



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

KONTROLNÍ PEVNOSTNÍ VÝPOČET NAPOJENÍ POTRUBÍ

STRENGTH CALCULATION OF PIPE JUNCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Dohnal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Létal, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Milan Dohnal
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Létal, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Kontrolní pevnostní výpočet napojení potrubí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem práce je kontrolní pevnostní výpočet kritického uzlu napojení tří potrubí z etylénových pecí na hlavní potrubí vedoucí do frakcionátoru. Napojení pod úhlem jsou blízka a vzájemně se ovlivňují. V provozu mohou být jednotlivé pece zapínány a vypínány, což významně ovlivňuje teplotní pole soustavy. V kontrolním výpočtu je tedy třeba zohlednit možné provozní stavy včetně namáhání od teploty.

Cíle diplomové práce:

1. Identifikace významných provozních stavů v potrubní soustavě.
2. Výpočet teplotního pole v soustavě v uvažovaných provozních stavech.
3. Pevnostní kontrola napojení dílčích přívodů od jednotlivých pecí do hlavního potrubí ve vybraných provozních stavech včetně uložení potrubí.
4. Vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

B31.3. Process piping; ASME code for pressure piping B31.3. 2016. ISBN 978-0-7918-7119-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na kontrolní pevnostní výpočet potrubního systému se zohledněním lokálních účinků tepelného zatížení. Pro správnou funkci řešeného systému, je třeba, aby odolával provozním zatížením, a umožňoval tak kontinuální dopravu procesního média v rámci propojených aparátů. V případě vyšetřovaného systému je nutné zohlednit proměnné teplotní zatížení jednotlivých potrubních větví v místě napojení na hlavní transferové potrubí. Hlavní částí práce je posouzení vlivů provozních podmínek na nejvíce namáhané úseky konstrukce pomocí teplotních a napěťově-deformačních analýz metodou konečných prvků provedených v programu ANSYS Mechanical. Přípustnost analyzované části potrubního systému je vyhodnocena jak srovnáním získaných napětí s dovolenými hodnotami dle normy ASME B31.3 Process piping, tak i s využitím kategorizace napětí podle normy ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Jelikož všechny hodnoty napětí jsou nižší než jejich příslušné dovolené hodnoty, je odolnost potrubního systému dle použitých metod hodnocena jako vyhovující.

KLÍČOVÁ SLOVA

Potrubí, kontrolní výpočet, teplotní a pevnostní analýzy, MKP

ABSTRACT

The master thesis focuses on the strength calculation of piping with extra consideration given to the local effects of thermal loads. To be recognized as properly functioning, the piping is required to withstand the expected operating conditions in order to enable the continuous transport of the working fluid within the interconnected devices. It is imperative to take into consideration the variable thermal load in the area where the individual pipe branches connect into the main transmission piping. A major part of the thesis is concerned with the assessment of the expected workload influence on the most stressed parts of the system. The data are gathered by employing temperature and stress-strain analyses carried out in the ANSYS Mechanical program using the finite element method. The values based on the analyses are cross-checked with both the permitted values according to the ASME standard B31.3 Process piping and the ASME Boiler and Pressure Vessel Code stress categorization method. Since all the evaluated stresses are below their respective permissible values, the piping strength is concluded as satisfactory according to the standards.

KEYWORDS

Pipeline, stress, design check calculation, thermal and stress analysis, FEM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOHNAL, M. Kontrolní pevnostní výpočet napojení potrubí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Létal, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Kontrolní pevnostní výpočet napojení potrubí* vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Tomáše Létala, Ph.D. a že všechny podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 25. 5. 2018.

Bc. Milan Dohnal

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Létalovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a věnovaný čas při vypracování diplomové práce, dále i ostatním vyučujícím za cenné rady. Děkuji také firmě CB&I za poskytnuté informace a především Ing. Martinovi Bačínskému a Ing. Evženovi Stejskalovi za odborné rady a zkušenosti z technické praxe. V neposlední řadě také celé své rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

1	ÚVOD.....	9
2	POTRUBNÍ SYSTÉM JAKO SOUČÁST VÝROBNÍ TECHNOLOGIE.....	10
2.1	Výroba ethylenu a jeho využití	10
2.2	Popis technologického celku.....	12
2.3	Řešená část potrubního systému	14
3	PROCES PŘESTUPU TEPLA	15
3.1	Sdílení tepla prouděním (přenos tepla v trubce)	16
3.2	Stanovení součinitele přestupu tepla pomocí kritériálních rovnic	19
3.3	Tepelná bilance potrubního systému.....	21
4	KONTROLNÍ VÝPOČET.....	24
4.1	Tvorba modelu	24
4.2	Stanovení okrajových podmínek.....	25
4.2.1	Teplotní a tlakové okrajové podmínky	25
4.2.2	Stanovení dovoleného namáhání	26
4.2.3	Výpočet minimální tloušťky stěny trubky	27
4.2.4	Vybrané provozní stavy	30
4.2.5	Zatížení od vnějšího uložení	31
4.3	Teplotní analýzy.....	31
4.3.1	Okrajové podmínky	33
4.3.2	Vyhodnocení teplotní analýzy	35
4.4	Hodnocení odolnosti potrubního systému.....	37
4.4.1	Okrajové podmínky	38
4.4.2	Kategorie napětí.....	44
4.4.3	Vyhodnocení pevnostní analýzy dle ASME B31.3	47
4.4.4	Vyhodnocení pevnostní analýzy pomocí kategorizace napětí	51
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
	SEZNAM TABULEK	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	71

1 ÚVOD

Hlavním předmětem práce je kontrolní pevnostní výpočet kritického uzlu napojení tří potrubních větví na hlavní transferové potrubí. Tato potrubní síť je vedena od ethylenových pecí přes další procesní zařízení, jako například zařízení na výměnu tepla, směšovací zařízení a je zakončena napojením do kolony pro frakční destilaci. Jednotlivé pece mohou pracovat v odlišných provozních režimech, což významně ovlivňuje teplotní zatížení jednotlivých potrubních větví. Vzhledem k této skutečnosti vznikla obava o odolnost konstrukce právě v místě napojení, kde by mohlo dojít k defektu z důvodu teplotní roztažnosti. Pro správnou funkci potrubního systému je třeba, aby odolával předpokládaným zatížením v provozních podmínkách. V kontrolním výpočtu je tedy třeba zohlednit možné provozní stavy včetně namáhání vnitřním tlakem, vlastní tíhou a v neposlední řadě také zmíněné namáhání od teplotního zatížení.

Kontrolní teplotní a napětově-deformační analýzy vybraného potrubního systému v petrochemickém závodě bude proveden pomocí softwaru s oficiálním obchodním označením ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1 [1] (dále jen Ansys Mechanical) a vyhodnocen dle příslušné normy ASME B31.3 [2] a dále metodou kategorizace napětí uvedenou v normě ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII [3]. Tato práce si klade za cíl zpřesnění standardních výpočtů potrubí v praxi, a to zejména v oblasti vlivu teplotního pole na pevnost konstrukce. Detailní kontrolní výpočet se zohledněním vlivu teplotního pole je demonstrován na případu reálného potrubního systému navrženého firmou CB&I zabývající se především projekční a návrhovou činností v petrochemickém průmyslu.

Při tvorbě této diplomové práce byl kladen důraz na využití znalostí získaných při psaní bakalářské práce v oblasti potrubních systémů a rozvíjení zkušeností v oblasti pevnostních výpočtů využitelných v průmyslové praxi.

2 POTRUBNÍ SYSTÉM JAKO SOUČÁST VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

Jedním z mnoha typů zpracování základních ropných frakcí je produkce petrochemikálií, které jsou nezbytně nutné pro další produkci širokého spektra chemických produktů, se kterými se člověk setkává denně. Produkty z ropy a zemního plynu jsou považovány za energetické produkty. Pro ilustraci je níže uveden obrázek 1, na kterém je zobrazen petrochemický závod na výrobu ethylenu. Jedním z výchozích procesů pro výrobu petrochemikálií je vysokoteplotní štěpení uhlovodíků. Tímto procesem jsou získány hlavní petrochemikálie jako je například ethylen, propylen, butadien a benzen. Dalšími procesy jsou tyto základní petrochemikálie přeměněny například na polymery nebo jiné chemické produkty. Patří mezi ně například farmaceutické produkty, barviva, výbušniny, vonné látky, atd. Mezi základní petrochemické produkty patří: [4]

- alkeny (etylen, propylen, buteny aj.) a dieny (1,3-butadien aj.)
- aromatické sloučeniny (benzen, toluen, xyleny aj.)
- syntézní plyny (vodík, atd.)



Obr. 1: Petrochemické zařízení na produkci ethylenu [5]

2.1 Výroba ethylenu a jeho využití

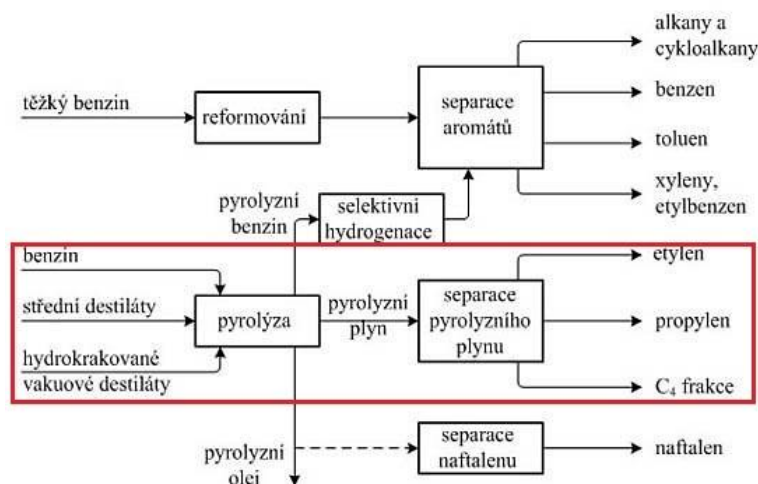
Výroba ethylenu se uskutečňuje za pomoci vysokoteplotního štěpení vyšších uhlovodíků. Jedná se o dělení složitých molekul vyšších uhlovodíků na základní molekuly. Postup výroby ethylenu je jedním z nejsložitějších procesů v petrochemickém průmyslu. Při štěpení výchozích surovin vzniká velkému množství složek, a proto je potřeba různých separačních kroků k dosažení požadované kvality ethylenu a dalších možných vedlejších produktů. V následující části je v několika krocích zjednodušeně představena výroba ethylenu.

Hlavní suroviny pro výrobu jsou především ethan a propan. Před vstupem hlavních surovin do procesu výroby ethylenu je nutné odstranit z nich oxid uhličitý. Tato úprava vstupních surovin probíhá reakcí ethanu a roztoku na bázi aminů, díky kterému

je z odstraněn oxid uhličitý. Po tomto procesu je možné ethan okamžitě zpracovávat nebo jej uložit do zásobníků. Propan je využívám k doplnění do směsi v případě nedostatku ethanu. Následuje samotný proces vysokoteplotního štěpení neboli krakování. Ethan v podobě vstupní suroviny je přiveden do pece, kde se mísí s párou a je zahříván nad požadovanou teplotu 800 °C. Za těchto podmínek se ethan rozkládá na ethylen a malé množství dalších plynů, včetně vodíku. Po tomto procesu je nutné zastavení probíhající reakce pomocí rychlého ochlazení procesního proudu pece. Pára vzniklá tímto ochlazením je dále upravena a použita v dané technologii. [5]

Vzniklá etylenová směs je dále ochlazena na cca 25 °C průchodem výměňkovou sítí a dále skrz chladicí věž. Během tohoto procesu dojde k odstranění některých vedlejších produktů, jako je například dehet. Dále je plynná směs vedena skrze kompresor a další výměňkovou síť, kde dojde k dalšímu ochlazení a směs se stává kapalnou. Následuje oddělení jednotlivých složek za procesu frakční destilace. V tomto procesu směs prochází postupně třemi destilačními kolonami. V první koloně označované jako „de-methanizér“, se oddělí vodík a metan, zbývající směs je přiváděna do druhé kolony zvané „de-ethanizér“. Ze spodní části této kolony se odvádí směs C5+, která se dále využívá především na výrobu syntetických vláken, obalových a izolačních materiálů. Zbývající směs ethylenu, acetylenu a zbývajícího ethanu je odveden z vrchní části kolony do konvertorů, kde je přidán vodík a za přítomnosti katalytické reakce je acetylen přeměněn na ethylen. Ethanová a etylenová směs pak vstoupí do poslední kolony, kde se oddělí zbývající plyny a veškerý ethan, který nebyl rozštěpen a výstupním produktem je již ethylen. Nevyužitý ethan je recyklován a navrácen zpět do pece, kde je znovu zpracován. [5]

Na obrázku 2 na další stránce je uvedeno schéma výroby různých druhů petrochemikálií. Důležitá část schématu z pohledu této práce je na obrázku 2 zvýrazněna červeným rámečkem, jedná se právě o výrobu ethylenu.



Obr. 2: Schéma výroby petrochemikálií [6]

Ethylen (označován také jako ethen) je jednou z hlavních zpracovávaných surovin v petrochemickém průmyslu a výchozí surovinou pro výrobu většiny syntetických polymerních hmot. Dříve zastával funkci klíčové petrochemikálie pro výrobu polymerních hmot především acetylen z důvodu dostupnější a jednodušší velkokapacitní

výroby. Vzhledem k pokročilejším technologiím je hlavní předpoklad velkokapacitní výroby ethylenu zajištěn a jedná se tedy o poměrně lacinou chemikálii. Cena za kilogram je velice proměnná v důsledku změn na ropném trhu, avšak průměrná cena se pohybuje mezi 25 Kč až 30 Kč za kilogram. [7]

Pomocí chemických reakcí ethylenu s ostatními látkami je možné produkovat širokou škálu různých druhů chemikálií, jako například vinylderiváty (vinylchlorid a následná výroba polyvinylchloridu, vinylbenzen a výroba styrenu a dále polystyrenu, atd.). Vinylderiváty spolu s ethylenem představují jedny z hlavních monomerů pro výrobu důležitých polymerů. Tyto chemikálie jsou dále použity na výrobu běžných předmětů, jako jsou různé druhy plastů a textilu, toaletní potřeby, čisticí prostředky, barvy, nemrznoucí kapaliny, lehké součásti automobilů a zdravotnické potřeby. [7]

2.2 Popis technologického celku

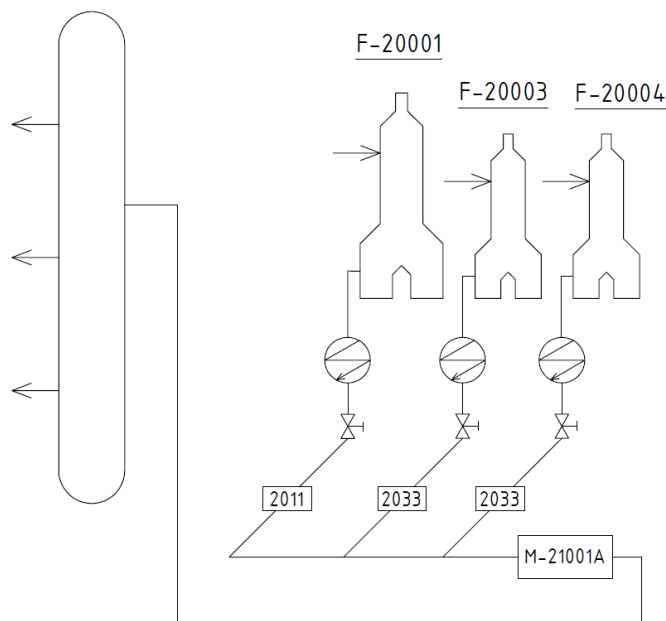
Vybraná potrubní trasa pro kontrolní výpočet se nachází v petrochemickém závodě na zpracování ropy a výrobu plastů, kde je vyráběn ethylen. Plánovaná životnost tohoto zařízení je 20 let při průměrné provozní době 8000 hodin za rok.

Potrubní systémy jsou velice důležitou součástí každého provozu, mají za úkol zajistit spolehlivou přepravu látek mezi jednotlivými aparáty a bezproblémový chod celého systému. Přeprava látek probíhá za zvýšených tlaků a teplot dle požadavků dané technologie. Může být také využito pro přepravu energie vázané na přepravované médium, jako jsou parovodní potrubí, horkovody, hydraulická a pneumatická potrubí apod. S tím souvisí problematika tepelných izolací potrubí, problematika stanovování tlakových ztrát v potrubí a pevnostních výpočtů potrubí. [8, 9]

Skládají se z přímých úseků, které jsou spojovány armaturami různých typů v jeden těsný celek, který je vhodně uložen na potrubní uložení. Jednotlivé součásti potrubních systémů jsou voleny s ohledem na působící provozní tlak, teplotu a také druh procesního média. Problematika těsnosti patří k nejsledovanějším faktorům a neustále se vyvíjí, proto jsou potrubní systémy vybaveny bezpečnostní výstrojí různého druhu. Nejkritičtější místem je většinou přírubový spoj, který vyžaduje odbornou instalaci. Porušení těsnosti potrubních systémů představuje významné riziko při, kterém může dojít k havárii a velkým ekonomickým ztrátám. [8, 9]

Veškerá technologie zařízení na zpracování ethylenu je přesně popsána souborem složitých PI diagramů, které byli naprojektovány procesním oddělením firmy CB&I. Tyto PI diagramy obsahují všechny procesní proudy a aparáty v zařízení. Pro přehlednost byla část PI diagramů obsahujících vybranou potrubní trasu přepracována do zjednodušeného schématu, které je zobrazeno na obrázku 3 na další straně.

KOLONA PRO FRAKČNÍ DESTILACI



Obr. 3: Schéma procesu

Vyšetřovaný potrubní systém spadá pod technologický celek označovaný jako „Steam cracker unit“ neboli jednotka pro parní krakování. Tato jednotka je naprojektována pro produkci především polymerního ethyleny, propylenu a pyrolýzního topného oleje.

Ethylenové pece uvedené ve schématu na obrázku 3 jsou dvojího druhu, první druh je označen F-20001 a je primárně určen pro štěpení ethanu, ale pro flexibilitu provozu zařízení je možné v této jednotce také štěpit současně ethan a propam. Tento typ pece je složen z dvojité radiální komory s 8chodým spirálovitým uspořádáním trubek a konvekční sekci, kde na každý chod navazuje primární výměník tepla pro danou výstupní potrubní trasu označovaný jako „Transfer Line Exchanger“. Výstupní potrubní trasy z primárních výměníků jsou dále spojeny v jeden hlavní parní buben označovaný jako „Steam drum“, ten zásobuje celou jednotku požadovaným druhem páry, dle potřeby jsou dále upravovány její parametry.

Druhý druh pecí je označen jako F-20003 a F-20004 a jsou označeny jako flexibilní, což znamená, že kromě štěpení hlavních surovin je možno je i využít pro úpravu jiných surovin a aditiv potřebných pro výrobu. Tento typ pece je složen z dvojité radiální komory s 6chodým spirálovitým uspořádáním trubek a konvekční sekci, kde na každý chod navazuje primární výměník tepla jako tomu je v případě pece prvního typu. Z obou druhů pecí jsou hlavní produkty reakce (označeny jakou procení proudy 2011 a 2033) vedeny skrze výměňkovou síť s dále se tyto tři potrubní větve větve napojují ve vyšetřovaném místě do hlavního transferového potrubí vedoucí do směšovacího aparátu pro úpravu směsi označeného M-21001A. Ve směšovacím aparátu dochází ke vstřikování speciálního oleje neboli „Quench oil“, který slouží k ochlazení směsi před vstupem do kolony označené C-21001, kde dochází k rozdělení vstupní suroviny na jednotlivé frakce.

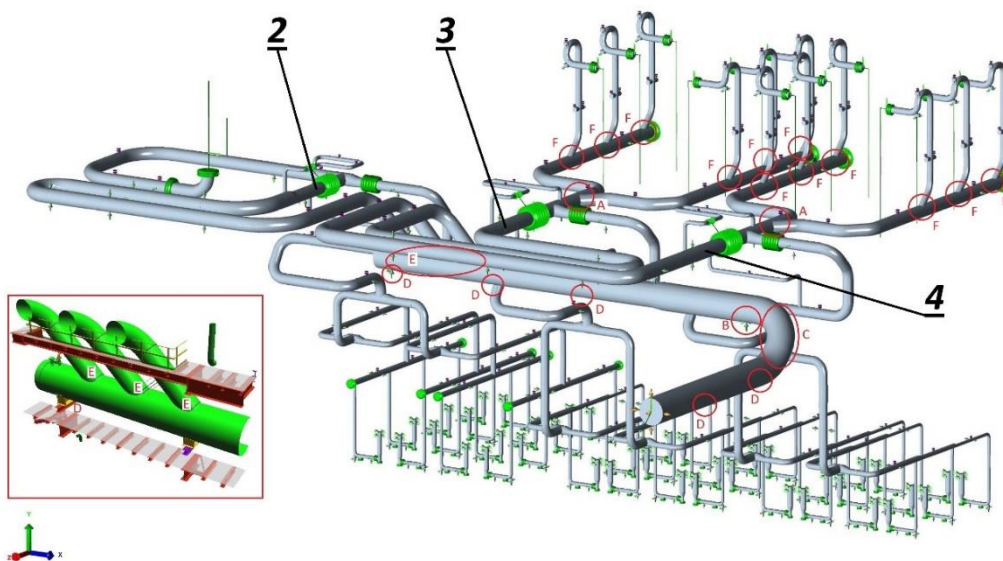
Procesním médiem je plynná směs uhlovodíků o složení daném na základě inženýrských výpočtů procesního oddělení firmy CB&I. Jelikož dochází pouze k přepravě směsi

pomocí potrubní sítě, nedochází v této síti za žádných provozních podmínek k významným chemickým reakcím, které by vedly ke změně složení směsi. Celé zařízení je navrženo s ohledem na výrobní podmínky, které se mohou měnit v závislosti na kvalitě zpracovávaných surovin a podmínkami na trhu. Tyto výrobní podmínky je možné měnit pomocí provozních podmínek jednotlivých aparátů.

2.3 Řešená část potrubního systému

Předmětem práce je hodnocení vlivu teplotního pole na pevnost a odolnost části potrubního systému s větvemi, které jsou střídavě odstavovány, přičemž dochází k jejich chladnutí. V obdobných případech nemusí být běžně používaný návrh potrubní soustavy dostatečný, protože nezohledňuje lokální vlivy proměnného teplotního pole na konstrukci, a to zejména v oblastech napojení jednotlivých potrubních větví. Právě toto místo je označeno za kritické, z důvodu předpokladu zvýšeného namáhání v podobě teplotní roztažnosti a bude předmětem dalšího vyhodnocení. V této práci je řešena část potrubního systému, který byl standardně navržen firmou CB&I.

Potrubní systém je uveden na obrázku 4, kde je v dolní levé části zobrazeno vyšetřované místo. Předmětem analýz jsou i příslušné potrubní větve napojující se do vyšetřovaného místa. Čísla na obrázku 4 vyjadřují označení příslušných potrubních větví. Všechna označení týkající se potrubního systému v této práci jsou převzata z původního značení z podkladů, které byly využity v této práci.



Obr. 4: Potrubní systém (obrázek převzat z analýzy firmy CB&I)

Pro případ této práce je uvažován ustálený stav celého potrubního systému včetně ustáleného teplotního pole. V potrubí o daném průřezu proudí plynná směs a průtočný profil je plně vyvinutý po celé délce potrubí. Při proudění tekutiny je uvažován stav nucené konvekce beze změny skupenství. Celý systém je navrhován tak, aby pracoval za vyšších teplot, než je teplota rosného bodu směsi a nedocházelo tedy ke kondenzaci. Vyšetřované stavy jsou kontrolovány za provozního režimu při přetlaku 0,5 baru v celém systému a teplotě 368 °C pro všechny procesní proudy, jedná se o referenční stav, kdy jsou všechny potrubní větve v provozu.

3 PROCES PŘESTUPU TEPLA

Různé procesy výroby petrochemikálií jsou doprovázeny mnoha zpracovatelskými operacemi a transporty potřebných procesních médií. Tyto operace jsou uskutečněny pomocí procesních zařízení různých typů. Transport médií je zajištěn pomocí potrubních tras, které spojují jednotlivá procesní zařízení a zajišťují kontinuální chod všech zařízení jako celku. Při transportu skrze jednotlivá procesní zařízení dochází k přestupu tepla. Tento přestup tepla může být samovolný nebo nucený a může být využit například k předehřevu nebo chlazení ostatních procesních médií.

Tepelná energie neboli teplo se dá považovat za formu energie, která připadá mikroskopickému pohybu částic. Tento pohyb částic může být translační, rotační nebo vibrační. V plynech převažuje translační pohyb z důvodu volného pohybu jednotlivých částic v objemu plynu. Pro pevné látky je významný pohyb vibrační, protože elementární částice jsou pevně vázány například v krystalové mřížce. [10]

Měrnou veličinou tepelné energie je teplota, jenž je úměrná intenzitě mikroskopického pohybu částic. V technické praxi je využívána tato veličina, protože je snadněji měřitelná oproti rozdílu energií tepelného pohybu. Systém může mít v každém místě jinou intenzitu mikroskopického pohybu, například kinetickou energii elementárních částic, a to má za následek rozdílnou teplotu na zkoumaných místech daného systému. [10]

Pro charakteristiku přestupu tepla mezi jednotlivými látkami nebo prostředími je využíván, tzv. tepelný tok, který je definován jako množství tepla procházející danou plochou za jednotku času ve směru kolmém k této ploše. Vztah pro tepelný tok je uveden v rovnici (3.1).

