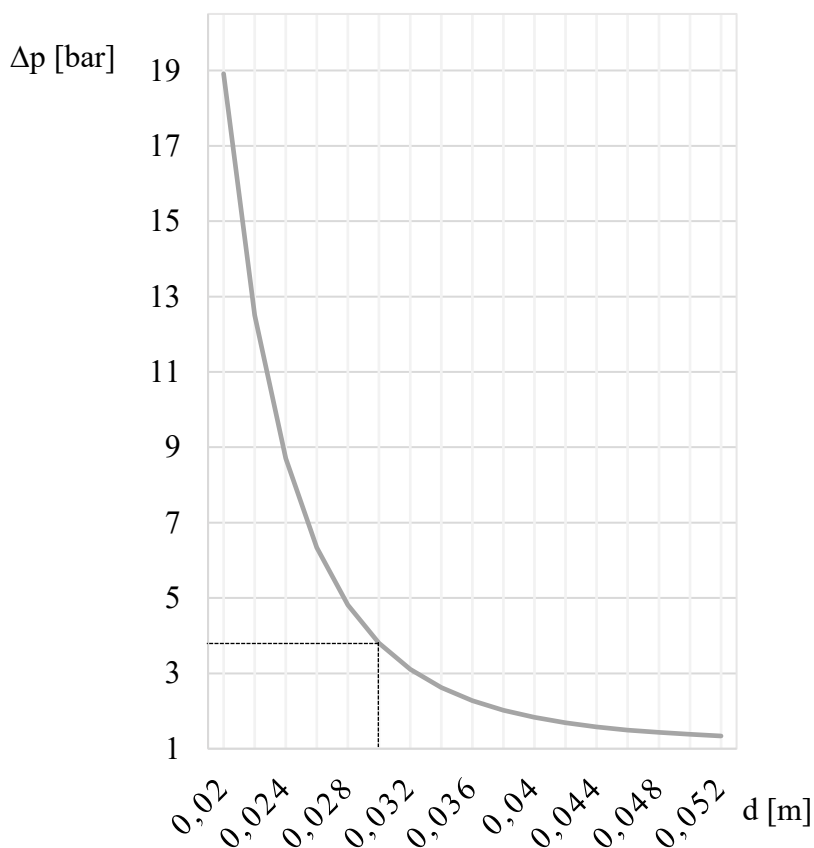
Veličina	Chladicí systém	1D výpočet	Num. simulace	Rozdíl [%]
Δp [bar]	Horní	3,80	3,88	2
	Spodní	4,95	5,14	4
	Celek	8,75	9,02	3

Z Tab. 9 vyplývá, že difference mezi numerickými simulacemi a 1D výpočty se pohybuje pod 5 %. Tato hodnota, je při přihlédnutí na nejistoty výpočtu přijatelná, a dokládá, že 1D výpočet byl sestaven korektně, nejen pro jednu trubičku, ale i pro celý chladicí systém.

6.1 Analýza variace chladicího systému

Jako další, bylo v této práci přistoupeno k analýze variantních řešení chladicího systému, jelikož je snaha dosáhnout požadované (co nejnižší) tlakové ztráty celého systému. Vzhledem k detailně popsaným omezením na horní a spodní chladicí okruh, a dále s ohledem na úvahy, pojící se s návrhem chladicích systémů, připadá v úvahu snížení tlakové ztráty realizovat, buď to snížením délky, anebo zvýšením průměru rozváděcího potrubí. Tato úvaha se vztahuje k předpokladu, že dominantní ztrátou v systému je ztráta třecí. Konkrétně, je možno uvést, že místní ztráty jsou u obou chladicích systémů přibližně 10x menší než ztráty třecí. Z tohoto důvodu, nebude dále uvažováno se změnou počtu, nebo úhlu kolen vyskytujících se v rozváděcím potrubí.

Za účelem vyhodnocení variantních řešení rozváděcího potrubí, byl nejprve pomocí 1D výpočtu vynesena graf závislosti průměru rozváděcího potrubí na tlakové ztrátě celého horního chladicího systému. Pro tvorbu grafu, bylo uvažováno s konstantní délkou potrubí, odpovídající délce použité pro numerickou simulaci, tedy 16,8 m. Graf, vyneseny podle výše zmíněných specifikací, je možno vidět na Obr. 34. Nutno dodat, že v grafu je pomocí spojnic os vynesena pracovní bod, ve kterém se nachází současný návrh horního chladicího systému.