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau} \quad (3.1)$$

Jednotkou tepelné energie je $1 J$, jednotkou tepelného toku je $1 J \cdot s^{-1}$ neboli $1 W$.

Mechanismy pro sdílení tepla jsou rozděleny do tří základních skupin:

- **vedení** (kondukce)
 - způsobeno rozdílem tepelných energií v různých místech hmoty, vyrovnání energií molekul je realizováno za pomoci vzájemných interakcí, tak dochází k tepelnému toku z místa o vyšší tepelné energii do místa s nižší tepelnou energií [10]
- **proudění** (konvekce)
 - vlivem pohybu tekutiny dochází k pohybu hmoty a tedy k přenášení (sdílení) tepla, může docházet k samovolnému proudění (nerovnoměrný ohřev/ochlazování tekutiny) nebo nucenému proudění (pohyb je vyvolán vnějšími silami) [10]
- **záření** (sálání, radiace)
 - tepelná energie mezi tělesy je přenášena pomocí elektromagnetického záření

Prostup tepla v průmyslových zařízeních bývá uskutečněn kombinací všech základních mechanismů sdílení tepla v závislosti na dané situaci a provozu. V případě této práce je dominantní přenos tepla vedením a prouděním v potrubní síti, proto bude dále uvažováno pouze s těmito dvěma mechanismy.

V případě zadané potrubní sítě bude přestup tepla z proudícího média do stěny potrubí probíhat prouděním a dále mechanismus vedení zajistí přestup tepla stěnou trubky. Vzhledem k vnější izolaci trubky je přestup tepla zpomalen z důvodu nižší vodivosti materiálu izolace a příslušného součinitele přestupu tepla. Dále je přenos tepla skrze vrstvu izolace uskutečněn pomocí vedení a opět mechanismem proudění teplo přestupuje do okolního prostředí (např. vzduch). Na celé potrubní trase se však vyskytují spojovací uzly jako například různé typy armatur nebo potrubní uložení, které nemusejí vždy být kryty izolací. Na těchto místech dochází k přestupu tepla prouděním přímo z povrchu potrubí do okolního prostředí. Může zde docházet k jistým tepelným ztrátám, vše záleží na konkrétních vlastnostech dané potrubní trasy. Ve většině případů jsou tyto ztráty zanedbatelně malé.

V uvedeném případě se jedná pouze o sdílení tepla do okolí, kde není teplo dále využito. Obdobným případem v průmyslu může být výměna tepla v zařízeních, při kterém se sdílené teplo využívá pro ohřev například procesního média. Mezi zařízení využívající sdílení tepla patří především různé druhy výměníků tepla, předehříváků, kondenzátorů nebo kotlů.

3.1 Sdílení tepla prouděním (přenos tepla v trubce)

Mechanismus sdílení tepla prouděním je uskutečněn při obtékání tuhého tělesa (například stěna trubky) tekutinou. Jedná se o sdružené tepelné pochody probíhající současně tj. vedení a proudění tepla. V literatuře je často tento mechanismus nazýván také jako sdílení tepla stykem, popřípadě prostup tepla nebo výměna tepla. [11]

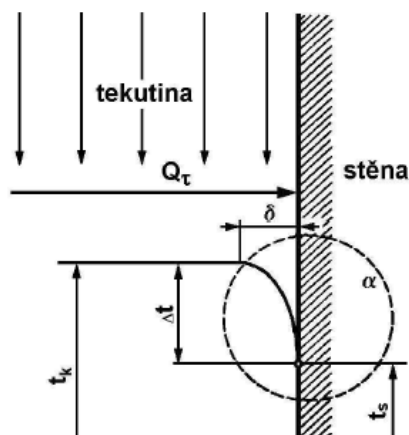
Uvnitř tekutiny obdobně jako v tuhé látce je teplo sdíleno vedením, které je charakterizováno teplotním gradientem a tepelnou vodivostí dané tekutiny nebo tuhé látky. Tyto vlastnosti daných látek přímo definují rychlost přestupu tepla. V případě sdílení tepla prouděním je přenos tepla přímo vázaný na proudící tekutinu, jedná se o velice složitý termo-kinetický děj. Tento fakt vede ke komplikacím při popisu tohoto mechanismu sdílení tepla, který je ovlivněn mnoha faktory. Mezi hlavní faktory patří charakter a rychlost proudění tekutiny v každém místě a čase, tzv. rychlostní pole, které definuje tvar rychlostního profilu proudící tekutiny. Dalšími faktory jsou termo-fyzikální vlastnosti tekutiny, které se mění v závislosti na teplotě, tj. například měrná hmotnost (ρ), kinematická viskozita (ν), měrná tepelná kapacita za stálého tlaku (c_p) a také součinitel tepelné vodivosti tekutiny (λ). V neposlední řadě také záleží na tvaru, rozměrech a jakosti teplosměnné plochy tuhého tělesa okolo, kterého tekutina proudí. [10, 11]

Hlavním předpokladem sdílení tepla prouděním je teplotní pole s nenulovou hodnotou gradientu teploty, tj. neizotermní proudění tekutiny. Při neizotermním proudění tekutiny v okolí teplosměnné plochy tuhého tělesa v tzv. mezní vrstvě dochází ke změně charakteru toku oproti charakteru toku v dostatečné vzdálenosti od teplosměnné plochy tuhého tělesa, tato oblast je nazývána jádrem tekutiny. Změnu charakteru toku způsobují především třecí síly vznikající prouděním tekutiny po teplosměnné ploše o určité jakosti

(drsnosti) povrchu. V této mezní vrstvě dochází k výměně tepla za pomoci mechanismu sdílení tepla prouděním za podmínky, že jádro proudící tekutiny má odlišnou teplotu od obtékané teplosměnné plochy tuhého tělesa. [10]

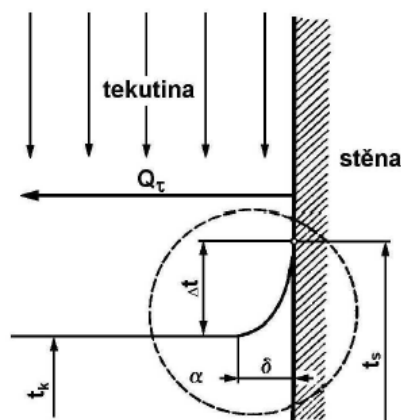
Jak již bylo zmíněno výše, hlavním faktorem ovlivňujícím mechanismus sdílení tepla je přímo proudění tekutiny. Dle způsobu vzniku proudění lze hovořit o dvou typech – samovolné a nucené proudění. Samovolné proudění je nazýváno jako tzv. přirozená konvekce a jedná se o samovolný pohyb tekutiny vzniklý rozdílnými teplotami na různých místech tekutiny. Snahou tekutiny je mít na všech místech stejnou teplotu neboli dosáhnout co nejmenšího teplotního gradientu. Dalším typem je nucené proudění, které je vyvoláno vnějšími silovými účinky, jako jsou například různé typy čerpadel (použití především pro kapaliny) nebo ventilátorů (použití pro plynné fáze). V reálném případě nastávají oba typy proudění současně v určitém poměru. Výjimkou je případ proudění o vyšších rychlostech, kde vliv samovolného proudění je zanedbatelný. Významný vliv na vedení tepla má zejména druh proudění. Proudění je rozděleno na dva základní druhy – laminární a turbulentní proudění. Při laminárním proudění se částice pohybují souběžně s obtékanými stěnami a pohyb je uspořádaný. Změna druhu proudění nastane při překročení kritické rychlosti, nabývá odlišných hodnot pro různé druhy kapalin a geometrie kanálů. V případě laminárního proudění dochází ke sdílení tepla ve směru kolmém ke směru proudění v celé ploše tekutiny, dochází zde v podstatě k mechanismu vedení a určující je v tomto případě tepelná vodivost kapaliny. Ovšem při turbulentním proudění se zmíněný způsob sdílení tepla pro laminární proudění vztahuje pouze na vzniklou mezní vrstvu. V jádře turbulentního proudu dochází k přechodu tepla pomocí promíchávání částic tekutiny. Intenzita výměny tepla při turbulentním proudění závisí především na termickém odporu mezní vrstvy, který je vyšší než termický odpor v jádře. Tento fakt lze pozorovat na obrázku 5, na kterém je zřetelné že největší změna teploty nastává právě ve zmiňované mezní vrstvě u obtékané stěny. [11]

Výměna tepla může probíhat dvěma směry na základě stanovení místa s vyšší teplotou. Pokud má jádro tekutiny vyšší teplotu, než stěna obtékaného tuhého tělesa dochází ke sdílení tepla směrem z tekutiny do stěny. Tento případ je uveden na obrázku 5, kde t_k je označení teploty v jádře tekutiny, kde je teplota snadno měřitelná a t_s je označení teploty stěny tuhého tělesa. Dále Q_τ značí tepelný tok, tloušťka mezní vrstvy je označena δ . [10]



Obr. 5: Sdílení tepla z jádra tekutiny do stěny tuhého tělesa [12]

Dalším případem může být vyšší teplota stěny obtékaného tuhého tělesa, než je teplota tekutiny a tím pádem bude docházet ke sdílení tepla směrem ze stěny do tekutiny, jak je uvedeno na obrázku 6.



Obr. 6: Sdílení tepla ze stěny tuhého tělesa do jádra tekutiny [12]

Pro komplexní popis mechanismu sdílení tepla prouděním, stanovení množství přestupujícího tepla a rozložení teplotního pole je nutné určit součinitel přestupu tepla, který udává tepelný tok přestupující z kapaliny do stěny. Pomocí něj bude zajištěno správné nastavení toho mechanismu do teplotní analýzy. Vzhledem k tomu, že součinitel přestupu tepla je složitou funkcí více proměnných, zjišťuje se v praxi několika odlišnými způsoby, které jsou uvedeny níže:

- výpočtem nebo experimentem z tvaru teplotního profilu v mezní vrstvě
- výpočtem s využitím teorie podobnosti a příslušných kritériálních rovnic
- stanovením experimentálně například pomocí bilance

Pro případ diplomové práce je pro stanovení součinitele přestupu tepla vybrán způsob výpočtu s využitím teorie podobnosti a příslušných kritériálních rovnic, který se jeví jako nejvhodnější vzhledem ke známým veličinám a použití v praxi. V případě využití kritériálních rovnic se vychází z předpokladu teorie podobnosti. S využitím této teorie a experimentálních poznatků bylo zformováno několik obecných rovnic, díky kterým lze dopočítat potřebný součinitel přestupu tepla.

Teorie podobnosti je používána pro implementaci dat z experimentálních měření určitého pochodu na pochody podobné na základě podobnosti vybraných veličin, které definují daný pochod. Existují základní podobnosti – geometrická, mechanická a tepelná. V tomto případě se bude využito právě tepelných kritériálních rovnic, které určují, že na základě geometrické a mechanické podobnosti je daný pochod i tepelně podobný. [11]

Stanovení součinitele přestupu tepla při proudění média v potrubí a použité kritériální rovnice budou vysvětleny v následující podkapitole.

3.2 Stanovení součinitele přestupu tepla pomocí kritériálních rovnic

První část této kapitoly je věnována samotnému výpočtu součinitele přestupu tepla pro dané úseky, za předpokladu ustálené teploty v celém potrubním systému dle daných provozních stavů. V následující kapitole je tento předpoklad ustálené teploty ověřen pomocí tepelné bilance celého systému. Uvažovaný postup je do značné míry zjednodušený a přizpůsobený pro výpočet konečné hodnoty součinitele přestupu tepla. Postup vychází z použití v průmyslové praxi.

Pro stanovení součinitele přestupu tepla je nutná znalost vybraných termo-fyzikálních vlastností média, které proudí v potrubní síti. Vzhledem k tomu, že použité médium je mnoho složková směs, jejíž složení je závislé na teplotě, bylo využito poskytnutých informací o použité uhlovodíkové směsi firmou CB&I. Složení směsi a její charakteristické veličiny použité do výpočtů jsou uvedeny v tabulce 1.

Potrubní větev	Objemový průtok	Kinematická viskozita	Dynamická viskozita	Měrná tepelná kapacita	Tepelná vodivost
	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
42" n.2 (2011)	132400	$21,1 \cdot 10^{-6}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	2683	$6,02 \cdot 10^{-2}$
42" n.3 (2033)	258500				
42" n.4 (2033)	258500				
72" Transferline	649400	$19,56 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	2550	$5,51 \cdot 10^{-2}$

Tab. 1: Veličiny použité pro stanovení součinitele přestupu tepla

Nejprve je nutný přepočítání zadaného objemového průtoku Q_V ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) na rychlost proudění v potrubní síti pro jednotlivé úseky. Výchozí vztah je uveden v rovnici (3.2).

$$Q_V = S \cdot w \quad (3.2)$$

Kde S (m^2) je průtočná plocha a w ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je střední rychlost proudění. Úpravou rovnice (3.2) z důvodu vyjádření rychlosti dostaneme vztah uvedený ve vztahu (3.3).

$$w = \frac{Q_V}{S} \quad (3.3)$$

Určení hodnoty Reynoldsova čísla pomocí vztahu (3.4).

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (3.4)$$

Kde L (m) je charakteristický rozměr potrubí (průměr) a ν ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) je kinematická viskozita. Rovnice (3.4) vyjadřuje tzv. Reynoldsovo kritérium, je to bezrozměrná veličina charakterizující typ proudění. Na základě hodnoty Reynoldsova čísla lze určit, zda se jedná o laminární či turbulentní proudění. [10] Stanovením hodnot pro jednotlivé části potrubního systému a jejich vyhodnocením, lze říci že, se v celém systému vyskytuje turbulentní proudění.

Následuje vyjádření Pecletova čísla pomocí vztahu (3.5).

$$Pe = \frac{w \cdot L}{a} \quad (3.5)$$

Kde a ($m^2 \cdot s^{-1}$) značí součinitel teplotní vodivosti, který určuje, jak snadno se v látce vyrovnávají teplotní rozdíly. Rovnice (3.5) vyjadřuje tzv. Pecletovo kritérium, jež je bezrozměrná veličina ekvivalentní Reynoldsovu číslu. Využívá se pro charakterizaci přenosu hmoty ve spojitém prostředí a vyjadřuje poměr toku tepla prouděním a toku tepla vedením při mechanismu konvekce. [10]

Prandtlovo číslo lze vyjádřit jako poměr předchozích kritérií dle rovnice (3.6).

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\frac{w \cdot L}{a}}{\frac{w \cdot L}{\nu}} = \frac{\nu}{a} \quad (3.6)$$

Rovnice (3.6) vyjadřuje tzv. Prandtlovo kritérium je bezrozměrná veličina, jež je měřítkem podobnosti rychlostních a teplotních polí neboli vyjadřuje jaký typ přenosu tepla (konvekce nebo kondukce) v tekutině převládá. [10] Pro výpočet hodnoty Prandtlova čísla dle předchozí rovnice (3.6) je nutné stanovit hodnotu kinematické viskozity, která je vyjádřena dle rovnice (3.7).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.7)$$

Kde μ ($Pa \cdot s$) je dynamická viskozita a ρ ($kg \cdot m^{-3}$) je hustota. Dále je vyjádřen součinitel teplotní vodivosti, který je dán vztahem (3.8).

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3.8)$$

Kde λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) je tepelná vodivost a c_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku. Pomocí dvou předchozích rovnic (3.7) a (3.8) vyjádříme rovnici (3.6) pro Prandtlovo číslo vhodnějším tvarem, vzhledem ke známým proměnným dle rovnice (3.9).

$$Pr = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (3.9)$$

Vyjádření Nusseltova čísla dle rovnice (3.10).

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (3.10)$$

Kde hledaná veličina α ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) značí součinitel přestupu tepla. Rovnice (3.10) vyjadřuje tzv. Nusseltovo kritérium jež je bezrozměrná veličina, které určuje poměr

přestupu tepla konvekcí a kondukcí kolmo na uvažovanou hranici tekutiny stanovený na vnějším povrchu tekutiny. Neboli vyjadřuje význam a intenzitu mezi přestupem tepla a vedením tepla. [10]

Vzhledem k potřebě určit součinitel přestupu tepla je nutno vypočítat Nusseltovo číslo dle Hausenova vztahu daného rovnicí (3.11), který popisuje přestup tepla při turbulentním proudění tekutiny trubkou při nestabilním proudění, které je způsobeno potrubními armaturami, především několika koleny v potrubním systému v této práci. [13]

$$Nu = 0,116 \cdot \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \left(\frac{\mu_k}{\mu_{k,s}} \right)^{0,14} \quad (3.11)$$

Kde v případě tohoto vzorce L (m) značí délku potrubí, d (m) potom průměr potrubí a poslední člen rovnice vyjadřuje poměr dynamické viskozity v jádře toku tekutiny a u stěny potrubí. Pro použití tohoto vzorce musí proudění splňovat několik podmínek dány vztahy (3.12), (3.13) a (3.14).

$$2320 < Re < 10^6 \quad (3.12)$$

$$0,6 < Pr < 500 \quad (3.13)$$

$$1 < \frac{L}{D} < \infty \quad (3.14)$$

Celý potrubní systém splňuje podmínky uvedené výše pro použití Hausenova vztahu. Vyjádření hledaného součinitele přestupu tepla ze vztahu (3.10) je uvedeno v rovnici (3.15).

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{L} \quad (3.15)$$

Postup a příslušné rovnice pro stanovení součinitele přestupu tepla jsou v této kapitole vyjádřeny pouze obecně. Uvedený postup je naprogramován pomocí softwaru GNU Octave, version 4.2.1 (dále jen Octave) pro jednotlivé potrubní úseky, na kterých je uvažován konstantní objemový průtok. Naprogramovaný postup řešení včetně výsledných hodnot je součástí elektronických příloh na přiloženém CD na konci této práce. Jednotlivé hodnoty pro konkrétní úseky potrubí jsou uvedeny v tabulce 4 v kapitole 4.2.1 Teplotní a tlakové okrajové podmínky.

3.3 Tepelná bilance potrubního systému

Tato kapitola slouží k ověření předpokladu ustálené teploty v celé potrubní větvi, dle jednotlivých uvažovaných stavů. Tento předpoklad je použit na základě chování odstavené potrubní větve. V případě odstavené potrubní větve se dá předpokládat, že bude pomalu chladnout a blížit se ustálenému stavu, který je pro konstrukci potrubí z celého průběhu potenciálně nejnebezpečnější. Proto lze pro posouzení případů se zastavenými větvemi použít ustálené stavy a není třeba simulovat celý průběh chlazení.

Pomocí zjednodušené tepelné bilance je zjištěn rozdíl teplot na začátku a konci každé potrubní větve. Na základě poklesu teploty v potrubním systému bude rozhodnuto, zda lze zmiňovaný předpoklad využít. Řešení tepelné bilance je zjednodušeno předpokladem, že se jedná o rovný potrubní úsek o stanovené délce celé potrubní větve. Výchozím vztahem pro zjištění rozdílu teplot je rovnice tepelného výkonu \dot{Q} (W) viz. vztah (3.16).

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (3.16)$$

Dále bylo nutné určit součinitel prostupu tepla k ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), viz rovnice (3.17).

$$k = \frac{1}{\frac{d_3}{d_1} \cdot \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{OCEL}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_3}{2 \cdot \lambda_{IZOLACE}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2 \cdot \alpha_2}} \quad (3.17)$$

Kde d_1 značí vnitřní průměr trubky, d_2 vnější průměr trubky a d_3 vnější průměr izolace, dále jednotlivé tepelné vodivosti materiálu trubek λ_{OCEL} a izolace $\lambda_{IZOLACE}$, α_1 značí součinitel teplotní vodivosti proudícího média a α_2 součinitel okolního vzduchu. Vztahem (3.18) je stanovena plocha výměny tepla A (m^2). Délka transferového potrubí je uvažována 17,3 m a pro potrubní větve je brána hodnota 71,9 m pro nejdelší potrubní větve.

$$A = \pi \cdot d_3 \cdot L \quad (3.18)$$

Rozdíl teploty procesního média při provozním stavu uvnitř systému a teploty okolního vzduchu (20 °C) je uveden ve vztahu (3.19).

$$\Delta T = T_{HOT} - T_{COLD} \quad (3.19)$$

Dosazením do rovnice (3.16) bylo určeno teplo odevzdané systémem do okolí a následným dosazením do rovnice tepelné bilance (3.20) a úpravou na rovnici (3.21) je stanoven pokles teploty na daném úseku potrubního systému. Kde m ($kg \cdot s^{-1}$) značí hmotnostní průtok.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.20)$$

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c_p} \quad (3.21)$$

V tabulce 2 na další stránce jsou uvedeny vypočítané hodnoty pro všechny větve potrubního systému dle uvedeného výpočtu výše v uvažovaných stavech. Pro stanovení finálních hodnot je uvedený postup opět naprogramován v softwaru Octave a je součástí elektronických příloh na přiloženém CD na konci této práce. Tepelná bilance je uvažována pro stav s izolací a pro stav bez izolace.

Stav	Potrubní větev	Tepelný výkon (kW)	Pokles teploty (°C)
OPE s izolací	42"	63,8	0,21
	72"	27,3	0,08
OPE bez izolace	42"	788,6	2,66
	72"	337,8	1,03

Tab. 2: Tepelná bilance

Jak je vidět z tabulky 2 pokles teploty na délce potrubní větve není nijak razantní a lze uvažovat ustálenou teplotu v celém potrubním systému. V případě markantnějších rozdílů v teplotě na začátku a konci potrubní sítě by bylo přesnějším řešením rozčlenění potrubní sítě na úseky o konečné délce, na kterých by změna teploty nebyla tak razantní. Tento rozdíl by musel být vhodně stanoven na základě posouzení celkové teploty systému. Dále by se na těchto definovaných úsecích vypočítal koeficient přestupu tepla. Tento postup by však znamenal značnou komplikaci v podobě stanovení potřebných termo-fyzikálních vlastností směsi v potrubní síti při daných teplotách.

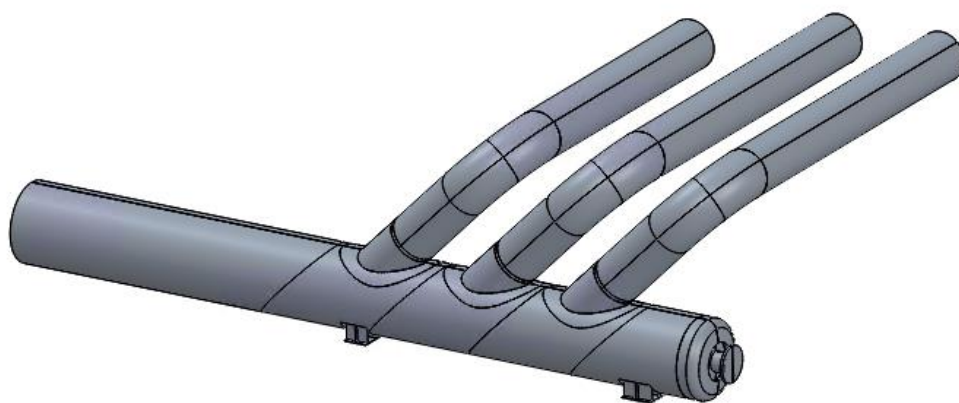
4 KONTROLNÍ VÝPOČET

Tato kapitola pojednává o provedení kontrolního pevnostního výpočtu zadaného potrubního systému při provozním zatížení ve vybraných stavech včetně příslušných okrajových podmínek a následné vyhodnocení napětově-deformačních analýz dle příslušných norem [2, 3]. Uvedený postup výpočtu a určení okrajových podmínek bylo průběžně konzultováno s inženýry příslušných oddělení firmy CB&I. Veškeré teplotní a napětově-deformační analýzy jsou provedeny v programu Ansys Mechanical.

Při pevnostním výpočtu potrubí je třeba rozlišovat různé pracovní stavy potrubí za daných provozních podmínek, na nichž závisí jak samotná velikost vnějších sil, tak i odlišnost jejich účinku na namáhání celého systému. Lze pomocí těchto výpočtů simulovat různé kritické a neočekávané stavy, které by mohli nastat a celý systém nepříznivě ovlivnit. Neuvažujeme-li nestacionární jevy krátkodobého charakteru (najíždění a odstavování, tepelné rázy), je pro výpočet kromě velikosti vnějších sil způsobených především provozním tlakem a uložením systému důležité také sledování teploty, při níž vnější síly působí, a dlouhodobě časová proměnnost těchto sil. [14]

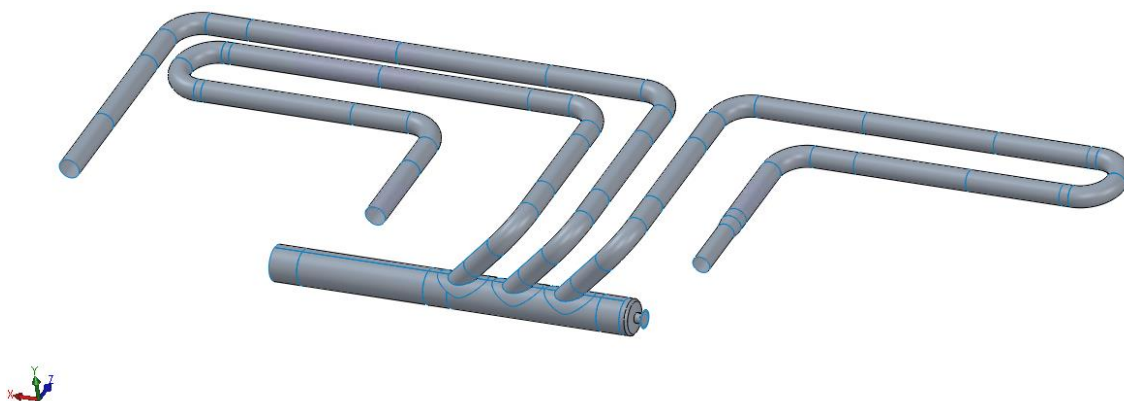
4.1 Tvorba modelu

Firmou CB&I byly poskytnuty veškeré podklady, především isometrie pro tvorbu geometrie zadaného potrubního systému. Pro namodelování potrubního systému je využito programu Solidworks, ve kterém byly vytvořeny a upravovány všechny modely použité v této práci. Nejprve byl namodelován plnohodnotný objemový model vybraného kritického napojení potrubního systému, který je použit do teplotní analýzy pro rozložení teplotního pole. Jak je vidět na obrázku 7, jsou zde všechny detaily jako například výztužné límce, potrubní podpory nebo izolace. Model obsahuje také detaily v místě dna, kde je namodelován i inspekční otvor včetně plochého dna.



Obr. 7: Objemový model

Dalším modelem, který je využit pro napěťově-deformační analýzu, je povrchový skořepinový model, kterému je později v programu Ansys Mechanical přiřazena příslušná tloušťka stěny dle specifikace. Použitý model je zobrazen na obrázku 8.



Obr. 8: Skořepinový model

4.2 Stanovení okrajových podmínek

Pro realizaci teplotních a pevnostních analýz, které jsou předmětem této diplomové práce, je nutné určit vstupní okrajové podmínky, které jsou definovány reálnými provozními podmínkami daného zařízení. Tyto okrajové podmínky jsou stanoveny s jistým zjednodušením a měly by zahrnovat i případné havarijní a výjimečné stavy, které mohou nastat v průběhu provozování zařízení.

Mezi základní okrajové podmínky patří především teplotní a tlakové podmínky, za kterých bude daná potrubní síť provozována, materiál potrubí a následné stanovení tloušťky stěny, které bezpečně odolá stanovenému zatížení. V neposlední řadě je také nutné stanovit vhodné kombinace zatížení závislých na celé technologii a provozu příslušného petrochemického zařízení. Mezi tyto zatížení patří především teplotní zatížení vzniklé při provozu, především ve stavech, kdy některá potrubní větev bude mimo provoz a teplotní pole bude rozloženo nerovnoměrně. Jak již bylo zmíněno, jako procesní médium je v systému plynná uhlovodíková směs a je uvažován ustálený stav celého potrubního systému.

4.2.1 Teplotní a tlakové okrajové podmínky

Přenos procesního media je realizován za zvýšené teploty a tlaku. Okrajové teplotní a tlakové podmínky jsou uvedeny v tabulce 3 níže. V případě tlaku se jedná o přetlak neboli o rozdíl oproti atmosférickému tlaku a je uveden v jednotkách bar.

Potrubní větev	Teplota (°C)	Tlak (barg)
42" n. 2 (2011)	368	0,5
42" n. 3 (2033)		
42" n. 4 (2033)		
72" Transferline		

Tab. 3: Provozní okrajové podmínky

Teplotní zatížení není do analýzy nastaveno napřímo pomocí konkrétní hodnoty teploty dané součástí modelu, ale je aplikováno pomocí mechanismu konvekce, přesněji součinitele přestupu tepla za dané teploty. Součinitele pro jednotlivé větve potrubního systému jsou vypočítány v předchozí kapitole. Nastavením teplotního zatížení pomocí konvekce je vhodnější především z důvodu, že teplotní okrajová podmínka je zadána pomocí teploty procesního média proudícího v potrubí nikoli přímo pomocí teploty vnitřního povrchu stěny potrubí. Jak již bylo zmíněno, v předchozích kapitolách v proudícím mediu se u stěny potrubí tvoří mezní vrstva, přes ni dochází k přenosu tepla a teplota stěny potrubí je nižší než v jádře proudícího média.

Hodnoty součinitele přestupu tepla nastavené na vnitřní povrch potrubí v teplotní analýze jsou uvedeny v tabulce 4. Postup nastavení uvedených hodnot a hodnot konvekce pro okolní prostředí je přesněji popsáno v kapitole 4.3.1, kde jsou popsány všechny okrajové podmínky pro teplotní analýzu.

Potrubní větev	α ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
42" n. 2 (2011)	114,37
42" n. 3 (2033)	179,15
42" n. 4 (2033)	178,83
72" Transferline	102,38

Tab. 4: Hodnoty součinitele přestupu tepla pro vnitřní povrch potrubí

4.2.2 Stanovení dovoleného namáhání

Dovolená namáhání pro potrubní systém je nutné stanovit pro vyhodnocení analýz, ale také pro kontrolní výpočty tlouštěk stěn potrubí a budou v dalších kapitolách podrobněji vysvětleny. Při stanovení dovoleného namáhání je postupováno v souladu s normou [2]. Pro potrubní systém jsou použity bezešvé trubky v rozměrech DN 1050 (NPS 42) a DN 1800 (NPS 72) vyrobené z materiálu, který nese označení ASTM A691 - 1.1/4 CR dle platného značení ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials). Jedná se o legovanou chrom-molybdenovou ocel, jejíž složení je uvedeno v tabulce 5.

Příklady	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
%	0,05-0,17	0,40-0,65	0,025	0,025	0,50-0,80	1-1,5	0,45-0,65

Tab. 5: Příklady materiálu ASTM A691-1.1/4CR

Hodnoty dovoleného namáhání pro vybraný materiál dle normy [2] z tabulky A-1M na str. 228 uvedeny níže. V rovnici (4.1) je uvedena minimální hodnota meze pevnosti v tahu a v rovnici (4.2) minimální hodnota meze kluzu.

$$R_m = 414 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

$$R_e = 241 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

Dovolené napětí od trvalých zatížení pro daný materiál v závislosti na teplotě stanovené z normy [2], z tabulky A-1M (str. 229), pro provozní stav je hodnota uvedena v rovnici (4.3).

$$S_a = 122 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

V dalším kroku je nutné stanovit hodnoty přípustného rozpětí (rozkmitu) napětí dle normy [2] a vztahu (4.7). Pro dosažení do uvedeného vztah je nutné nejprve stanovit dovolené napětí od trvalých zatížení při maximální a minimální teplotě, které daný systém může dosáhnout za provozních podmínek. Dovolené napětí od trvalých zatížení při minimální očekávané provozní teplotě (20 °C) dle normy [2] z tabulky A-1M (str. 229), mělo by odpovídat zhruba 57 % meze kluz dle vztahu (4.4).

$$S_c = 138 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

Dovolené napětí od trvalých zatížení při maximální očekávané provozní teplotě (368 °C) dle normy [2] z tabulky A-1M (str. 229) uvedeno v (4.5).

$$S_h = 122 \text{ MPa} \quad (4.5)$$

Faktor rozkmitu napětí f , který zohledňuje únavovou pevnost vlivem cyklického zatěžování. Počet cyklů pro daný potrubní systém vzhledem k výrobním podmínkám je stanoven na 800. Dle normy [2] a příslušného grafu pro určení faktoru (str. 18) je hodnota uvedena v rovnici (4.6).

$$f = 1 \quad (4.6)$$

Výsledná hodnota přípustného rozkmitu napětí v provozním stavu dosazením stanovených hodnot do vzorce (4.7) z normy [2].

$$\begin{aligned} S_a &= f \cdot (1,25 \cdot S_c + 0,25 \cdot S_h) = \\ &= 1 \cdot (1,25 \cdot 138 \text{ MPa}) + (0,25 \cdot 122 \text{ MPa}) = 203 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Dalším důležitým parametrem do teplotní analýzy je izolace potrubí, ta je tvořena minerální vatou z křemičitanu vápenatého značky Rockwool typu RockTech SPI 120, o tloušťce 100 mm. Materiálové vlastnosti jako například hustota a tepelná vodivost jsou převzaty z technického listu [15]. Tyto hodnoty jsou použity do teplotních a napětově-deformačních analýz.

4.2.3 Výpočet minimální tloušťky stěny trubky

Při kontrolním výpočtu minimální tloušťky stěny potrubí při provozních podmínkách je nejprve nutné stanovit tlak při daných provozních podmínkách, protože minimální tloušťka stěny je vztažena pouze na odolnost vůči tlaku v daném stavu.

Vnitřní přetlak při provozních podmínkách je uveden v rovnici (4.8).

$$P = 50 \text{ kPa} \quad (4.8)$$

Vnější průměr potrubí je zvolený podle firemních standardů dle potrubní třídy E2A2. Značení průměru $D_{42''}$ odpovídá napojením a $D_{72''}$ odpovídá hlavnímu transferovému potrubí. V rovnicích (4.9) a (4.10) jsou uvedeny vnější průměry trubek potřebné pro kontrolní výpočet tloušťky stěny.

$$D_{42''} = 1066,8 \text{ mm} \quad (4.9)$$

$$D_{72''} = 1828,8 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Faktor kvality určený dle normy [2] z tabulky A-1B (str. 333) uveden v (4.11).

$$E_k = 1 \quad (4.11)$$

Koeficient svarového spoje „Y“ určený dle normy [2] z tabulky 304.1.1 (str. 22) uveden ve vztahu (4.12).

$$Y = 0,4 \quad (4.12)$$

Koeficient zohledňující přídavek materiálu z důvodu koroze uvnitř potrubí uveden ve vztahu (4.13), stanoveno dle použité potrubní třídy.

$$c = 3 \text{ mm} \quad (4.13)$$

Následně dosazením stanovených hodnot výše do příslušného vztahu (4.14) uvedeného v normě [2] je vypočítána minimální tloušťka, která odolá navrženému provoznímu tlaku.

$$tm = t + c = \frac{P \cdot D}{2 \cdot (S \cdot E_k + P \cdot Y)} + c \quad (4.14)$$

Výsledná minimální tloušťka stěny pro transferové potrubí o průměru $72''$ je ve vztahu (4.15).

$$tm_{72''} = 3,4 \text{ mm} \quad (4.15)$$

Výsledná minimální tloušťka stěny pro potrubní napojení o průměru $42''$ je ve vztahu (4.16).

$$tm_{42''} = 3,2 \text{ mm} \quad (4.16)$$

Pro použití vztahu (4.14) pro výpočet minimální tloušťky stěny z normy musí být splněna podmínka daná normou [2] uvedená v rovnici (4.17) a na další stránce (4.18).

$$tm_{72''} < D_{72''}/6 \quad (4.17)$$

$$3,4 \text{ mm} < \frac{1828,8}{6} = 304,8 \text{ mm}$$

$$tm_{42''} < D_{42''}/6 \quad (4.18)$$

$$3,2 \text{ mm} < \frac{1066,8}{6} = 177,8 \text{ mm}$$

Podmínky pro oba průměry potrubí jsou splněny.

Pro vybraný potrubní systém jsou použity standardizované tloušťky trubek. V uvedených hodnotách je zohledněn přídavek materiálu z důvodu koroze a záporná výrobní tolerance, která odpovídá přibližně 12,5 % tloušťky stěny trubky. Hodnoty, které budou použity do analýz, jsou uvedeny ve vztahu (4.19) až (4.22).

$$t_{42''} = 12,7 \text{ mm} \quad (4.19)$$

$$t_{72''} = 19,05 \text{ mm} \quad (4.20)$$

Použité standardizované tloušťky trubek jsou mnohem větší než tloušťky stanovené normou, protože potrubí jsou navrhována na několik desítek let životnosti a musí proto odolávat různým druhům procesních médií včetně následné koroze. Dalším aspektem je například mechanická odolnost trubek, kdy trubky musí odolat kromě tlakového zatížení také například zatížením vlastní tíhou, a především odolat ztrátě stability a s tím související ztrátě kruhovitosti průřezu v místě uložení v případě použití větších průměrů. Dále musí odolat také případnému poškození při přepravě a montáži.

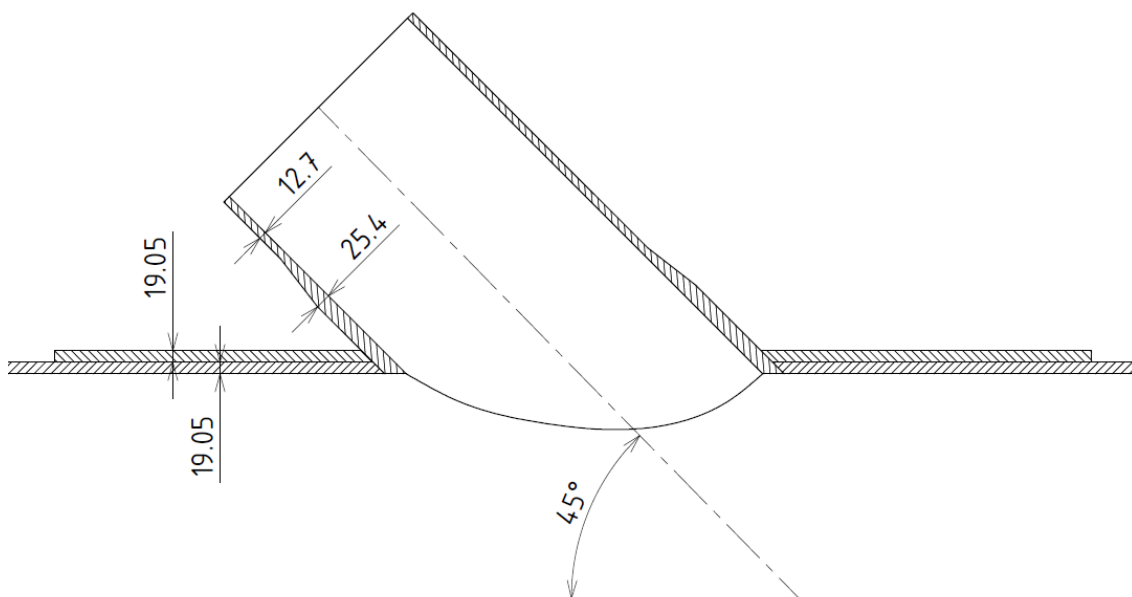
V kritickém místě napojení potrubních větví je navrženo použití výztužného límce a zesílení části napojení z důvodu vyšší odolnosti konstrukce. Tloušťka stěny výztužného límce je uvedena ve vztahu (4.21). Použitím výztužného límce došlo ke zdvojnásobení tloušťky stěny v daném místě.

$$t_{límec} = 19,05 \text{ mm} \quad (4.21)$$

Tloušťka zesílení v místě napojení je uvedena ve vztahu (4.22), hodnota odpovídá dvojnásobku tloušťky stěny napojení.

$$t_{42'' \text{ vyztužení}} = 25,4 \text{ mm} \quad (4.22)$$

Na obrázku 9 na další stránce je zobrazen řez v místě vyztužení konstrukce s uvedenými parametry.

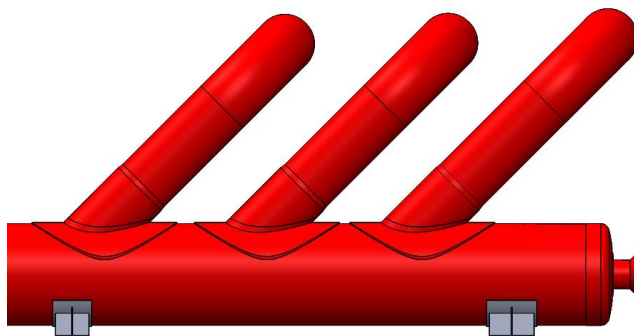


Obr. 9: Detail řezu napojení (rozměry uvedeny v mm)

4.2.4 Vybrané provozní stavy

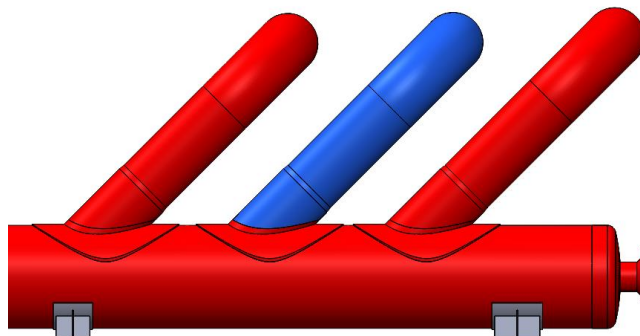
Důležitým bodem této práce je určení vyšetřovaných stavů pro kontrolní pevnostní výpočet. Stanovení vhodných vyšetřovaných stavů bylo konzultováno s vedoucím inženýrem procesního oddělení ve firmě CB&I na základě vyhodnocení projektované činnosti daného výrobního celku. Vzhledem k proměnným výrobním podmínkám celé technologie a možnosti provozovat jednotlivá potrubní napojení odděleně se naskýtá velké množství potenciaálně kritických provozních stavů. Jednotlivé potenciaálně kritické stavy byli seřazeny podle četnosti výskytu v technologii a dle tohoto kritéria jsou vybrány pro vyšetření dva nejčastější stavy.

První stav označován jako stav 1, je běžný provozní stav, ve kterém bude konstrukce zatěžována po většinu plánované životnosti. V tomto stavu budou všemi napojeními proudit nejvyšší možné průtoky procesního média při nejvyšší provozní teplotě. Vyšetřovaný provozní stav 1 je zobrazen na obrázku 10.



Obr. 10: Vyšetřovaný provozní stav 1

Druhý stav označován jako stav 2, je druhý nejčastější provozní stav, ve kterém se bude výrobní celek vyskytovat. V tomto stavu je v prostřední potrubní větvi výrazně omezen provoz z důvodu výkyvů ve výrobě z důvodu snížení poptávky po finálním produktu. Tato větev je technologicky udržována v pohotovostním stavu za ustálené teploty, při které nedochází ke kondenzaci zbylé směsi. Uvedený druhý vyšetřovaný stav je uveden na obrázku 11.



Obr. 11: Vyšetřovaný provozní stav 2

Důvodem úplné odstávky některé větve mohou být například dlouhodobější plánované odstávky, při kterých bude docházet k údržbě jedné ze tří pecí, revizím potrubního systému atd. Údržba pece je prováděna pomocí tzv. parovzdušného odkoksování vnitřních stěn trubek radiční a konvekční sekce. Veškeré produkty z pece po tomto režimu jsou odkloněny do speciálního spalínového potrubí z důvodu možnosti obsahu pevných částic a nežádoucích látek v procesním médiu, které by mohly poškodit další aparáty v potrubním systému. Dále mohou v technologii nastat i krátkodobé o neočekávané odstávky. Krátkodobé odstávky většinou nejsou uvažovány z důvodu rychlé reakce na tyto stavy, ale neočekávané odstávky, při kterých mohou být překročeny provozní podmínky, jsou předmětem mnoha vyšetřovaných stavů při návrhu nové technologie. Pro případ krátkodobých a neočekávaných odstávek je celý systém projektován tak, aby byl zajištěn kontinuální provoz za všech uvažovaných podmínek.

4.2.5 Zatížení od vnějšího uložení

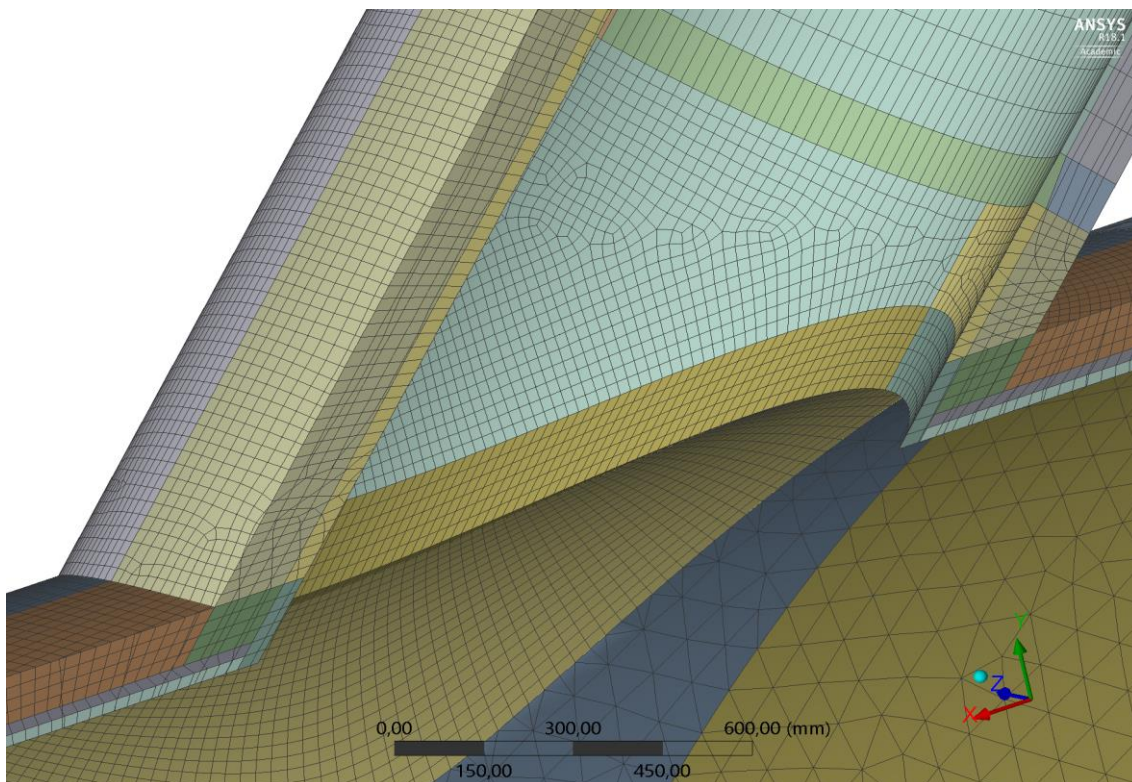
Jedná se především o okrajové podmínky od zatížení různých druhů potrubních uložení a působení potrubního systému na okolní aparáty, které jsou určeny na základě navržených typů potrubních podpěr viz. další kapitola 4.4.1 Okrajové podmínky. V případě MKP se okrajové podmínky dělí na nezbytné (označovány jako „Essential“) a přirozené (označení „Natural“) [16]. Nezbytné okrajové podmínky, jako jsou například teploty v teplotních analýzách nebo posuvy v napětově-deformačních analýzách, musí být zadány vždy. V případě neúplného zadání nezbytných okrajových podmínek má úloha nekonečně mnoho řešení a nedojde k vyřešení úlohy z důvodu překročení limitů volnosti modelu.

4.3 Teplotní analýzy

Teplotní analýzy provedené v této kapitole jsou důležitým výchozím bodem pro další postup kontrolního výpočtu. Výsledná rozložení teplotních polí v daných stavech

poskytnou okrajové teplotní podmínky do následujících napětově-deformačních analýz. Analýzy v této kapitole jsou realizovány pomocí modulu „Steady-state thermal“ v programu Ansys Mechanical, jedná se o statickou teplotní analýzu, jež vypočítává účinky trvalého tepelného zatížení na systém nebo součást [16]. Připravený objemový model, který je namodelován včetně izolace a dalších detailů potrubního systému z programu Solidworks je pomocí převodního formátu Parasolid importován do prostředí analýz, kde je pomocí funkce „Part“ spojen do jednoho celku. Dále je jednotlivým částem model, jako jsou trubky a izolace přiřazen materiál. Objemový typ modelu byl použit z důvodu vhodnějšího nastavení okrajových podmínek konvekce na vnitřní stranu trubky s vnější stranu izolace a také pro přesnější zobrazení průběhu teplotního pole skrze stěnu potrubního systému.

Následuje vygenerování výpočtové sítě. S ohledem na tvar modelu je nutné použít některé pomocné funkce pro vytvoření, co nevhodnější výpočtové sítě. Síť je postupně upravována z důvodu přesnosti výsledků tak, aby jejím zjemňováním, tedy zmenšováním prvků již nedocházelo k rozdílům ve výsledcích analýzy. Finální verze výpočetní sítě je vytvořena s ohledem na velikost celého modelu a výpočtovou náročnost a související především kapacitní omezení výpočtové sestavy. V místech diskontinuit, jako jsou především napojení, je zvolena jemnější síť a v místech rovných úseků trubek jsou použity větší prvky. Ukázka výpočetní sítě v místě napojení je na obrázku 12.



Obr. 12: Ukázka výpočtové sítě – detail potrubního napojení

V další kapitole následuje podrobnější nastavení okrajových podmínek do jednotlivých analýz a jejich vyhodnocení.

4.3.1 Okrajové podmínky

Hlavním parametrem pro teplotní analýzu je zadání teplotního zatížení. Předpokladem je uvažování pouze mechanismu přestupu tepla konvekce pro přestup tepla z procesního média do materiálu potrubí a dále mechanismem vedení přestup tepla přes materiál potrubí až do izolace. Vliv radiace je zde zanedbán. Jak již bylo zmíněno dříve teplotní zatížení je na model aplikováno pomocí konvekce neboli součinitele přestupu tepla za dané teploty, kde tento mechanismus zohledňuje i proudění procesního média. Tyto hodnoty pro jednotlivé části potrubního systému jsou vypočítány dle postupu v kapitole 3.2 Stanovení součinitele přestupu tepla pomocí kritériálních rovnic. Výsledné hodnoty jsou nastaveny do objemového modelu v analýze v programu Ansys Mechanical.