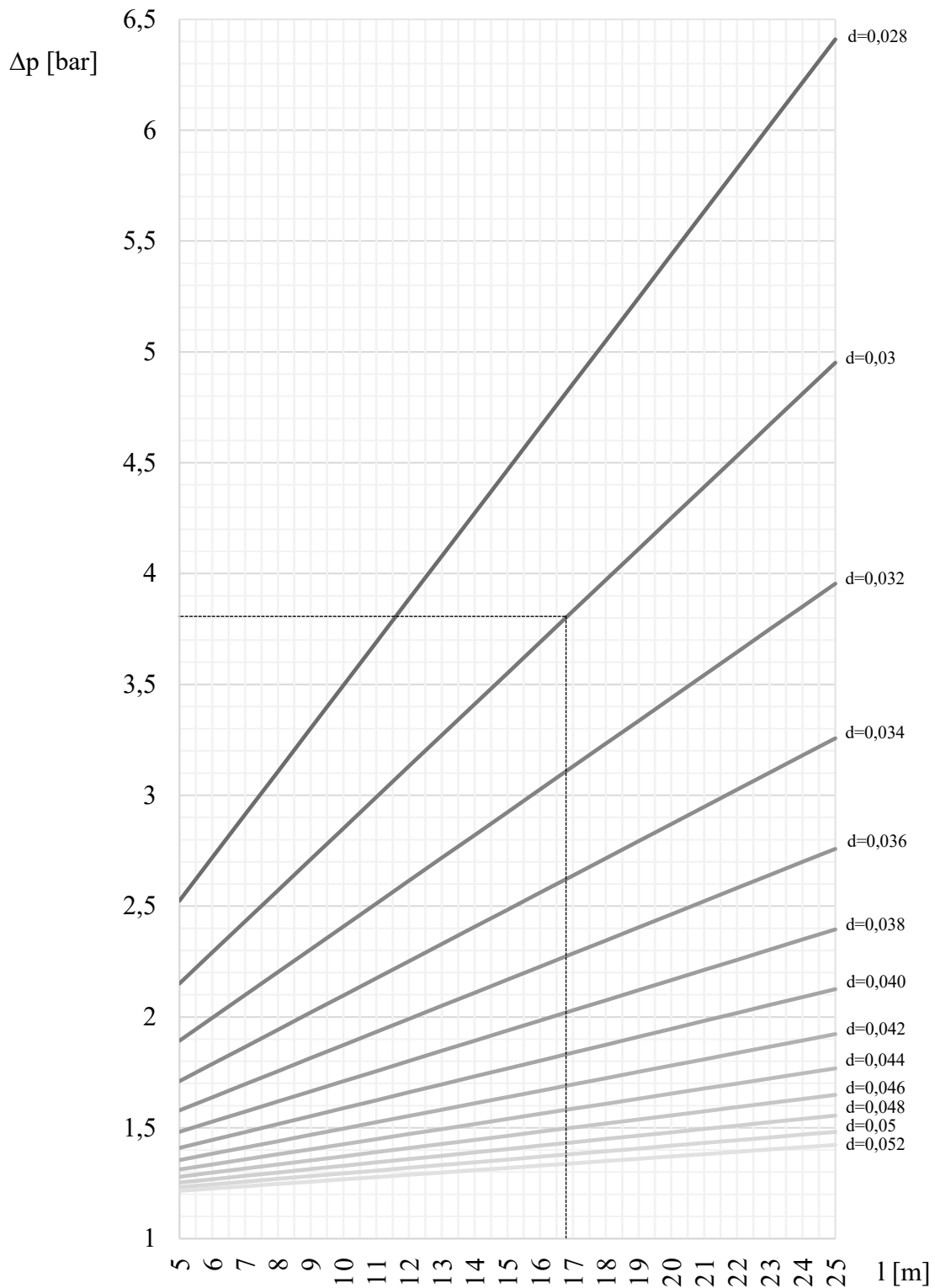


Obr. 34. Závislost Δp horního systému na průměru r.p.

Z grafu je patrné, že při konstrukčním návrhu chladicího systému, bude muset být kladen velký důraz na volbu průměru rozváděcího potrubí. Průměr, bude muset být volen v závislosti na dostupném prostoru v kalorimetru, ale i s ohledem na požadovanou tlakovou ztrátu. Z grafu

dále vyplývá, že při navyšování průměru rozváděcího potrubí nad hodnotu 0,04 m nedochází ke značné změně výsledné tlakové ztráty. Opačně je tomu v případě, že bychom chtěli průměr rozváděcího potrubí zmenšit, je patrné, že při snižování průměru rozváděcího potrubí pod hodnotu 0,028 m dochází k dramatickému nárůstu tlakové ztráty v celém horním chladícím systému.

Jak bylo uvedeno na začátku této kapitoly, tlaková ztráta bude souviset také s délkou potrubí. Graf závislosti tlakové ztráty, jak na průměru, tak na délce rozváděcího potrubí horního systému je možno vidět na Obr. 35. Je nutno dodat, že vzhledem ke zjištění, že průměry rozváděcího potrubí $\leq 0,028$ m se vykazují velmi vysokou hodnotou tlakové ztráty, byly do následujícího grafu zaneseny pouze průměry větší, než je tento. Dále, je nutno dodat, že nejnižší volená délka rozváděcího potrubí vyskytující se v grafu je 5 m, a to z toho důvodu, že samotné prstence rozváděcího potrubí mají délku 4,7 m. Vynesením grafu mezi hodnotami délek 5–25 m, tedy odpovídá značnému množství konstrukčních variant rozváděcího potrubí. Podobně, jako v předchozím případě je do grafu vynesena pracovní bod současného návrhu.