První teplotní okrajová podmínka nastavení konvekce je aplikována na celý vnější povrch potrubí, kde je součinitel přestupu tepla stanoven pro přestup tepla z materiálu izolace do okolního vzduchu na hodnotu $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ pro samovolné proudění, jak je uvedeno na obrázku 13. V případě teplotních analýz v této práci jsou nezbytné okrajové podmínky zadány ve formě konvekce za dané teploty.

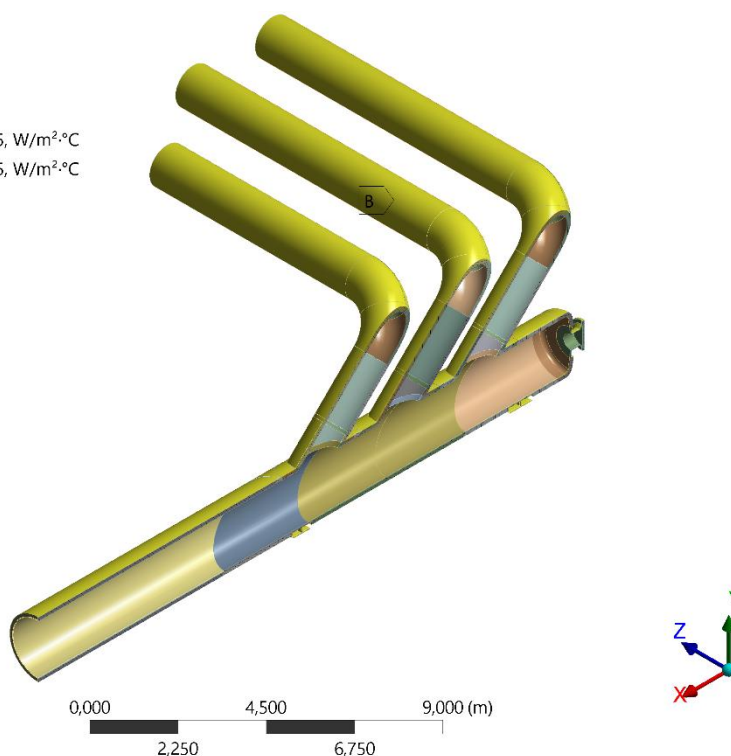
A: OPE 1_0_1

Convection vzduch 1/2

Time: 1, s

A Convection vzduch 1/2: 20, °C, 5, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°C}$

B Convection vzduch 2/2: 20, °C, 5, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°C}$



Obr. 13: Nastavení hodnot konvekce pro okolní prostředí

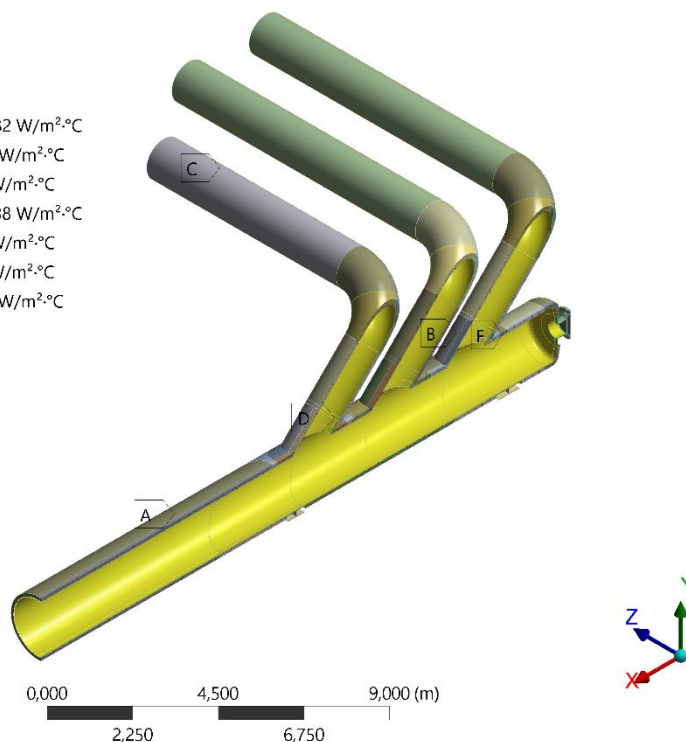
Pro vyšetřovaný stav 1 jsou nastavené hodnoty konvekce uvedeny na obrázku 14 na další stránce. V zaslepeném konci uvnitř transferového potrubí, kde je napojeno dno s inspekčním otvorem nepřímou proudí médium z posledního napojení číslo 2. Podle předpokladu zde bude docházet k promíchávání a víření procesního média, a proto je v tomto místě nastavena hodnota součinitele přestupu tepla na $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Tento předpoklad a stanovené hodnoty v celé této kapitole byly určeny na základě konzultace s procesními inženýry ve firmě CBI a ověřeny s odbornými pracovníky Ústavu procesního inženýrství.

A: OPE 1_1_1

Convection transfer 1/4

Time: 1, s

- A** Convection transfer 1/4: 368, °C, 143,82 W/m²·°C
- B** Convection napojení 2: 368, °C, 114,4 W/m²·°C
- C** Convection napojení 4: 368, °C, 179, W/m²·°C
- D** Convection transfer 2/4: 368, °C, 102,38 W/m²·°C
- E** Convection napojení 3: 368, °C, 179, W/m²·°C
- F** Convection transfer 4/4: 368, °C, 25, W/m²·°C
- G** Convection transfer 3/4: 368, °C, 49,5 W/m²·°C



Obr. 14: Nastavené hodnoty konvekce pro stav 1

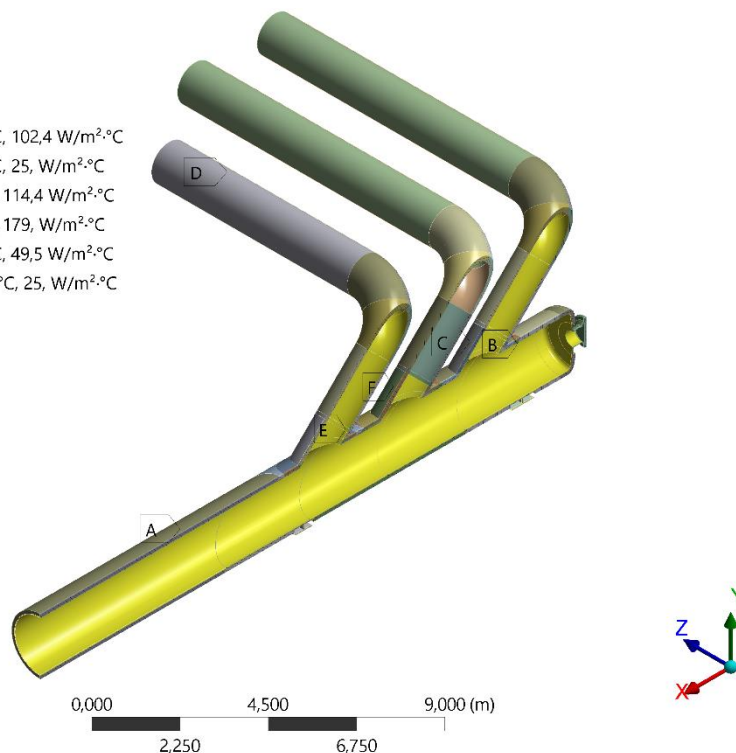
Na obrázku 15 je zobrazeno nastavení hodnot součinitele přestupu tepla pro vyšetřovaný stav 2. V místě napojení dna a konce transferového potrubí je nastavena hodnota stejně jako v případě stavu 1. Hodnoty součinitele v napojení číslo 3 jsou podrobněji zobrazeny na dalším obrázku.

A: OPE 1_0_1

Convection transfer 1/3

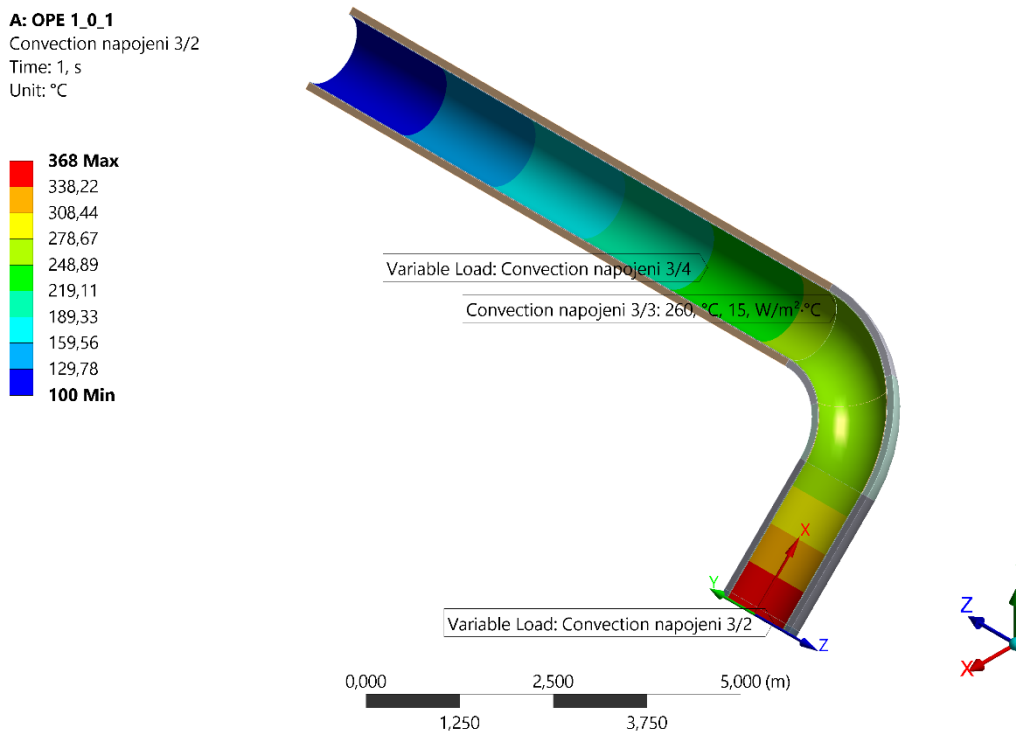
Time: 1, s

- A** Convection transfer 1/3: 368, °C, 102,4 W/m²·°C
- B** Convection transfer 3/3: 368, °C, 25, W/m²·°C
- C** Convection napojení 2: 368, °C, 114,4 W/m²·°C
- D** Convection napojení 4: 368, °C, 179, W/m²·°C
- E** Convection transfer 2/3: 368, °C, 49,5 W/m²·°C
- F** Convection napojení 3/1 : 368, °C, 25, W/m²·°C



Obr. 15: Nastavené hodnoty konvekce pro stav 2

Podrobněji nastavené hodnoty součinitele přestupu tepla pro odstavené potrubní napojení číslo 3 jsou zobrazeny na obrázku 16. V této větvi je hodnota součinitele nastavena na $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ v závislosti na snižující se teplotě z důvodu odstávky této potrubní větve a ochlazování procesního média. Zároveň však v místech blízkých napojení s hlavním transferovým potrubím v této větvi bude docházet k současnému ohřevu procesního média z důvodu přirozené cirkulace, při níž bude mít teplejší médium tendenci stále proudit do vyšších poloh potrubního systému.

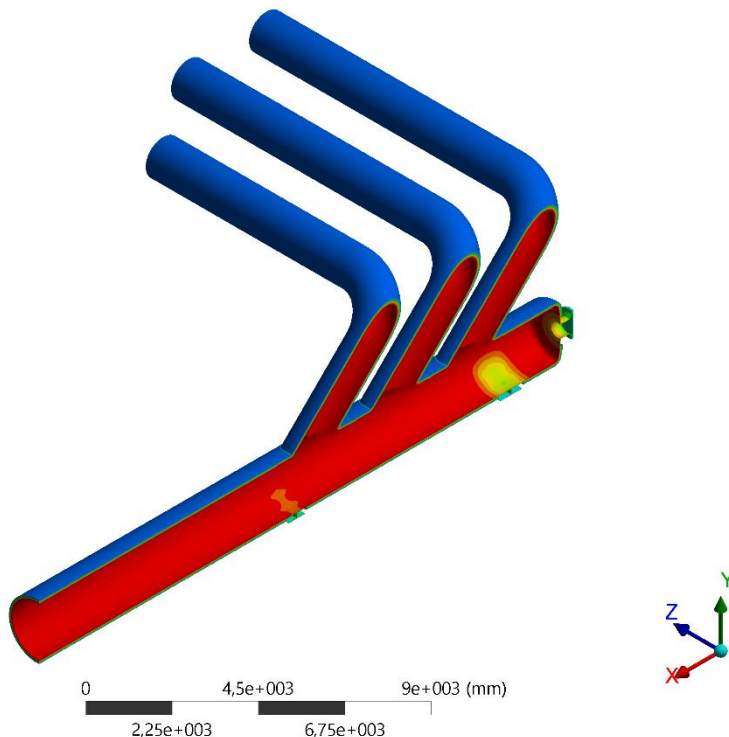
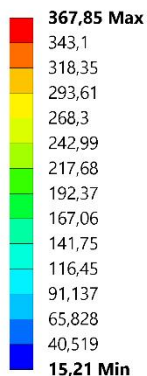


Obr. 16: Detail vybrané části s nastavenými hodnotami konvekce

4.3.2 Vyhodnocení teplotní analýzy

Okrajové podmínky z předchozí kapitoly jsou nastaveny do objemového modelu a je provedena teplotní analýza pro oba zmiňované stavy. Vyhodnocením teplotní analýzy je získáno rozložení teplotního pole pro jednotlivé stavy, jež bylo jedním z cílů této práce. Následuje importování výsledného teplotního pole do okrajové podmínky pro napětově-deformační analýzu. Výsledné teplotní pole je zobrazeno na následujících obrázcích, teplotní pole pro vyšetřovaný stav 1 je na obrázku 17 na další stránce.

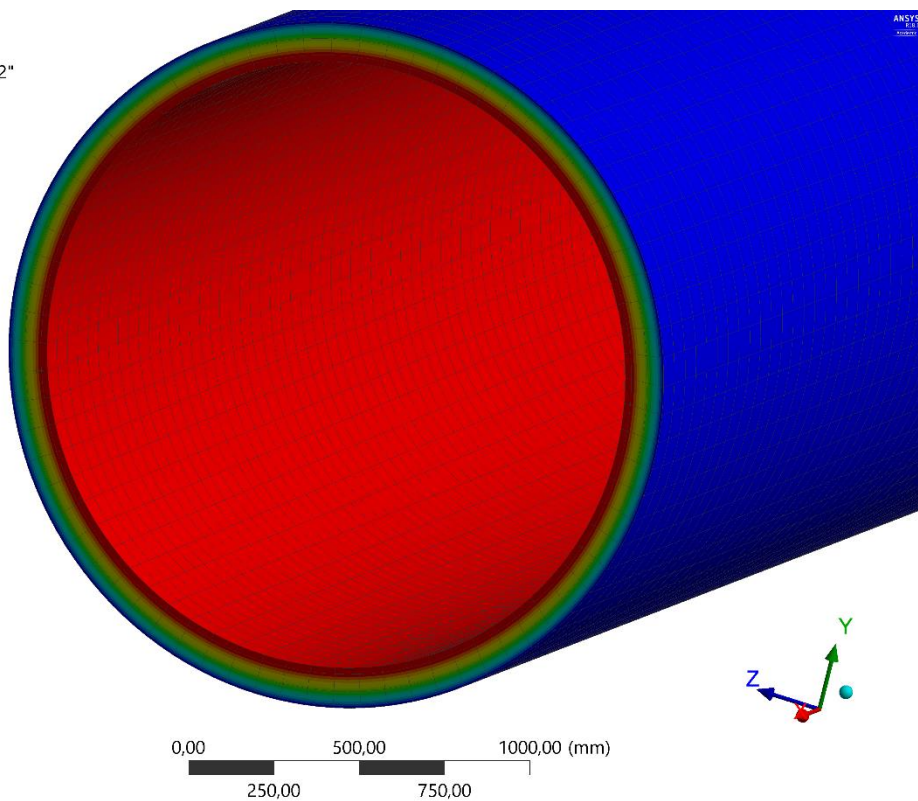
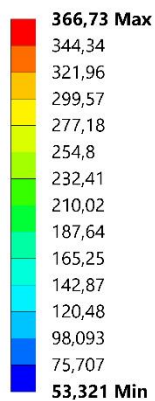
A: OPE 1_1_1
 Temperature
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1



Obr. 17: Rozložení teplotního pole ve stavu 1

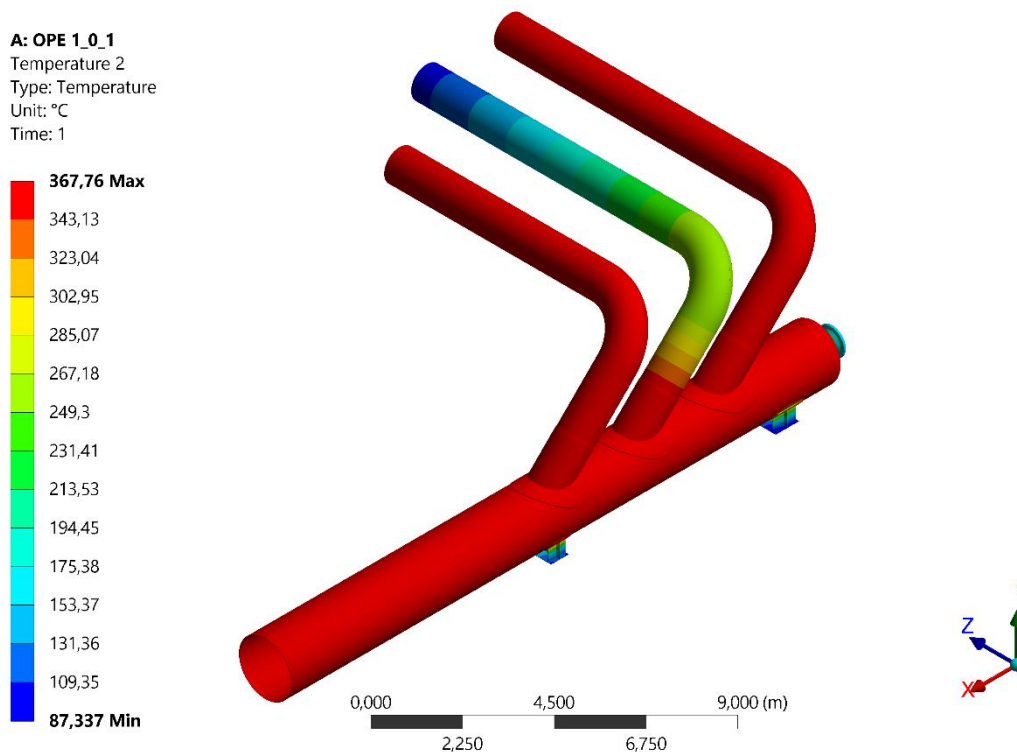
Detailní rozložení teplotního pole skrze stěnu trubky transferového potrubí 72“ je zobrazeno na obrázku 18.

A: OPE 1_1_1
 Teplota stěny trubky 72"
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1



Obr. 18: Rozložení teplotního pole skrze stěnu trubky 72“

Na obrázku 19 je zobrazeno rozložení teplotního pole pro stav 2, pro lepší vykreslení teplotního pole je využit model, ve kterém byla skryta izolace a je zde zobrazen pouze materiál potrubí.

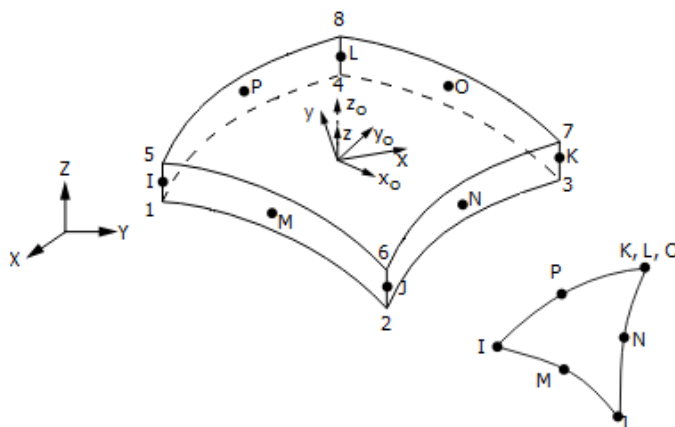


Obr. 19: Rozložení teplotního pole ve stavu 2

4.4 Hodnocení odolnosti potrubního systému

V této kapitole je dosaženo hlavního cíle této práce, a to provedení kontrolního výpočtu. Důležitou částí byly teplotní analýzy, které poskytly teplotní okrajové podmínky pro napěťově-deformační analýzy. Využitím stanovených okrajových podmínek budou provedeny analýzy pro vybrané stavy a následně budou vyhodnoceny.

Napěťově deformační analýzy pro vybrané stavy jsou provedeny v programu Ansys Mechanical s využitím modulu „Static structural“, který je uzpůsoben pro statické namáhání. Skořepinový model připravený pro analýzu v programu Solidworks je importován do prostředí výpočetního programu pomocí formátu Parasolid a je vytvořena výpočtová síť modelu neboli „mesh“. Při tvorbě výpočtové sítě je využito prvků typu SHELL 281. Jedná se o prvek s použitými kvadratickými aproximačními funkcemi, který je vhodný pro analýzy tenkých až středně tlustých skořepinových konstrukcí. Prvek má osm uzlů, z toho čtyři uzly jsou na rozích a čtyři uzly ve středu každé strany. V každém uzlu existuje šest stupňů volnosti (posuvy a natočení ve směru souřadnicových os x, y a z). Díky uzlům ve středu stran je tento typ vhodnější pro pokrytí zakřivených a nepravidelných tvarů (kolena, límce, apod.) než například typ SHELL 181. Použití prvku SHELL 281 je dosaženo nastavením možnosti „Element Order“ na typ „Quadratic“. Uvedený typ prvku je zobrazen na obrázku 20 na další stránce. [16]



Obr. 20: Prvek typu SHELL 281 [16]

4.4.1 Okrajové podmínky

Při použití skořepinového modelu, který je pouze povrchový je potřeba v prostředí pro tvorbu analýz přiřadit jednotlivým střednicovým plochám modelu odpovídající tloušťku stěny a navolit odpovídající okrajové podmínky. V případě stavu SUS je nastaven vnitřní tlak, teplota a působení gravitace, pro stav OPE je navíc nastaveno teplotní zatížení.

Dále je nutné zohlednit ve skořepinovém modelu izolaci potrubního systému a tíhu procesního média. Přiřazená tloušťka stěny na střednicové ploše modelu zahrnuje pouze samotný materiál potrubí, a proto je hustota materiálu potrubí přepočítána, tak aby zahrnovala i hustotu samotné izolace a procesního média. Tento zjednodušený předpoklad byl použit z důvodu velice nízké hodnoty hustoty procesního média, a tedy vliv tíhy média je zanedbatelný vůči hustotě materiálu potrubí. Zohlednění tíhy izolace potrubí je možné například vytvořením další vrstvy přiřazené střednicové ploše použitím funkce „Layered section“ v prostředí analýzy, kde je daným vrstvám nastavena příslušná hustota. V tomto případě by jedna vrstva zastupovala materiál potrubí a další vrstva materiál izolace, vrstvy by se vzájemně propojily a chovaly se jako jeden celek. Tento postup by však poskytl nežádoucí zvýšení tuhosti celé konstrukce. Proto zohlednění izolace v celkové hustotě potrubního materiálu je vhodnější, nedojde při něm ke zvýšení tuhosti konstrukce a zároveň přispěje k reálnější analýze.

Vyjádření jednotlivých hustot vzhledem k celkové hustotě je proveden pomocí rovnice (4.23), jednotlivé hustoty jsou vztaheny na plochu, kterou daný materiál zaujímá. V případě procesního média je uvažováno se zaplněním celého průtočného průřezu. Z rovnice (4.23) je následně vyjádřena celková přepočítaná hustota dle rovnice (4.24).

$$(S_1 \cdot \rho_{izolace}) + (S_2 \cdot \rho_{ocel}) + (S_3 \cdot \rho_{směs}) = S_2 \cdot \rho_{celkem} \quad (4.23)$$

$$\rho_{celkem} = \frac{(S_1 \cdot \rho_{izolace}) + (S_2 \cdot \rho_{ocel}) + (S_3 \cdot \rho_{směs})}{S_2} \quad (4.24)$$

Hodnoty hustot daných materiálů ze vztahů na další stránce (4.25),(4.26) a (4.27) pro dosazení do rovnice (4.24).

$$\rho_{ocel} = 7833,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.25)$$

$$\rho_{izolace} = 120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.26)$$

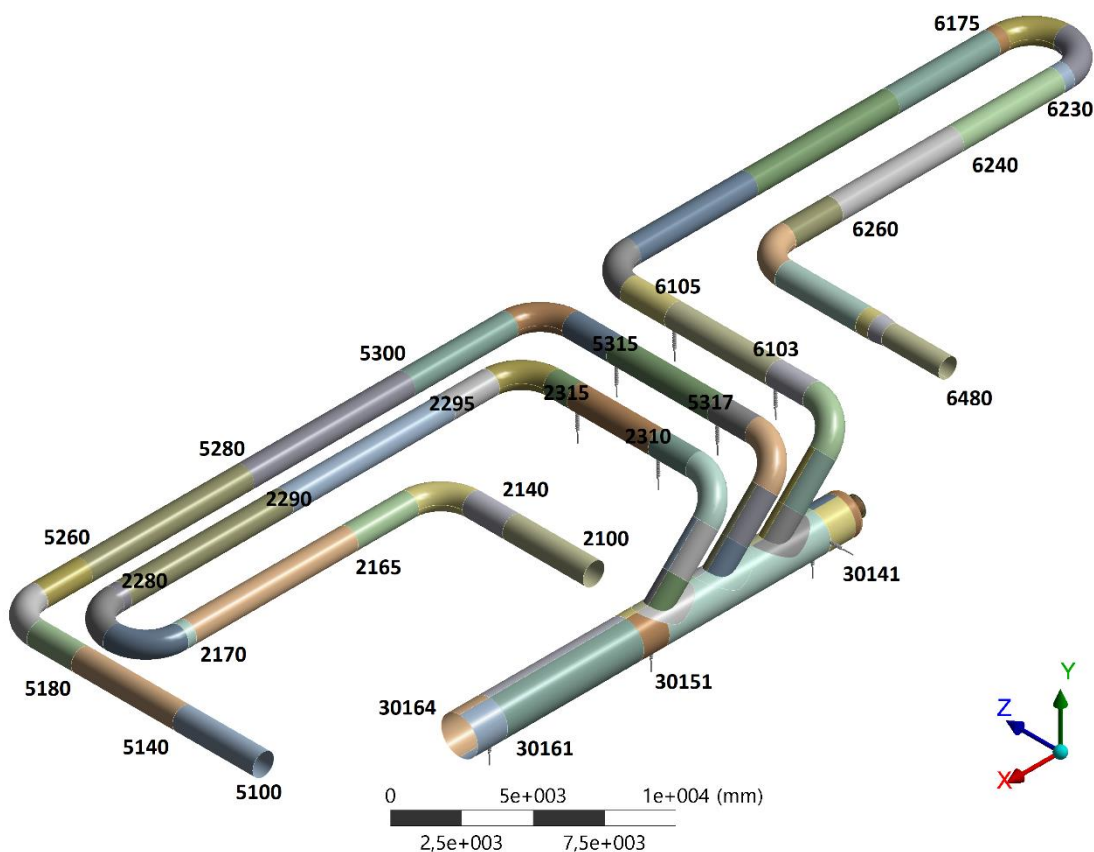
$$\rho_{směs} = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.27)$$

Celkové přepočítané hustoty pro jednotlivé části potrubního systému jsou uvedeny v rovnicích (4.28) a (4.29).

$$\rho_{celkem\ 42''} = 8909,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.28)$$

$$\rho_{celkem\ 72''} = 8539,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.29)$$

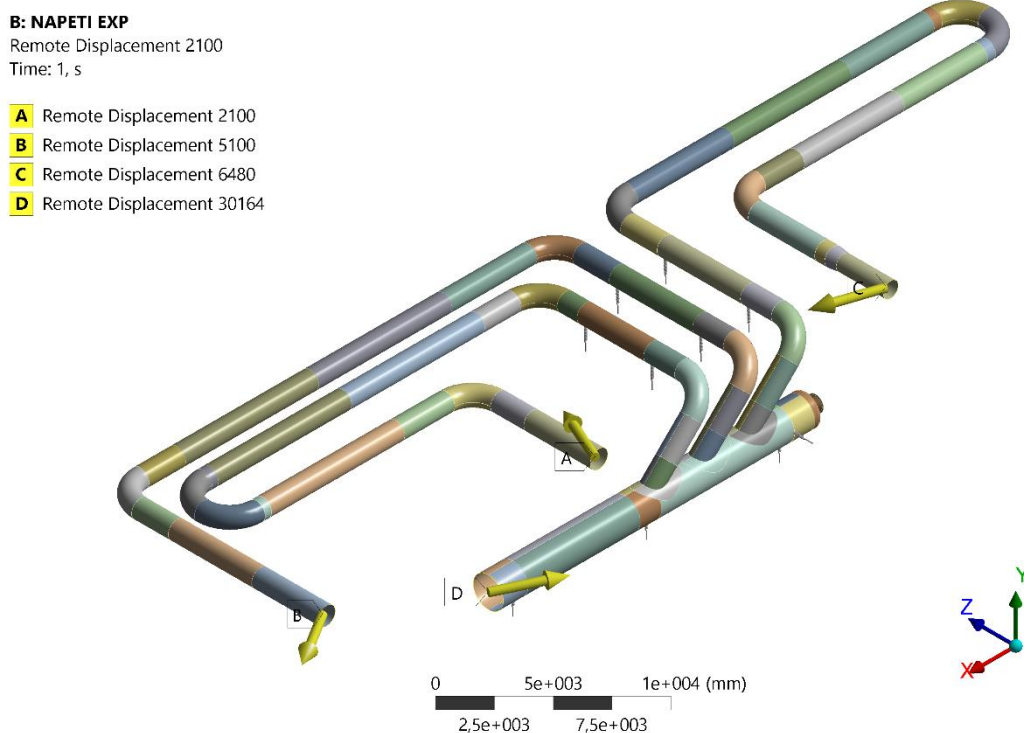
Na obrázku 21 níže je zobrazen celý model vyšetřovaného potrubního systému včetně označení příslušných uzlů pro nastavení vnějšího zatížení a uložení v podporách. Všechna označení uzlů v tabulkách v této kapitole jsou vztažena na uvedená označení vybraných uzlů na obrázku 21.



Obr. 21: Model s vyznačením významných uzlů

Uložení modelu je uvedeno na obrázku 22, kde jsou do vybraných okrajových uzlů aplikovány nezbytné okrajové podmínky posuvů vyvolaných vnějším uložením k příslušným aparátům. V uzlech 2100, 5100 a 6480 jsou to řízené ventily, které oddělují

potrubní systém od spalinového systému pecí a v uzlu 30164 je to uchycení k aparátu mixeru na chladicí olej.



Obr. 22: Okrajové podmínky uložení

Nastavení hodnot posunů a natočení uvedených na předešlém obrázku ve vybraných uzlech pro provozní stav je uvedeno v tabulce 6.

UZEL	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	RX (°)	RY (°)	RZ (°)
2100	-15,38	-0,01	35,16	FREE	FREE	FREE
5100	0,28	-0,01	-0,17	FREE	FREE	FREE
6480	4,73	-0,06	1,65	FREE	FREE	FREE
30164	-54,94	0,96	-27,22	FREE	FREE	FREE

Tab. 6: Okrajové podmínky pro uložení potrubního systému

Dále byl celý model uložen dle navržených potrubních uložení. V případě prostého uložení, které zahrnuje statické potrubní podpěry, byly zamezeny posuvy v daných místech. Pro provozní stav jsou stupně volnosti pro daná místa zobrazeny v tabulce 7.

UZEL	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
2140	FREE	0	FREE
2165	FREE	0	FREE
2170	FREE	0	FREE
2280	FREE	0	0
2290	FREE	0	FREE
2295	FREE	0	FREE
5140	FREE	0	FREE
5180	0	0	FREE
5260	FREE	0	FREE
5280	FREE	0	FREE
5300	FREE	0	FREE
6175	FREE	0	FREE
6230	FREE	0	FREE
6240	FREE	0	FREE
6260	FREE	0	FREE

Tab. 7: Okrajové podmínky pro uložení v podporách potrubního systému

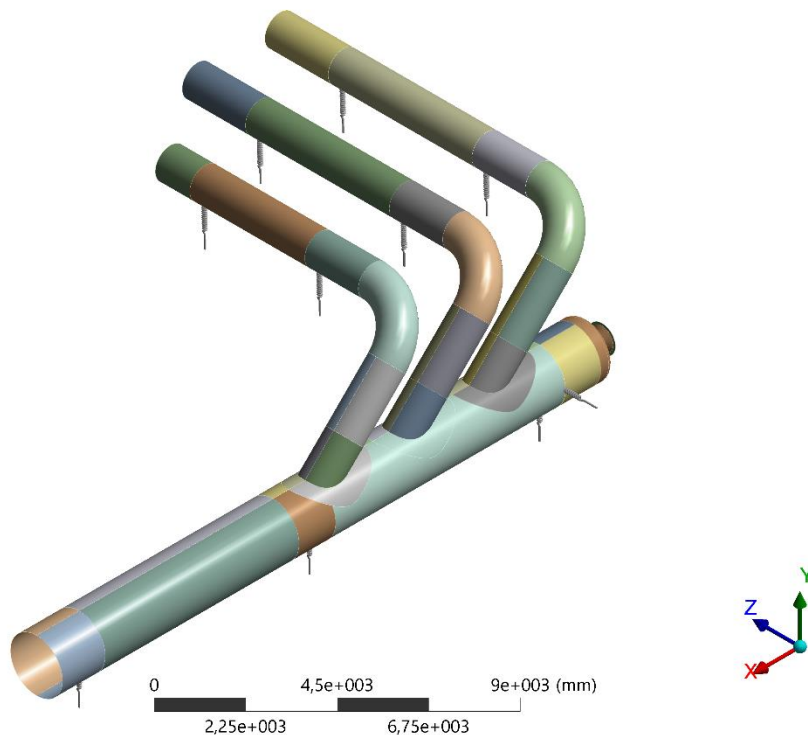
Další typ potrubních podpěr vyskytujících se v potrubním systému je typ pružných podpěr. Jedná se o pružinové závěsy typu CSH (Constant spring hanger), neboli pružinové závěsy s možností nastavení konstantního předpětí. Tyto typy podpěr jsou použity z důvodu pokrytí poměrně velkých teplotních dilatací. Konstrukční řešení je provedeno pomocí pružinových závěsů, které jsou kotveny do ocelové konstrukce, potrubí se tedy může volně pohybovat bez rizika poškození nebo deformace v důsledku zabránění pohybu v určitém směru. Vybrané uzly s tímto typem podpěr a jejich hodnoty předpětí v daném směru jsou uvedeny v tabulce 8.

UZEL	FX (N)	FY (N)	FZ (N)
2310	0	34500	0
2315	0	24500	0
5315	0	38500	0
5317	0	34500	0
6103	0	33900	0
6105	0	32500	0
30141	0	90000	90000
30151	0	65648	0
30161	0	92000	0

Tab. 8: Nastavená předpětí pro pružinová uložení

Nastavení pružných uložení je zrealizováno pomocí kontaktů typu „Longitudinal spring joint“, jedná se o podélný pružinový kontakt, kde je nastavena hodnota předpětí. Typ uložení kontaktů je „Body-Ground“ nímž je zajištěno spojení potrubního systému

s pevným bodem. Tento předpoklad uložení k pevnému bodu vychází z navrhovaného řešení, kde je potrubní systém v těchto místech uložen na ocelovou konstrukci, která díky svým parametrům má mnohem větší tuhost než samotný potrubní systém, a proto je považována za pevný bod. Uvedená uložení jsou zobrazena na obrázku 23.



Obr. 23: Okrajové podmínky pružných uložení

Další okrajovou podmínkou je nastavení působení tíhového zrychlení, kde byla použita výchozí hodnota „Standard Earth Gravity“ ($g_n = 9,8066 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), jež je označována jako normálová hodnota tíhového zrychlení [17] a je nastavena v záporném směru osy y.

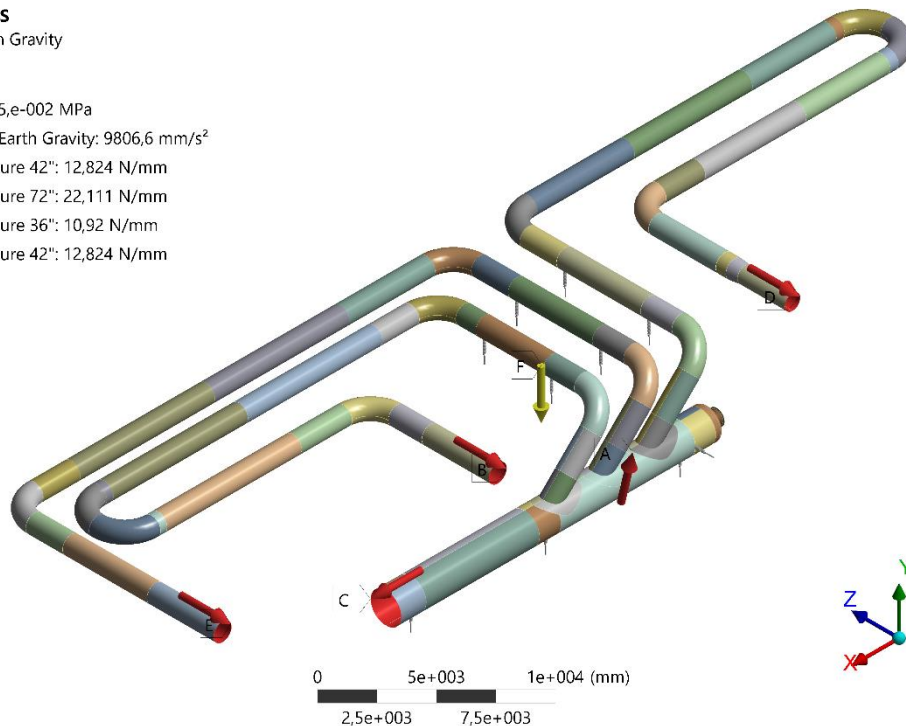
Nastavení tlaku působícího v potrubí je na všechny vnitřní plochy potrubního systému a je ve směru normály působící do stěny potrubí. Na volné konce potrubí je aplikováno liniové zatížení po obvodu trubky, aby nahradilo působící podélné vnitřní síly vzniklé od vnitřního tlaku působícího v uzavřeném potrubním systému. Okrajové podmínky od vnějších trvalých zatížení jsou zobrazeny na obrázku 24 na další stránce.

C: NAPETI SUS

Standard Earth Gravity

Time: 1, s

- A** Pressure: 5,e-002 MPa
- F** Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²
- B** Line Pressure 42": 12,824 N/mm
- C** Line Pressure 72": 22,111 N/mm
- D** Line Pressure 36": 10,92 N/mm
- E** Line Pressure 42": 12,824 N/mm



Obr. 24: Okrajové podmínky od vnějších trvalých zatížení

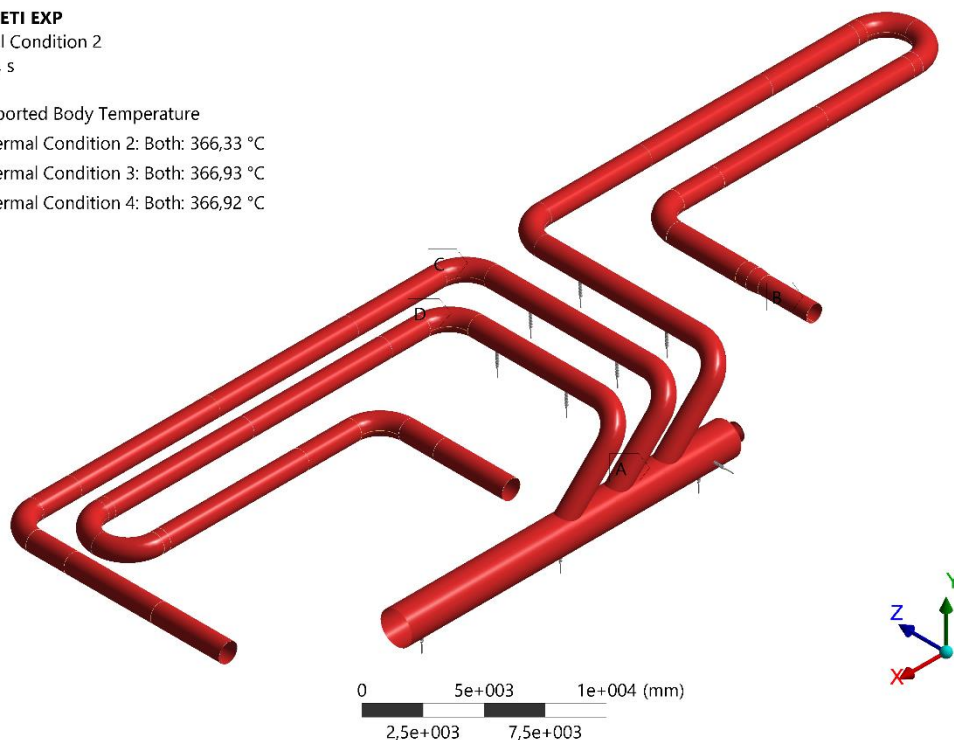
Nastavení teplotní okrajové podmínky pro vyšetřovaný stav 1, kde v místě napojení je teplotní pole importováno z modelu teplotní analýzy a navazujícím potrubním větvím je nastavena teplota, která je stejná s koncovou teplotou importované části, jak je uvedeno na obrázku 25.

B: NAPETI EXP

Thermal Condition 2

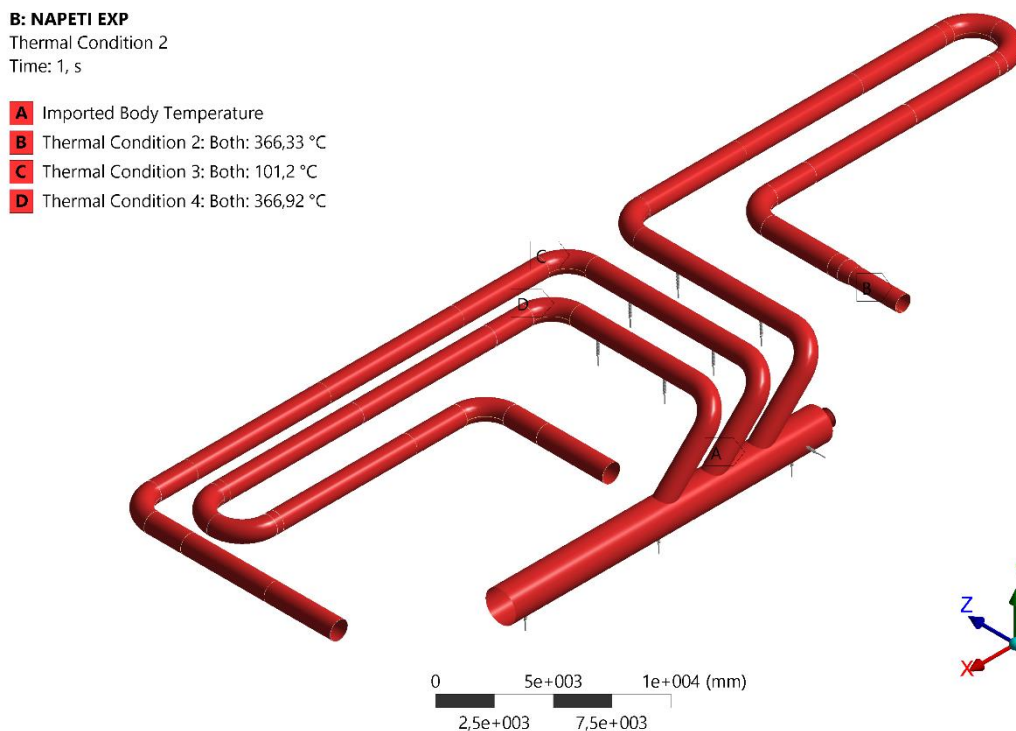
Time: 1, s

- A** Imported Body Temperature
- B** Thermal Condition 2: Both: 366,33 °C
- C** Thermal Condition 3: Both: 366,93 °C
- D** Thermal Condition 4: Both: 366,92 °C



Obr. 25: Teplotní okrajové podmínky pro stav 1

Na dalším obrázku 26 je vidět nastavení okrajových teplotních podmínek pro stav 2, kdy prostřední potrubní větev má nižší teplotu než ostatní, které mají shodnout teplotní okrajovou podmínku jako v předchozím případě pro stav 1.



Obr. 26: Teplotní okrajové podmínky pro stav 2

4.4.2 Kategorie napětí

Z důvodu vyhodnocení napětově-deformační analýzy je nutné zavést vhodné rozdělení působícího napětí, kterého je využito v následujících kapitolách. Toto rozdělení je provedeno dle normy [3] a dalších příslušných zdrojů [18, 19] a je využito zejména pro vyhodnocení s využitím klasifikace napětí dle normy [3], ale také pro označení napětí při vyhodnocení dle normy [2]. Jednotlivé kategorie napětí jsou seskupeny obecných typů napětí, která jsou definována typem zatížení (například tahové, ohybové nebo podélné napětí) a charakterem odezvy na daný typ zatížení především v plastické oblasti. Základní kategorie napětí jsou následující.

- **Primární napětí**
 - primární membránové napětí (označení P_m)
 - primární ohybové napětí (označení P_b)
 - primární lokální napětí (označení P_L)
- **Sekundární napětí**
 - sekundární membránové napětí (označení Q_m)
 - sekundární ohybové napětí (označení Q_b)
- **Špičkové napětí**

Dále jsou v této kapitole jednotlivé kategorie napětí blíže popsány, včetně míst, kde se typicky vyskytují.

Primární napětí

Primárním napětím je označováno jakékoliv normálové nebo smykové napětí vyvinuté od zatížení vzniklé uložením a je nezbytné k zachování rovnováhy z hlediska vnějších a vnitřních sil a momentů [3]. Tato kategorie napětí působí napříč celým průřezem skořepiny. Vzniká působením mechanického zatížení a je nejnebezpečnější ze všech typů napětí. Primární napětí je obvykle způsobeno vnitřním, popřípadě vnějším tlakem nebo je vyvoláno trvalými vnějšími silami a momenty jako je například zatížení od vlastní tíhy materiálu potrubí, izolace a procesního média. Základní charakteristikou primárního napětí je, že v případě zvýšení vnějšího zatížení není samo-omezující ani nedochází k redistribuci napětí, které by byla prospěšná pro konstrukci. V případě překročení mez kluzu materiálu, může dojít k poruše. Napětí vzniklé teplotní roztažností není nikdy klasifikováno jako primární napětí.

Primární membránové napětí (P_m)

Typicky se vyskytuje v pláštích a rovných úsecích potrubních systémů. Pro hodnocení má největší význam a tvoří samotnou kategorii pro konečné vyhodnocení. Hodnota dovoleného namáhání pro tuto kategorii je nejnižší, a tedy i nejpřísnější ze všech stanovených kategorií. Příklady oblastí výskytu primárního membránového napětí:

- obvodové a podélné napětí způsobené tlakem
- podélné napětí způsobené ohýbáním horizontálně uložené nádoby v místě mezi uloženími
- membránové napětí ve středu plochého hrdla
- membránové napětí ve stěně výztužného límce způsobené tlakem nebo vnějšími zatíženími

Nevyskytuje se v místech nespojitostí, jako napojení pláště a dna aparátu, popřípadě v napojení hrdel, dále v místech uložení a spojení s nosnou konstrukcí.

Primární ohybové napětí (P_b)

Primární ohybové napětí je způsobeno trvalými zatíženími a má významný vliv na poškození součástí. Tvoří taktéž samostatnou kategorii pro hodnocení. Existuje poměrně málo oblastí, kde dochází k výskytu primárního ohybového napětí:

- napětí ve středu plochého dna, obvodu kulového dna nebo v napojení kuželového dna
- napětí v místech napojení blízko rozmístěných otvorů

Lokální primární membránové napětí (P_L)

Lokální primární napětí je produkováno samotným konstrukčním tlakem nebo místním mechanickým zatížením, jedná se o působení membránového napětí v lokálních diskontinuitách. Dle normy [3] jsou přesně specifikovány rozměry a umístění, která rozhodují o tom, zda je daná diskontinuita považována za lokální. Důvodem této samostatné kategorie napětí je, že lokální primární napětí má některé samo-omezující vlastnosti podobně jako sekundární napětí, a to v případě, že v místech výskytu,

kde je dosaženo meze kluzu dojde k redistribuci zatížení do tužších částí konstrukce. Tato schopnost přerozdělení napětí poskytuje pozitivní bezpečnostní efekt a dovoluje v oblastech výskytu vyšší přípustné napětí. Příklady primárních lokálních membránových napětí jsou:

- napětí v místních nespojitostech, jako jsou například místa se sníženou tloušťkou stěny pláště nebo spojení pláště a kulového nebo kuželového dna, napojení hrdel na plášť, výztužné (vakuové) prstence aj.
- napětí z místních trvalých zatížení, především různé druhy uložení (objímky, podpěry, nosníky, atd.)