Obr. 35. Závislost Δp horního systému na délce a průměru r.p.

Takto připravený graf, je tedy možno dále využít pro předběžný návrh, či optimalizaci horního chladicího systému kalorimetru.

7 Závěr

Na závěr je možno konstatovat, že hlavním úkolem této práce bylo navrhnout takový chladicí systém, který by během činnosti kalorimetru dokázal uchládit krystaly na teplotu mezi -30 až -20 °C, a to tak, že rozdíl mezi maximální a minimální teplotou všech krystalů nepřesáhne hodnotu 1 °C. Z tohoto pohledu byla tato práce úspěšná, jelikož se pomocí dodání spodního chladicího systému do výchozí výpočetní domény podařilo tuto podmínku naplnit, s tím, že maximální rozdíl teplot přes všechny krystaly nyní činí $0,3$ °C.

Z hlediska tlakových ztrát se, prozatím, nepodařilo naplnit požadavky zákazníka, avšak požadavek na to, aby celková tlaková ztráta v chladicím systému nepřesáhla hodnotu 1 bar, se zdá být nenaplnitelný, jelikož i tlaková ztráta samotné jedné trubičky vyskytující se v systému je přibližně $1,13$ bar. S ohledem na tuto skutečnost, je nutno přehodnotit prvotní požadavky, a upravit je tak, aby zohledňovali priority v návrhu systému, čímž je teplotní stabilita.

Jako poslední je nutno zmínit, že součástí této práce byla také tvorba 1D výpočetního nástroje, jenž je, jak se ukázalo poměrně přesně schopen pokrýt návrh chladicího systému z hlediska tlakových ztrát. I když tento nástroj obsahuje určitá zjednodušení, může být použit pro doplňující studie zabývající se další optimalizací chladicího systému.

8 Zdroje

1. **MESSCHENDORP, Johan.** JPS Conference Proceedings. *The PANDA Experiment at FAIR-Subatomic Physics with Antiprotons*. [Online] 2016. [Citace: 25. 3. 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.7566/JPSCP.13.010016>.
2. **BELIAS, Tassos a PETERS, Klaus.** *PANDA Annual Report*. [Online] 2021. [Citace: 5. 1. 2021.] Dostupné z: https://panda.gsi.de/system/files/user_uploads/k.peters/RE-MGM-2020-002.pdf.
3. **STRIKMAN, Mark a LARINOV, Alexei.** Springer Ling. *PANDA as midrapidity detector for a future HESR Collider at FAIR*. [Online] 2020. [Citace: 29. 3. 2021.] Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1140/epja/s10050-020-00173-1>.
4. **VOLF, Michal.** AIP Conference Proceedings. *CFD Simulation of The Cooling System of a Calorimeter Detector*. [Online] 2021. [Citace: 25. 3. 2021.] Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0041387>.
5. —. *Chlazení Elektromagnetického Kalorimetru PANDA s Českou Stopou*. Plzeň : ZČU, 2019.
6. **HUČ, Matej, ŽAKELJ, Gašper a URBIC, Tomaz.** ResearchGate. *Properties of Methanol-Water Mixtures in a Coarse-Grained Mode*. [Online] 2015. [Citace: 25. 4. 2021.] Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.17344/acsi.2015.1441>.
7. **ROSIER, P.** FOSWIKI. *Definition of The Chiller of The Cooling Plant*. [Online] 2014. [Citace: 27. 3. 2021.] Dostupné z: <https://panda-wiki.gsi.de/foswiki/pub/EMC/Cooling/EMC-COOLING-Plant-Chiller-140113.pdf>.
8. **LUBENÍK, Jan.** *Simulace Fotobioreaktoru pro Kultivaci Řas*. [Online] 2014. [Citace: 28. 3. 2021.] Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63333/F2-DP-2015-Lubenik-Jan-DP_Lubenik.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
9. **ZHEN-HUA, Liu.** ResearchGate. *Forced convective flow drag and heat transfer characteristics of carbon nanotube suspensions in a horizontal small tube*. [Online] 2009. [Citace: 29. 4. 2021.] Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-009-0483-z>.
10. **LOUTHAN, Jindřich.** Parní turníny a kondenzátory. *Kondenzace a Regenerace*. Plzeň : ZČU, 2020.
11. **SCHWARZER, Jan a ZMRHAL, Vladimír.** *Stanovení Součinitelů Místních Ztrát s Využitím CFD*. [Online] 2010. [Citace: 27. 3. 2021.] Dostupné z: http://www.fsid.cvut.cz/~zmrhavla/Publikace/Schwarzer_Zmrhal_KaV2010.pdf.