Sekundární napětí

Základní charakteristikou sekundárního napětí je to, že má samo-omezující vlastnosti. Jak již bylo zmíněno výše, díky redistribuci napětí může lokální plastická deformace přizpůsobit konstrukci pro vyšší odolnost proti působícímu zatížení. Sekundární napětí vzniká při mechanickém zamezení deformací, především vlivem působení tepelného zatížení. Tepelné zatížení nebude způsobovat defekty v podobně prasknutí tvárných materiálů. Může však dojít k defektu vlivem působení nadměrných deformací nebo únavovým poškozením. Sekundární napětí je také vytvářeno trvalými zatíženími v místech uložení daného systému. V případě sekundárního napětí je přibližná oblast výskytu omezena maximální vzdáleností od diskontinuity l_m podle vztahu (4.30).

$$l_m = \sqrt{R_{tr} \cdot t} \quad (4.30)$$

Kde R_{tr} (mm) je poloměr trubky a t (mm) je tloušťka stěny trubky. Například pro válcovou skořepinu namáhanou tlakovým zatížením a oblast diskontinuity napojení dna, v plášti v místě napojení působí sekundární napětí do vzdálenosti uvedené ve vztahu (4.30) od této diskontinuity. Od stanovené vzdálenosti dále v místě pláště je již působící napětí označováno za primární. Rozdělení sekundárních napětí je následující:

Sekundární membránové napětí (Q_m)

- napětí od tepelného zatížení
- membránové napětí v oblasti napojení dna a napětí způsobené místními zatíženími

Sekundární ohybové napětí (Q_b)

- napětí působící ve strukturální diskontinuitě – napojení hrdel, montážních násad, atd.
- napětí působící v místě výztužného límce nebo obruče

Špičkové napětí (F)

Špičková napětí jsou přídavná napětí způsobená koncentrací napětí v lokálních oblastech diskontinuit. V kombinaci s primárním nebo sekundárním napětím přítomným v místě diskontinuity tvoří celkové napětí. Působením špičkového napětí nevznikají žádné významné deformace, může však způsobit vznik únavové trhliny nebo křehkého lomu. Špičková napětí mají vliv pouze v případě vyhodnocování únavy daného materiálu, protože jsou zdrojem únavových trhlin nebo v případě použití velice křehkého materiálu. Příklady výskytu špičkových napětí jsou uvedeny na další stránce.

- napětí na rohu nebo hraně v místě nespojitosti
- napětí ve stěně způsobené tepelným namáháním s náhlou změnou povrchové teploty
- napětí ve stěně způsobené tepelným namáháním v oblasti svaru

4.4.3 Vyhodnocení pevnostní analýzy dle ASME B31.3

Pro vyhodnocení dle normy ASME B31.3 [2], se jednotlivé provozní zatěžovací stavy potrubních systémů dělí do tří základních skupin podle charakteru zatěžování.

Stav SUS

- jedná se o stav, kdy je uvažováno pouze trvalé zatížení od působícího provozního tlaku, zatížení vyvolávané vlastní hmotností potrubí včetně procesního média a izolace a také od zatížení, které může vzniknout od potrubního uložení, teplota při tomto stavu je brána jako teplota okolí (20 °C), příslušná napětí se řadí do skupiny primárních napětí
- někdy se tento stav nazývá jako montážní

Stav OPE

- jedná se o provozní stav, kdy je uvažováno se stejnými zatíženími jako v předchozím stavu SUS, s tím rozdílem, že se navíc uvažuje i zatížení provozní teplotou, které je odlišné od teploty okolí
- obecně v tomto stavu působí primární i sekundární napětí
- těchto stavů bývá zpravidla nejvíce (několik desítek), z důvodu pokrytí, co nejvíce možných stavů, které mohou za provozu nastat

Stav EXP

- jedná se pouze o fiktivní stav, který slouží pro hodnocení flexibility potrubních systémů a vyhodnocení působení sekundárního napětí
- je určen „rozdílem“ stavu OPE a stavu SUS, napětí získané z tohoto stavu je porovnáváno se stanovenou hodnotou dovoleného rozkmitu napětí

Dle normy [1] jsou stanoveny hodnoty dovoleného napětí, které nesmí být překročeno napětím působícím v potrubí při jednotlivých zatěžovacích stavech. Hodnotu dovoleného napětí od trvalých zatížení pro stav SUS je stanovena dle vztahu (4.3) v kapitole 4.2.2 Stanovení dovoleného namáhání na základě materiálové charakteristiky závislé na provozní teplotě a je označena jako S_d .

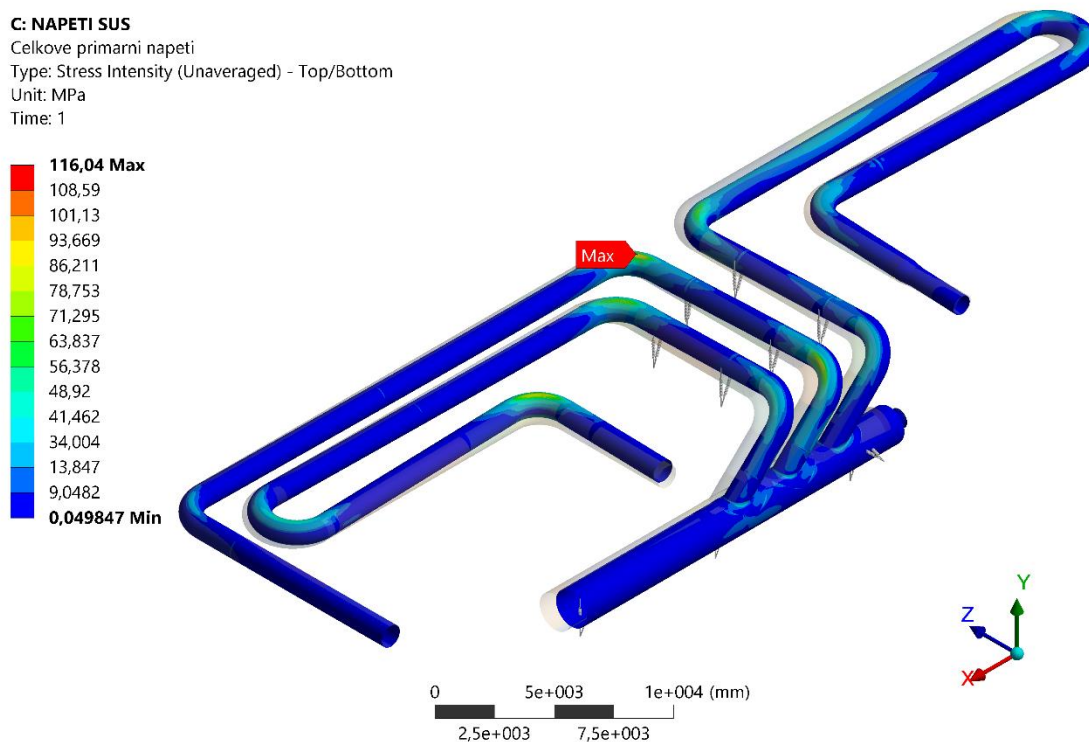
Hodnota dovoleného rozkmitu napětí je stanovena vztahem (4.7) v kapitole 4.2.2 Stanovení dovoleného namáhání a označena S_a . Rozkmit napětí je stanoven rozdílem napětí ve vyšetřovaných provozních stavech OPE a montážním stavu SUS. Jedná se o vyhodnocení působících napětí vzniklých převážně teplotní roztažností ve stavu OPE a jejich vlivu na celý potrubní systém.

Ve vyšetřovaných stavech OPE a SUS je daný potrubní systém dále zatížen stanovenými okrajovými podmínkami a jsou provedeny napěťově-deformační analýzy v daných stavech. Pro vykreslení průběhu působících napětí v jednotlivých stavech je v programu Ansys Mechanical využita funkce „Stress intensity“. Tato funkce slouží k vykreslení

průběhu redukovaného napětí (σ_{SINT}) podle Trescovy hypotézy maximálních smykových napětí, které lze určit na základě hlavních napětí podle rovnice (4.31). Z tenzoru napětí jsou určena hlavní napětí σ_1 až σ_3 z nichž je dále vybrána maximální hodnota rozdílu, které určuje velikost redukovaného napětí v daném místě. Dle nejvyšší hodnoty redukovaného napětí jsou dané stavy vyhodnoceny. [16]

$$\sigma_{SINT} = \max\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|\} \quad (4.31)$$

Na obrázku 27 je zobrazen průběh napětí působící ve stavu SUS, tedy napětí vzniklé pouze trvalými zatíženími. Průběh napětí je pro stav 1 i stav 2 shodný.



Obr. 27: Vyhodnocení průběhu napětí (SUS, zvětšení deformace 12x)

V případě obrázků v této kapitole je zde zobrazen i charakter deformace. Stínovaný model představuje původní nedeformovaný model a barevné vyobrazení průběhů napětí zobrazuje model s 12krát zvětšenou deformací.

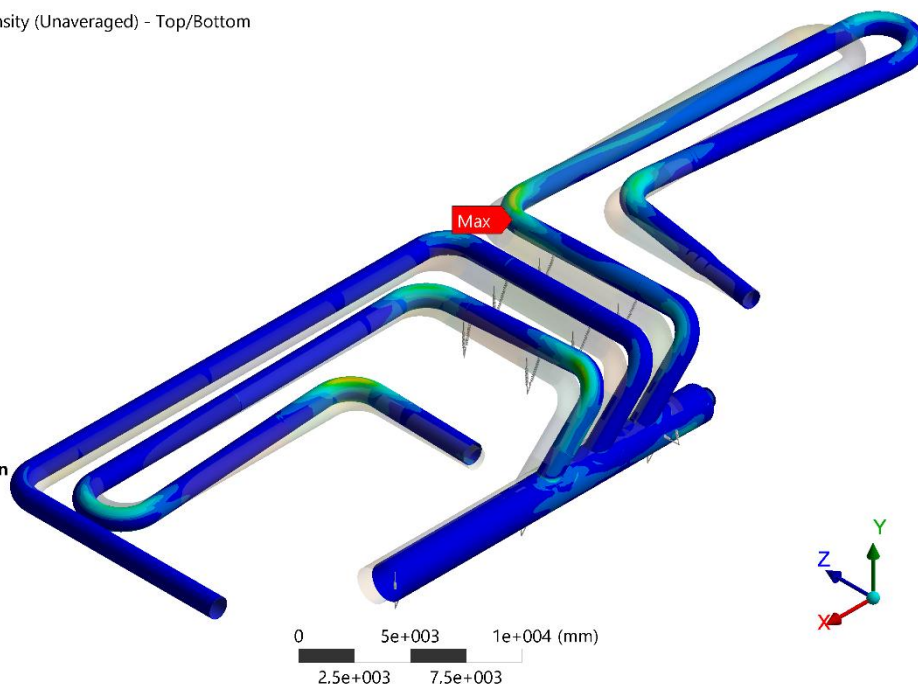
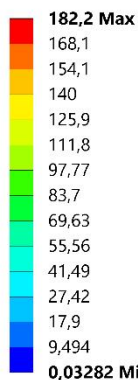
C: NAPETI OPE

Celkove napeti

Type: Stress Intensity (Unaveraged) - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1



Obr. 28: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 1 (OPE, zvětšení deformace 12x)

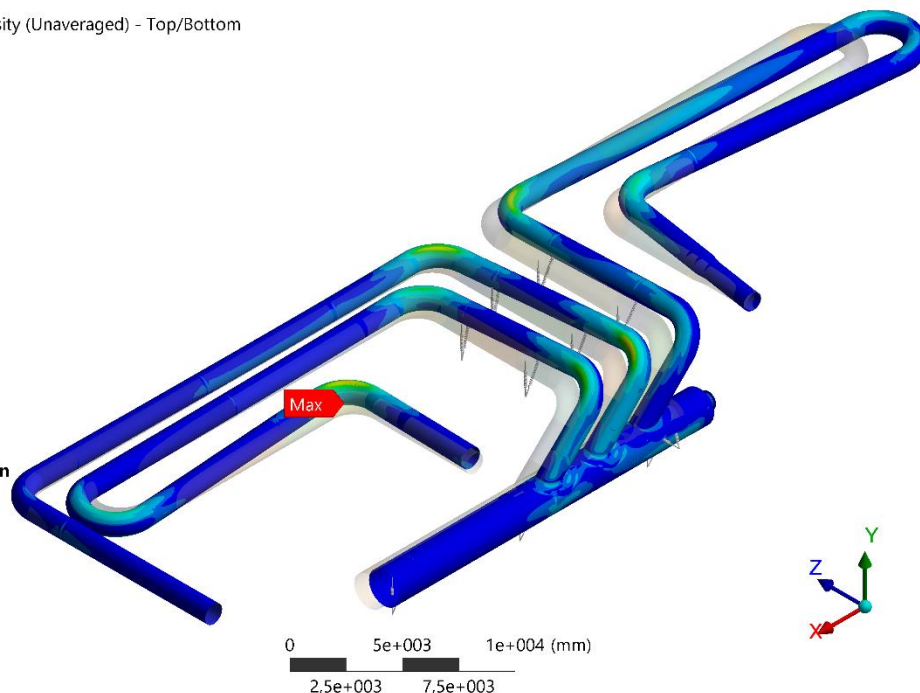
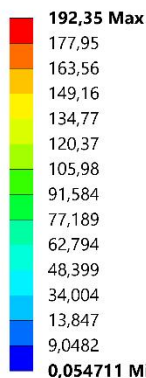
D: NAPETI OPE

Celkove napeti

Type: Stress Intensity (Unaveraged) - Top/Bottom

Unit: MPa

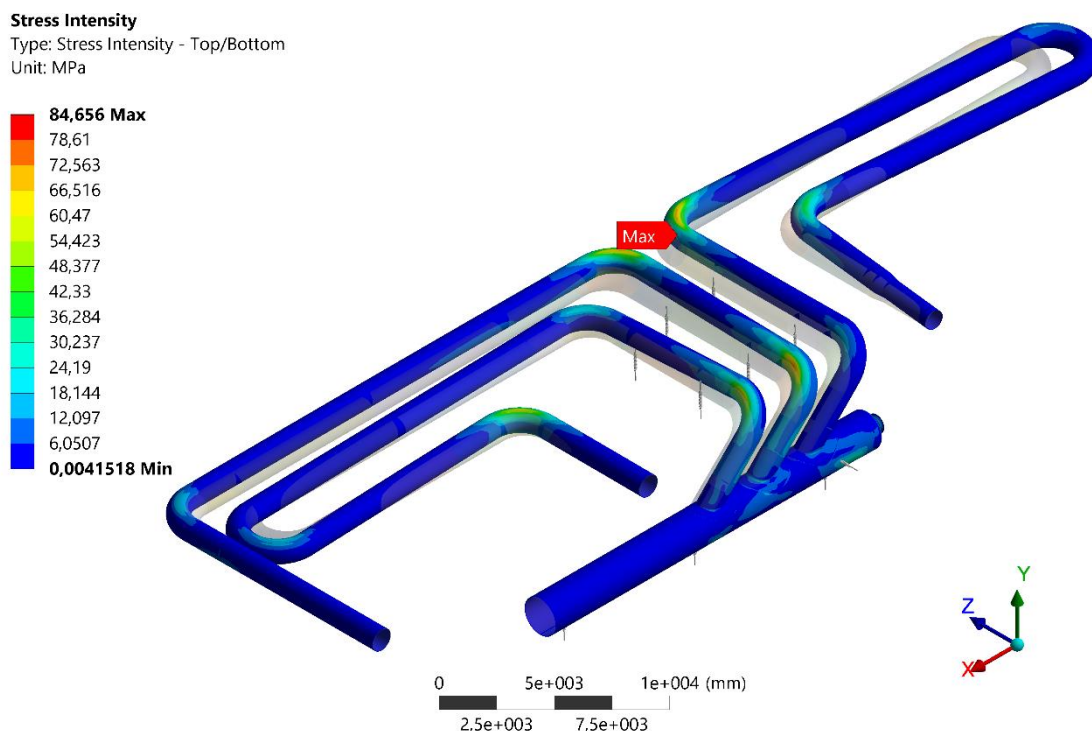
Time: 1



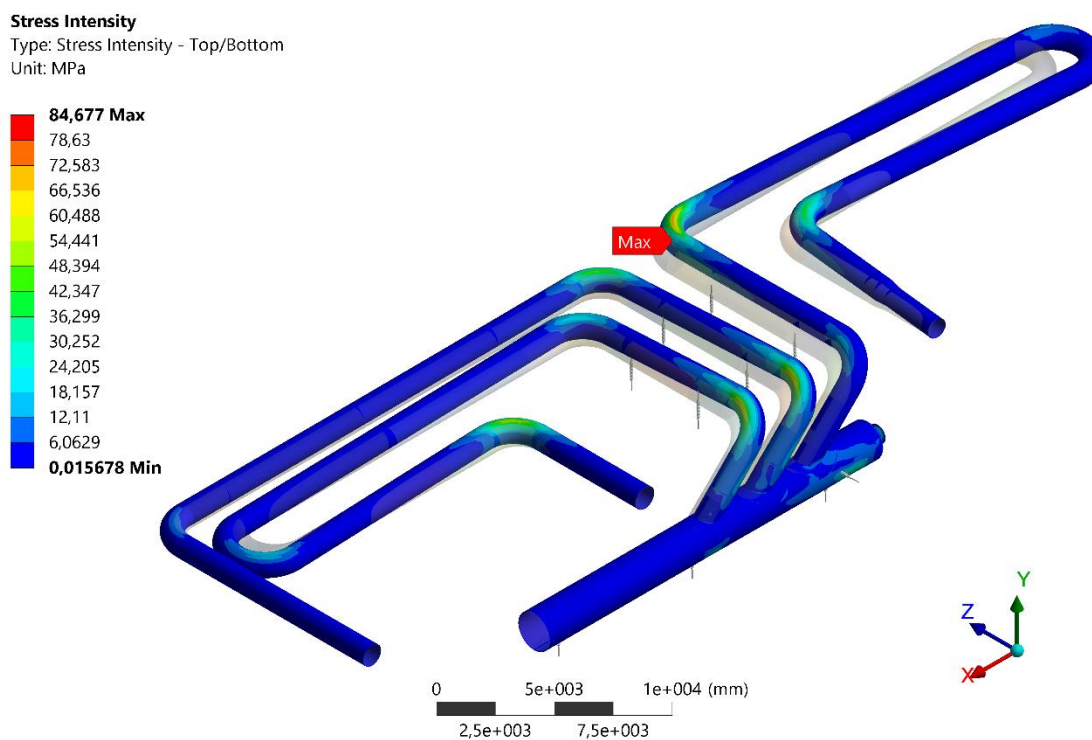
Obr. 29: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 2 (OPE, zvětšení deformace 12x)

Dále je využito funkce „Solution combination“ v programu Ansys Mechanical, která umožňuje kombinovat výsledky analýz jednotlivých stavů. S využitím této funkce je možné stanovit rozdíl výsledného redukovaného napětí mezi stavy OPE a SUS.

Výsledný rozdíl je stanoven rozdílem tenzorů napětí v daném místě v obou stavech a následné vykreslení redukovaného napětí. Výsledné průběhy napětí ve stavu EXP, který je hodnocen dle dovoleného rozkmitu napětí jsou uvedeny na obrázcích 30 a 31.



Obr. 30: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 1 (EXP, zvětšení deformace 12x)



Obr. 31: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 2 (EXP, zvětšení deformace 12x)

K samotnému vyhodnocení působícího napětí ve vyšetřovaných stavech je uvedeno porovnání výsledků jednotlivých stavů a dovolených hodnot. Vyhodnocení stavu SUS je uvedeno ve vztahu (4.32).

$$116,04 \text{ MPa} < 122 \text{ MPa} \quad (4.32)$$

Výsledná hodnota působícího napětí je nižší než dovolená hodnota, z toho plyne, že vyšetřovaný stav SUS vyhovuje.

Dalšími vyšetřovanými stavy jsou stav 1 a stav 2 a jejich rozdíl vůči stavu SUS, kde se dovolené namáhání bere jako rozkmit napětí. Pro stav 1 uvedeno ve vztahu (4.33) a pro stav 2 uvedeno ve vztahu (4.34).

$$84,66 \text{ MPa} < 203 \text{ MPa} \quad (4.33)$$

$$84,68 \text{ MPa} < 203 \text{ MPa} \quad (4.34)$$

Oba vyšetřované stavy pro rozkmit napětí vyhovují. Celý potrubní systém pro vybrané stavy vyhovuje dle normy [2].

4.4.4 Vyhodnocení pevnostní analýzy pomocí kategorizace napětí

Další možností vyhodnocení napětí v zadaném potrubním systému je použití tzv. kategorizace napětí, která je uvedena v normě [3]. Kategorizace napětí slouží k základnímu rozdělení napjatosti působící v součásti na základě vhodně zvolených kombinací zátěžných stavů a následnému vyhodnocení celkové napjatosti dané součásti. Vychází, z jednoduché, ale konzervativní hypotézy s uvažováním ideálně pružně-plastického materiálu a teorie tenkostěnných skořepin, tj. pouze membránová a ohybová napjatost lineárně rozložená po průřezu. [18, 19]

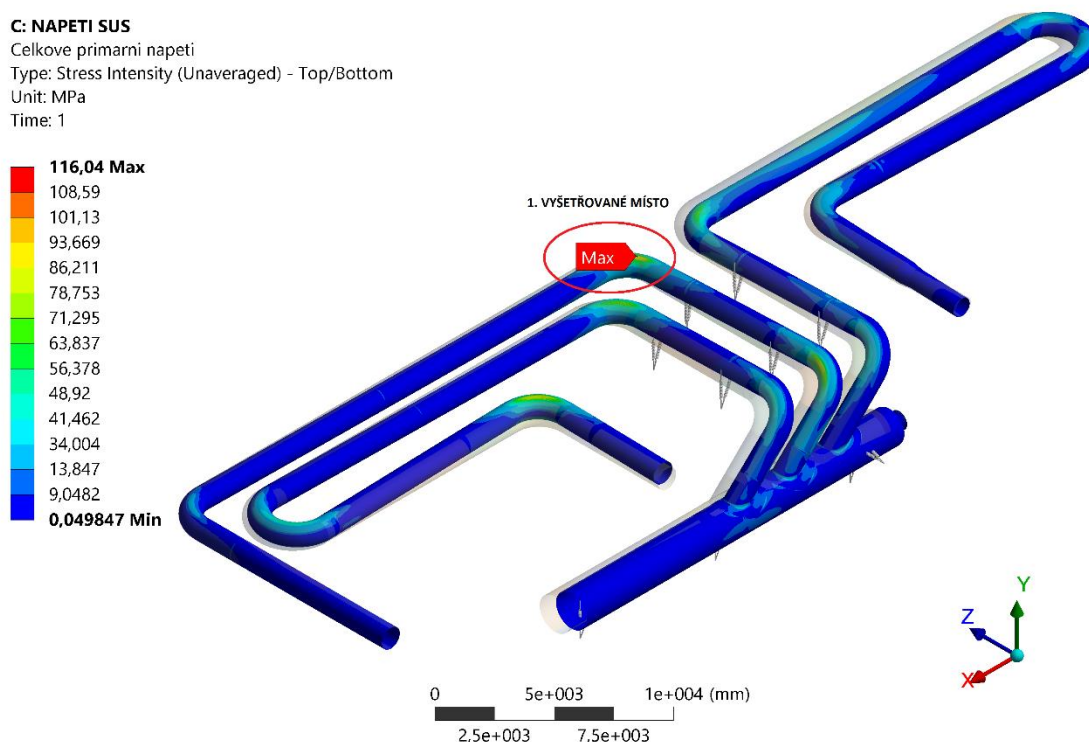
Stanovení tloušťky stěny skořepiny na základě působícího vnitřního nebo vnějšího tlaku nemusí být dostatečná k pokrytí všech kombinovaných účinků ostatních zatížení. Na základě kategorizace jsou jednotlivá napětí, která jsou přítomna v součástech například tlakových nádob rozdělena do různých kategorií v závislosti na typech zatížení, které je vyvolávají, také na místech jejich výskytu, a na nebezpečí, které představují pro součást. Zmíněné kategorie napětí jsou uvedeny v kapitole 4.4.2 Kategorie napětí. Každá samostatná kategorie nebo skupina kategorií napětí musí být udržována na přijatelné úrovni, aby nedocházelo k poruše součásti. [3, 18, 19]

Dle normy [3] je provedeno vyhodnocení napětí ve vybraných místech potrubního systému. Pomocí linearizace napětí po tloušťce stěny a dále vyhodnocení dle stanovených kategorií napětí a hodnot dovolených namáhání. Veškeré výsledné průběhy napětí jsou získány z napěťově-deformačních analýz z předchozí kapitoly. V tabulce 9 na další stránce jsou uvedeny vybrané kategorie napětí a příslušné hodnoty dovoleného namáhání. Hodnoty z pevnostní analýzy budou v další kapitole vyhodnoceny na základě této metody.

Kritérium	Označení	Dovolená hodnota (MPa)	
Primární membránové	P_m	S_d	122
Primární ohybové	P_b	$1,5 \cdot S_d$	183
Celkové primární	$(P_m \text{ nebo } P_L) + P_b$	$1,5 \cdot S_d$	183
Sekundární membránové	Q_m	$1,5 \cdot S_d$	183
Sekundární ohybové	Q_b	$3 \cdot S_d$	366
Celkové primární + sekundární	$P + Q$	$3 \cdot S_d$	366

Tab. 9: Dovolené hodnoty pro kategorizaci napětí

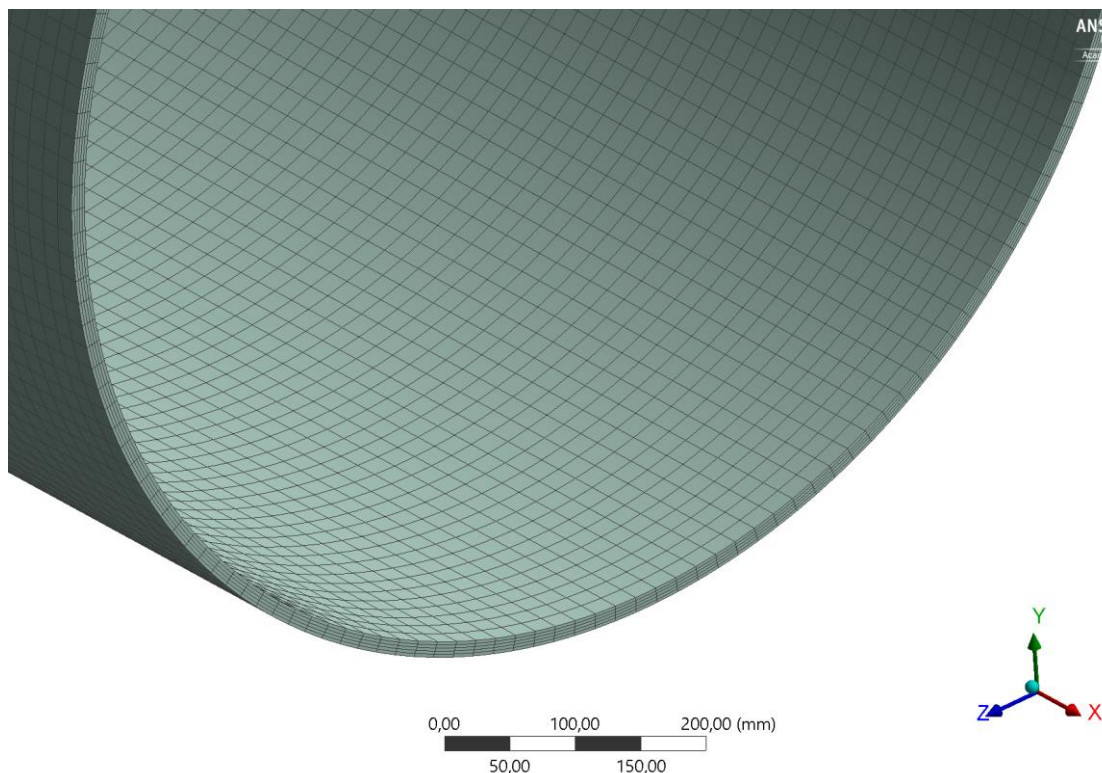
Pro hodnocení primárního napětí je použit stav SUS a vybrána oblast s nejvyšší hodnotou napětí a označena jako první vyšetřované místo. Oblast s nejvyšší hodnotou napětí je zobrazena na obrázku 32 na další stránce a průběh napětí je získán z předchozí napěťově-deformační analýzy z programu Ansys Mechanical.



Obr. 32: Vyšetřované místo pro vyhodnocení napětí (zvětšení deformace 12x)

Pro zjištění průběhů napětí pomocí kategorizace je využit tzv. „Submodeling“, v tomto případě formou nahrazení vyšetřované části původního skořepinového modelu potrubního systému modelem objemovým. Tento postup slouží ke zpřesnění stávajících výsledků analýz na skořepinových modelech. Objemový model musí být umístěn na shodném místě, jako je požadovaná část modelu skořepinového, aby bylo zajištěno přenesení specifických okrajových podmínek. Mezi přenesené okrajové podmínky patří teplotní zatížení a posuvy v daném řezu napojení skořepinového a objemového modelu. Další okrajové podmínky jako je působící provozní tlak jsou nastaveny na objemový

model samostatně. Následuje vytvořená výpočtová síť jako v případě napětově-deformační analýzy, jelikož se zde jedná o objemový model, je po tloušťce stěny nastaveno 5 prvků. Ukázka detailu výpočtové sítě kolena v řezu je na obrázku 33.

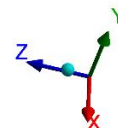
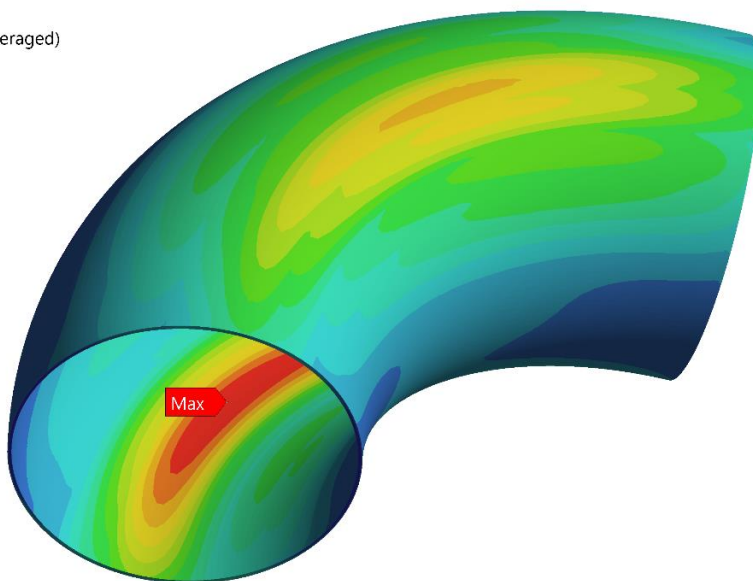
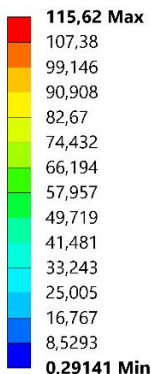


Obr. 33: Detail výpočtové sítě v řezu kolena

Na zatížené části potrubního systému okrajovými podmínkami je provedena napětově-deformační analýza. Pro vyhodnocení napětí použitím kategorizace dle normy [3] je v objemové části modelu veden řez tzv. „SCL“ (Stress Classification Line) napříč tloušťkou stěny v místě nejvyšší hodnoty napětí. Pro podrobnější popsání působícího napětí ve vybraných kritických úsecích je možné vést více řezů v daném místě. Poté je po délce daného řezu provedena linearizace napětí, která umožňuje získat lineární průběhy složek působícího napětí. Vykreslení celkového napětí a maximální hodnoty napětí v součásti je zobrazena na obrázku 34 na další stránce.

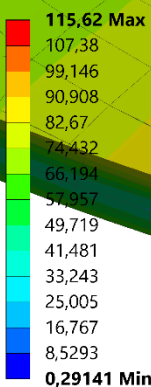
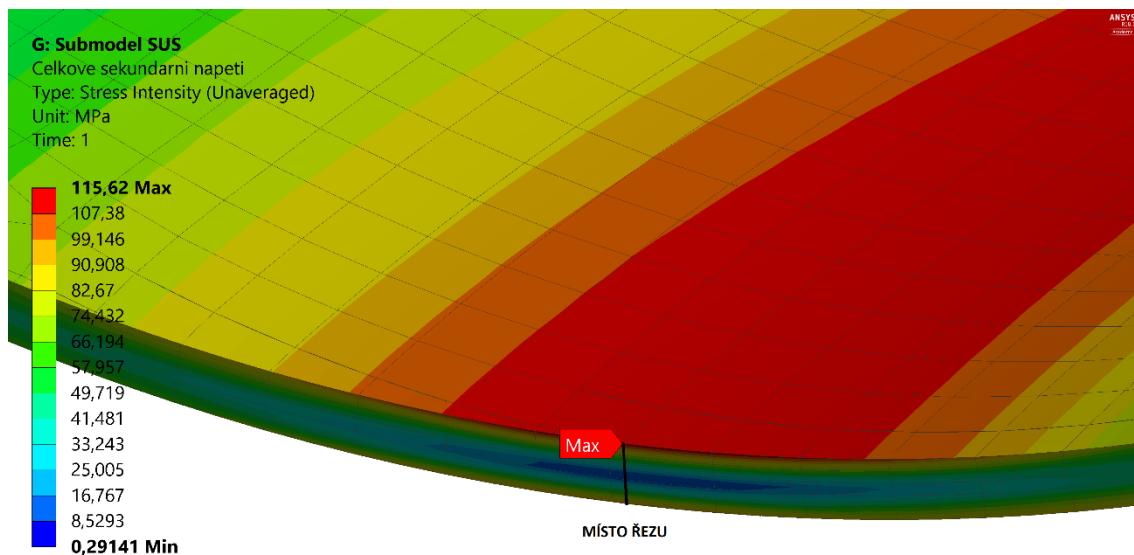
G: Submodel SUS

Celkove sekundarni napeti
 Type: Stress Intensity (Unaveraged)
 Unit: MPa
 Time: 1

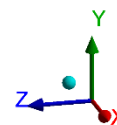
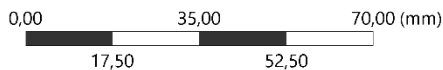


Obr. 34: Průběh napětí na objemovém modelu kolena v 1. vyšetřovaném místě

Řez napříč tloušťkou stěny je zobrazen na obrázku 35. Tento řez je vytvořen pomocí funkce „Path“ v prostředí analýzy, jedná se o spojnici dvou zvolených bodů, jako body jsou vybrány krajní uzly jednotlivých prvků výpočetní sítě.

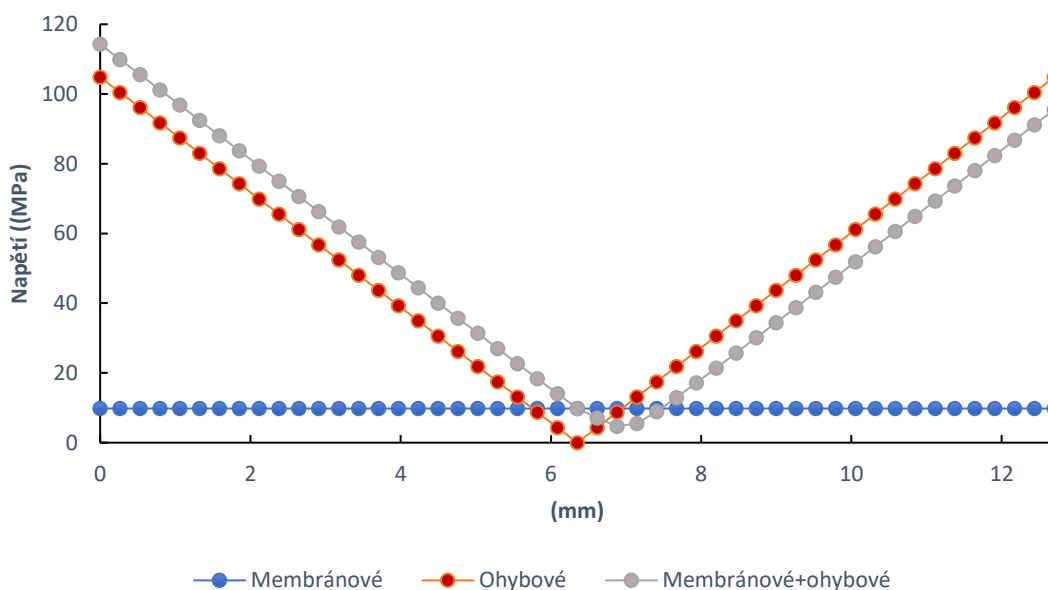


MÍSTO ŘEZU



Obr. 35: Místo řezu pro linearizaci napětí po tloušťce stěny v 1. vyšetřovaném místě

Díky linearizaci napětí po tloušťce stěny kolena je možné provést vyhodnocení kritického místa. Na obrázku 36 jsou uvedeny průběhy jednotlivých kategorií napětí v závislosti na tloušťce stěny a jejich maximální hodnoty.



Obr. 36: Graf průběhu jednotlivých kategorií napětí v 1. vyšetřovaném místě

Maximální hodnoty jednotlivých kategorií z předchozího grafu jsou dále porovnány s dovolenými hodnotami napětí stanovenými normou [3] a uvedeny v tabulce 10 níže.

Kritérium	Označení	Dovolená hodnota	Vypočtená hodnota
Primární membránové	P_m	122 MPa	9,79 MPa
Primární ohybové	P_b	183 MPa	104,86 MPa
Celkové primární	$P_L + P_b$	183 MPa	114,3 MPa

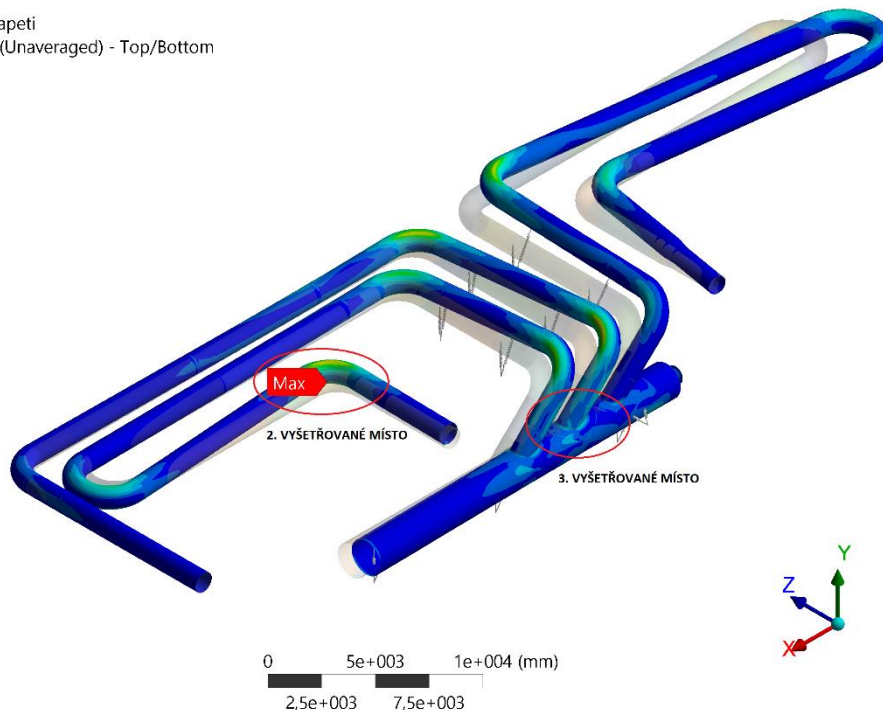
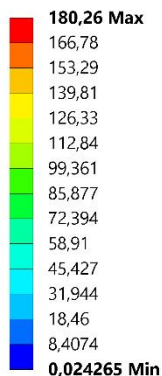
Tab. 10: Vyhodnocení působícího primárního napětí v 1. vyšetřovaném místě

Hodnoty stanovení analýzou jsou nižší než dovolené hodnoty a dle kategorizace potrubní systém ve stavu SUS vyhovuje.

Pro vyhodnocení působícího sekundárního napětí byl využit stav, když je potrubní systém zatížen pouze teplotními okrajovými podmínkami a uložen. Vyšetřované oblasti v tomto stavu jsou uvedeny v obrázku 37 na další straně. Druhé vyšetřované místo je s nejvyšší hodnotou působícího napětí v celém systému a třetí místo je v napojení prostřední potrubní větve, kde se vyskytuje nejvyšší napětí, ze všech tří potrubních napojení.

B: NAPETI EXP

Celkove sekundarni napeti
 Type: Stress Intensity (Unaveraged) - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1

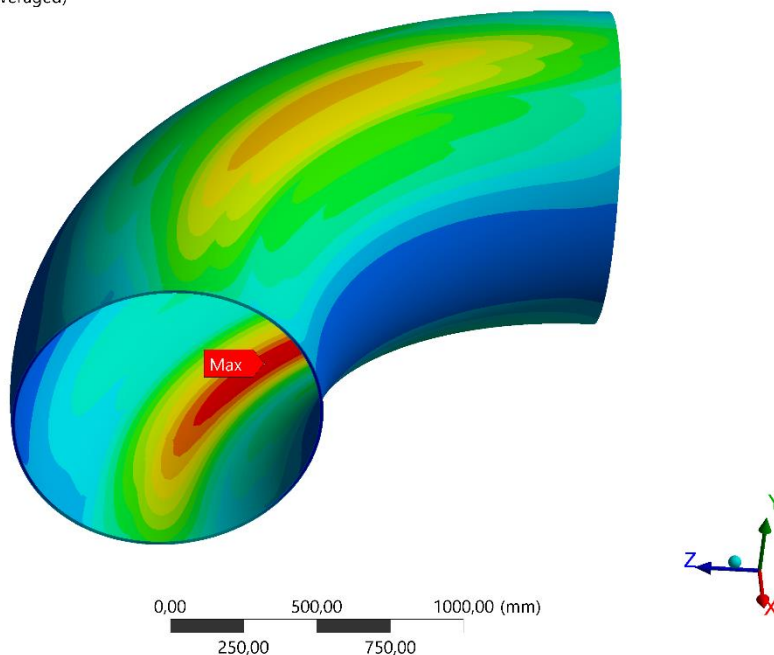
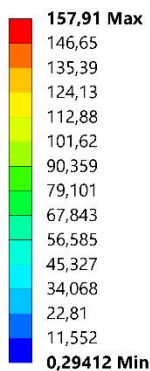


Obr. 37: Vyšetřovaná místa pro vyhodnocení působícího sekundárního napětí

Koleno v místě prvního vyšetřovaného místa je obdobně jako u přechozího případu nahrazeno objemovým modelem, na který jsou importovány potřebné okrajové podmínky a vytvořena obdobná výpočtová síť. Místo s nejvyšší hodnotou napětí je zobrazena na obrázku 38.

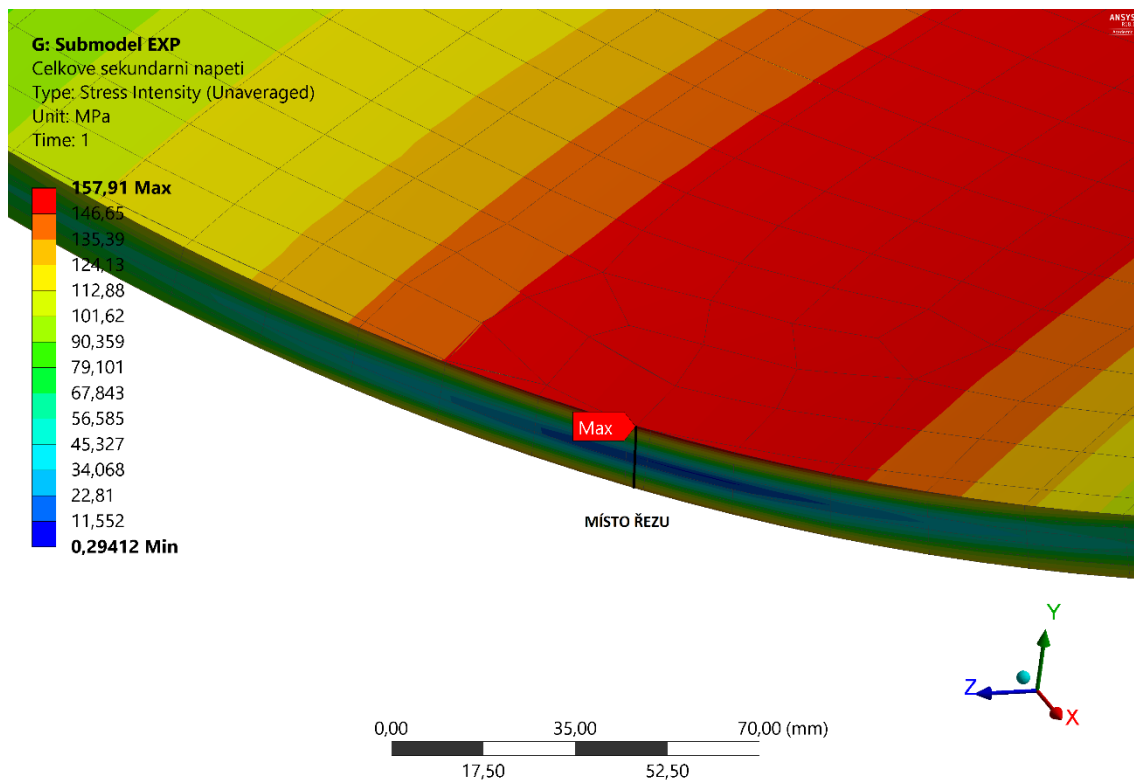
G: Submodel EXP

Celkove sekundarni napeti
 Type: Stress Intensity (Unaveraged)
 Unit: MPa
 Time: 1



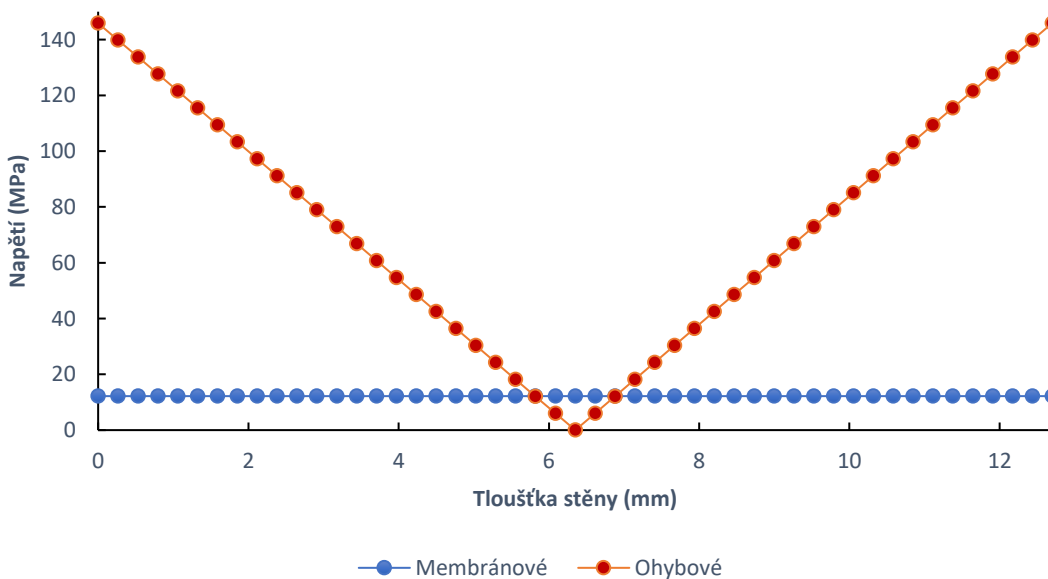
Obr. 38: Průběh napětí na objemovém modelu kolena ve 2. vyšetřovaném místě

Na obrázku 39 je uveden detail řezu, který je proveden pro linearizaci napětí výše zmíněným způsobem.



Obr. 39: Místo řezu pro linearizaci napětí po tloušťce stěny v 2. vyšetřovaném místě

Následuje obdobný postup při stanovení průběhů jednotlivých kategorií napětí a jejich vykreslení do grafu. Graf závislosti je uveden na obrázku 40.



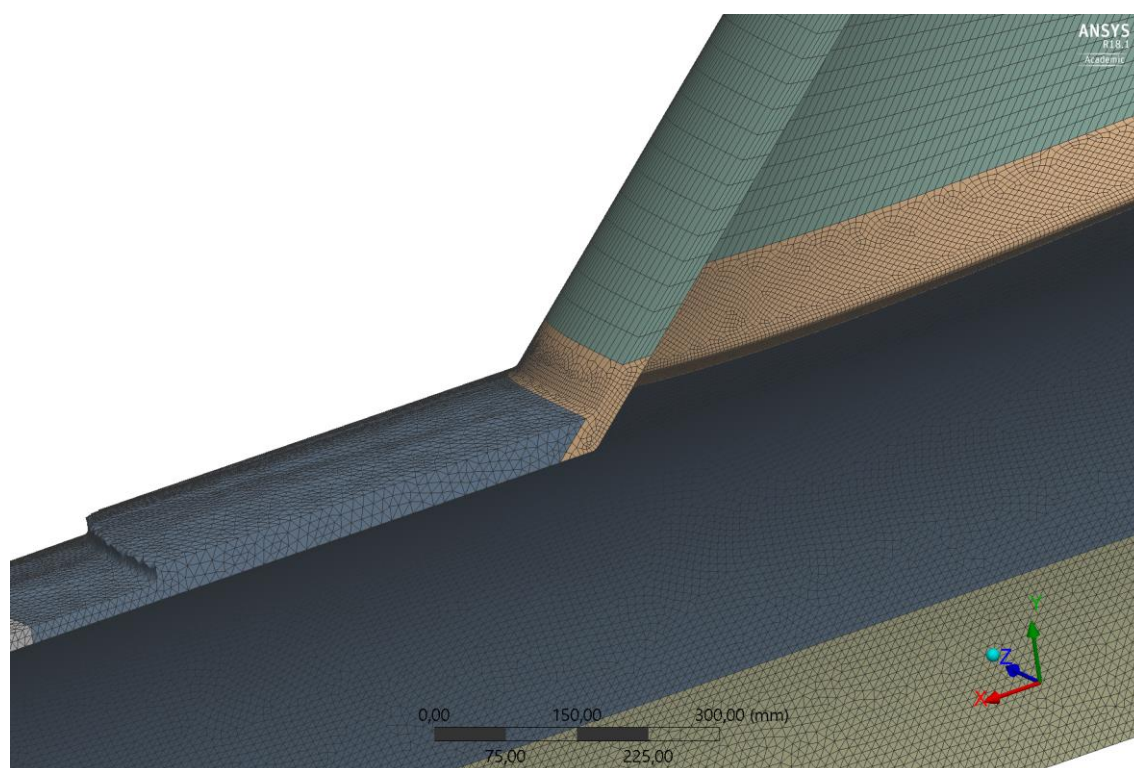
Obr. 40: Graf průběhu jednotlivých kategorií napětí ve 2. vyšetřovaném místě

Obdobně jsou maximální hodnoty pro každou kategorii porovnány s dovolenými hodnotami a uvedeny v tabulce 11.

Kritérium	Označení	Dovolená hodnota	Vypočtená hodnota
Sekundární membránové	Q_m	183 MPa	12,18 MPa
Sekundární ohybové	Q_b	366 MPa	145,87 MPa

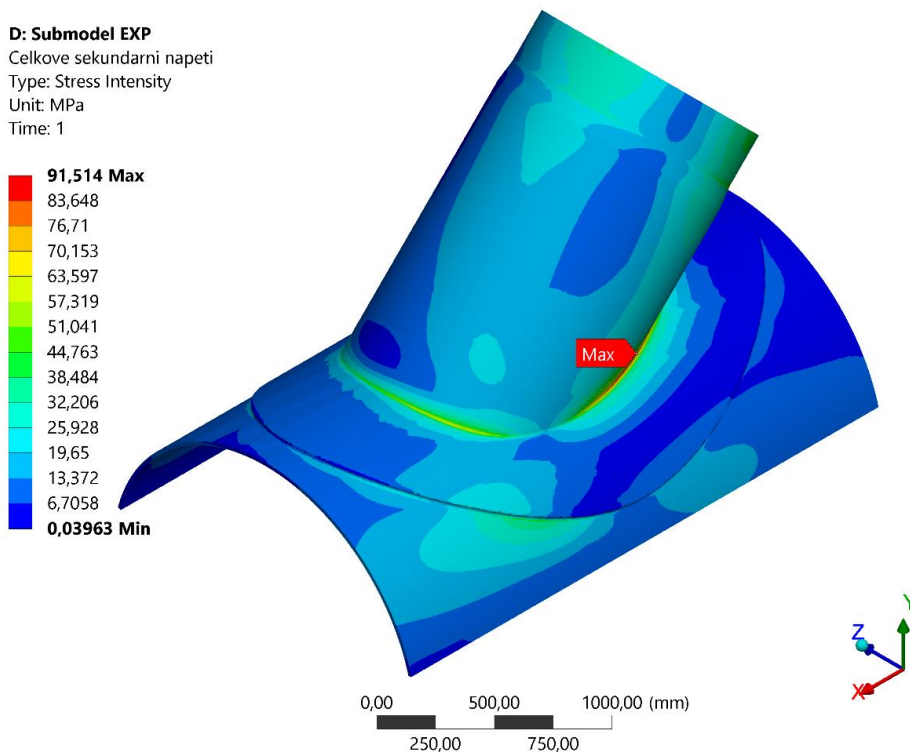
Tab. 11: Vyhodnocení působícího napětí ve 2. vyšetřovaném místě

Následuje vyšetření třetího vyšetřovaného místa, které se nachází v místě napojení prostřední potrubní větve. Vzhledem k objemovému modelu je opět ve výpočetní síti po tloušťce stěny trubky nastaveno pět prvků a v případě stěny napojení spolu s výztužným límcem je síť záměrně více zjemněna. Detail výpočetní sítě v řezu třetího vyšetřovaného místa je uvedeno na obrázku 41.



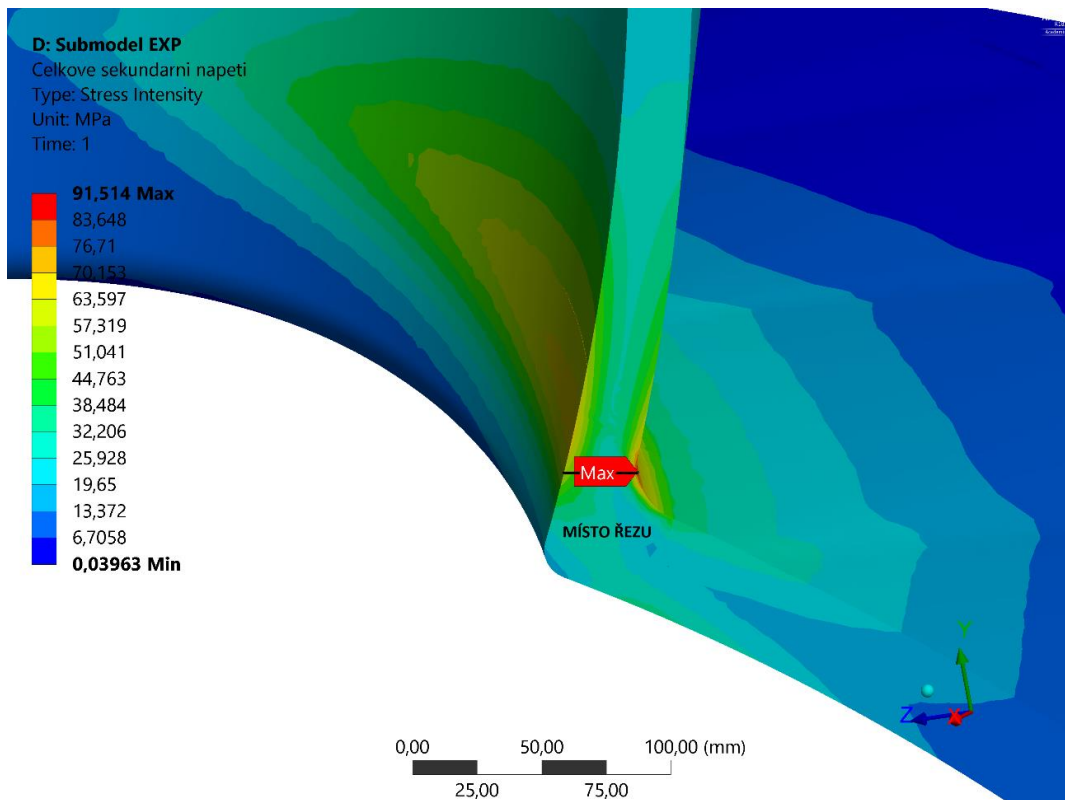
Obr. 41: Detail výpočtové sítě v řezu napojení

Výsledné rozložení působícího napětí v místě napojení je uvedeno na obrázku 42 na další stránce.



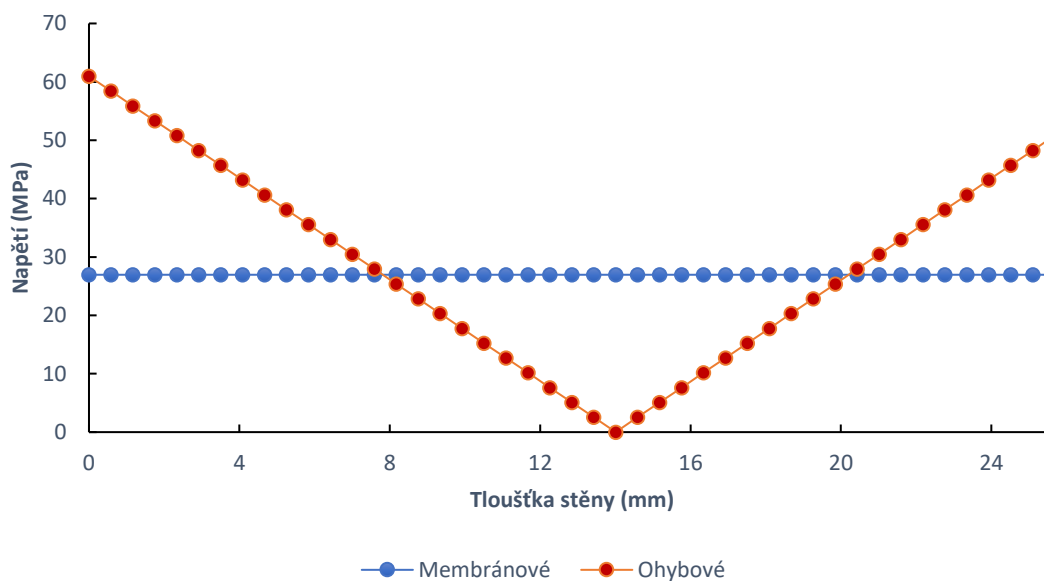
Obr. 42: Průběh napětí na objemovém modelu napojení ve 3. vyšetřovaném místě

Následuje provedení řezu pro potřebu linearizaci napětí po tloušťce stěny. Místo řezu je uvedeno na obrázku 43.



Obr. 43: Místo řezu pro linearizaci napětí po tloušťce stěny ve 3. vyšetřovaném místě

Průběhy jednotlivých kategorií napětí po tloušťce stěny jsou vyneseny do grafu na obrázku 44.



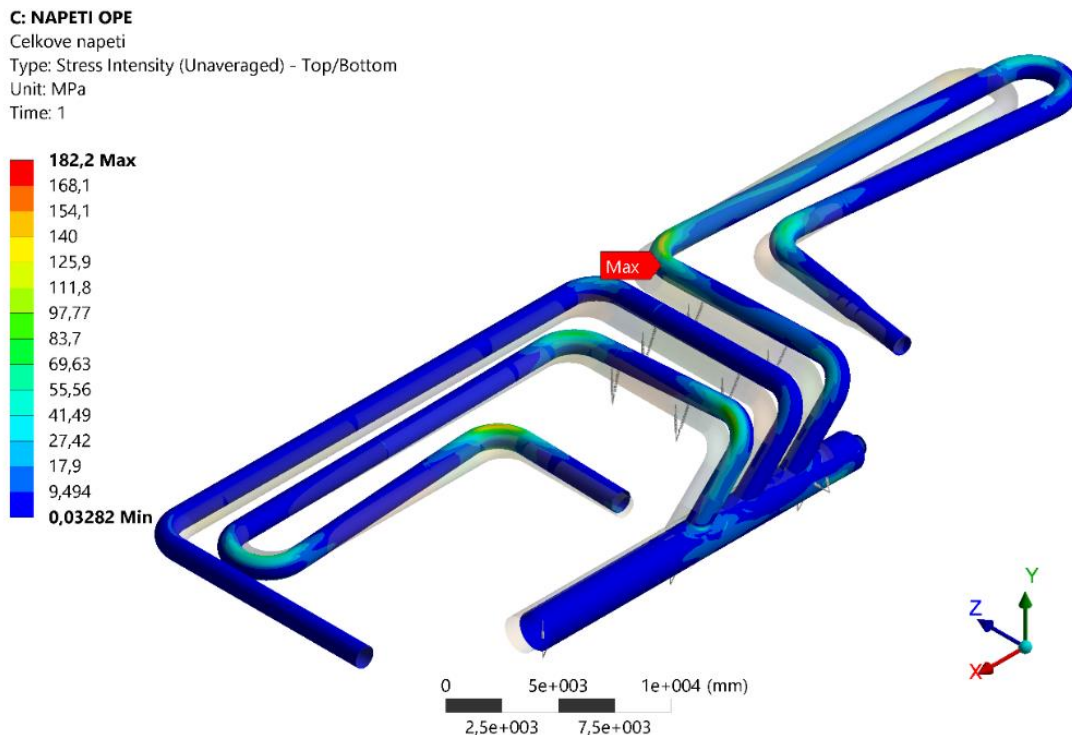
Obr. 44: Graf průběhu jednotlivých kategorií napětí ve 3. vyšetřovaném místě

Vyhodnocením předchozího grafu jsou stanoveny maximální hodnoty pro jednotlivé kategorie napětí a porovnány s dovolenými hodnotami, jak je uvedeno v tabulce 12.

Kritérium	Označení	Dovolená hodnota	Vypočtená hodnota
Sekundární membránové	Q_m	183 MPa	26,46 MPa
Sekundární ohybové	Q_b	366 MPa	60,96 MPa

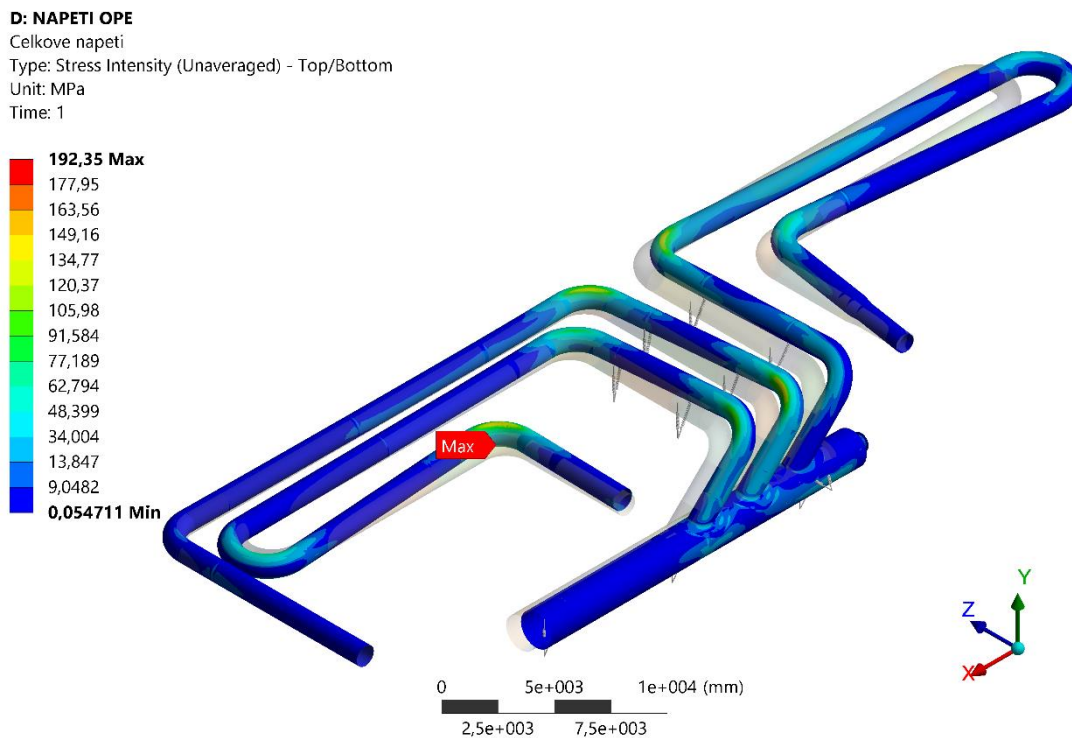
Tab. 12: Vyhodnocení působícího napětí ve 3. vyšetřovaném místě

V poslední části této kapitoly jsou vyhodnoceny stavy 1 a 2 za provozních podmínek označeny jako OPE. Průběh napětí ve stavu 1 je zobrazen na obrázku 45.



Obr. 45: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 1 (OPE, deformace zvětšení 12x)

Na dalším obrázku 46 je zobrazen průběh napětí pro stav 2.



Obr. 46: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 2 (OPE, zvětšení deformace 12x)

Vyhodnocení je uvedeno v tabulce 13.

Kritérium	Dovolená hodnota	Vypočtená hodnota
Celkové napětí– stav 1	366 MPa	182,2 MPa
Celkové napětí– stav 2	366 MPa	192,4 MPa

Tab. 13: Vyhodnocení působícího napětí v provozních stavech

V této kapitole bylo představeno použití kategorizace pro vyhodnocení působícího napětí ve vybraných kritických místech součástí. V porovnání s hodnocením odolnosti potrubních systémů dle normy [2] je kategorizace komplexnější metoda poskytující přesnější výsledky působících napětí především v místech diskontinuit. Kategorizace je určena pro hodnocení odolnosti komplikovanějších aparátů jako jsou například tlakové nádoby a kotle, které vyžadují podrobnější hodnocení. V případě této práce byla kategorizace využita pro zpřesnění výsledků získaných z předchozích napěťově-deformačních analýz ve vybraných kritických místech.

V případě návrhu potrubních systému v praxi je preferováno hodnocení dle normy [2], které je vhodnější z hlediska postupu uzpůsobeného přímo pro potrubní systémy a dále například z důvodu nižší časové náročnosti.

Pro vyšetření dalších potenciálně kritických stavů by se postupovalo obdobně, jak je naznačeno v této práci s využitím stejných modelů, pouze s využitím jiných okrajových podmínek, které by dané stavy charakterizovaly.

ZÁVĚR

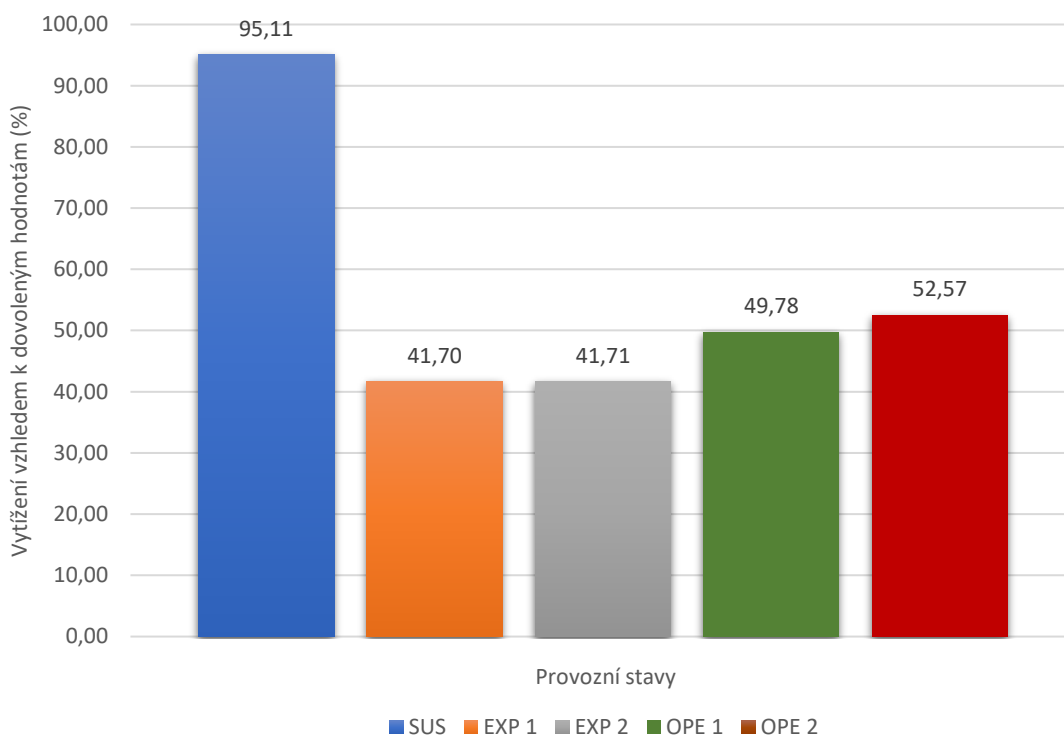
Hlavním cílem této diplomové práce bylo provedení kontrolního pevnostního výpočtu reálného potrubního systému, jehož návrh pro potřeby práce poskytla projekční firma CB&I. Tento potrubní systém je složen ze tří potrubních větví, které mohou být vzhledem k použité technologii provozovány za různých teplot a jsou napojeny do hlavního transferového potrubí. Vzhledem k této skutečnosti bylo očekáváno zvýšené namáhání v důsledku tepelného zatížení v místě napojení potrubních větví.

V úvodu práce byl zpracován přehled technologického procesu petrochemického zařízení, ve kterém se vyšetřovaný potrubní systém nachází a přesnější popis dané technologie a provozních podmínek. Dále byla zpracována teorie týkající se přestupu tepla potřebná pro výpočet okrajových podmínek od tepelného zatížení.

V první části práce bylo zapotřebí stanovit vybrané provozní stavy s ohledem na výrobní podmínky. Pro vybrané stavy byl proveden výpočet součinitelů přestupu tepla pro jednotlivé části systému dle postupu z vypracované teorie. Následovalo zadání teplotních okrajových podmínek v podobně konvekcí aplikovaných na povrchy modelu a provedení teplotních analýz pro jednotlivé stavy s využitím objemového modelu. Vyhodnocením teplotních analýz byly získány rozložení teplotních polí.

V druhé části práce je využit skořepinový model, na který byly vhodně aplikovány všechny potřebné okrajové podmínky jako je například tlakové zatížení, zatížení vlastní tíhou, a především přenesené tepelné zatížení z předchozích teplotních analýz. Pro vybrané vyšetřované stavy byly provedeny napětově-deformační analýzy. Následovalo vyhodnocení potrubního systému pomocí normy ASME B31.3 [2], výsledky z tohoto vyhodnocení poskytly hodnoty působícího napětí, které byly nižší než dovolené hodnoty stanovené normou [2] a potrubní systém byl tedy hodnocen jako vyhovující.

V další části byla použita metoda kategorizace napětí uvedená v normě ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII [3], která navázala na předchozí napětově-deformační analýzy, které poskytly vhodné okrajové podmínky. Pomocí submodelingu vybraných částí potrubního systému byla provedena linearizace napětí po tloušťce stěny a následné vykreslení průběhů jednotlivých napětí. Následně byly maximální hodnoty napětí v daných kategoriích vyhodnoceny vzhledem k dovoleným hodnotám. Všechny hodnoty stanovené analýzami byly nižší než dovolené hodnoty stanovené normou [2]. Na obrázku 47 na další straně je dále vyobrazena závislost vytížení konstrukce potrubního systému vzhledem k jednotlivým kritériím, dle kterých byly hodnoceny vybrané stavy.



Obr. 47: Vytížení potrubního systému vzhledem k dovoleným hodnotám

Všechny provedené analýzy byly tedy úspěšně vyhodnoceny. Avšak původní předpoklad výskytu zvýšeného namáhání vlivem teplotního zatížení v místech napojení jednotlivých potrubních větví nebyl potvrzen. Jak ukazují napětově-deformační analýzy vhodným uložení potrubního systému, především použitím pružinových závěsů, lze vhodně rozložit zatížení do míst s vyšší odolností, a lze tedy předejít možným komplikacím v podobě defektů.

Vzhledem k použitému zjednodušení v podobě aplikování tepelného zatížení pomocí mechanismu konvekce došlo k jistému zkreslení výsledných hodnot. Přesnější výsledky analýz, především reálnější rozložení teplotních polí včetně exponovaných míst by poskytlo využití výpočtové simulace proudění CFD. Využití této metody ve spojení s napětově-deformačními analýzami ostatních potenciálně kritických stavů, by mohlo být předmětem budoucího rozvoje této práce. Jednání s projektanty a výpočtáři během řešení této práce ve firmě CB&I mi byla velmi cennou zkušeností do budoucí praxe.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ANSYS, INC. *ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1*. nedatováno.
- [2] ASME, AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE a AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *Process piping: ASME code for pressure piping B31.3*. 2016. ISBN 978-0-7918-7119-5.
- [3] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL COMMITTEE a SUBCOMMITTEE ON PRESSURE VESSELS. *ASME boiler and pressure vessel code: an international code. Section VIII, Section VIII*. 2015. ISBN 978-0-7918-6995-6.
- [4] *petroleum.cz, Definice a dnešní význam petrochemie* [online]. [vid. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-48.aspx>
- [5] *Story at/of Ethylene Plant – van Adam.Inc* [online]. [vid. 2018-02-04]. Dostupné z: <https://vanadam.wordpress.com/2014/07/25/story-atof-ethylene-plant/>
- [6] *petroleum.cz, Zpracování ropných frakcí na petrochemikálie* [online]. [vid. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-03.aspx>
- [7] *petroleum.cz, Ethylen - Polyethylen a jeho deriváty* [online]. [vid. 2018-01-30]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/ethylen.aspx>
- [8] MENON, E. Shashi. *Transmission pipeline calculations and simulations manual*. Waltham, MA: Elsevier/Gulf Professional, 2015. ISBN 978-1-85617-830-3.
- [9] MIKULA, Julius. *Potrubí a armatury: určeno také jako pomůcka pro studium*. 2., přepracované vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury (SNTL), 1974.
- [10] ŠNITA, Dalimil a VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Chemické inženýrství I*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 978-80-7080-589-3.
- [11] MICHEJEV, Michail Aleksandrovič. *Základy sdílení tepla*. přeložené 2. vydání, svazek 9. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952.
- [12] *Aplikovaná termomechanika, Přednáška 5 - Sdílení tepla v tepelných výměnících* [online]. B.m.: ČVUT. 17. duben 2011. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-05.pdf>
- [13] MÍKA, Vladimír. *Sbírka příkladů z chemického inženýrství: Příručka pro vys. školy chemickotechnologické*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978.
- [14] WILDA, Vladimír. *Projektování průmyslových potrubí a potrubních rozvodů. Řada strojirenské literatury*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury (SNTL), 1968.

- [15] *ProRox PS 960-SA (RockTech SPI 120) | ROCKWOOL Technical Insulation* [online]. [vid. 2018-05-05]. Dostupné z: [http://www.rockwool-rti-asia.com/products+and+applications/u/2011.product/19778/prorox---industrial-insulation/prorox-ps-960-sa-\(rocktech-spi-120\)](http://www.rockwool-rti-asia.com/products+and+applications/u/2011.product/19778/prorox---industrial-insulation/prorox-ps-960-sa-(rocktech-spi-120))
- [16] ANSYS, INC. *ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1, Help System*. USA: Canonsburg, PA, 2018.
- [17] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/60-gravitacni-a-tihova-sila-resp-zrychleni>
- [18] IREMONGER, M. J. *BASIC stress analysis* [online]. 1982 [vid. 2018-05-05]. ISBN 978-1-4831-4063-6. Dostupné z: <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=1829068>
- [19] MOSS, Dennis R. a Michael BASIC. *Pressure vessel design manual*. 4th ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-0-12-387000-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Rozměr	Veličina
Q_V	$(m^3 \cdot s^{-1})$	Objemový průtok
S	(m^2)	Průtočná plocha
w	$(m \cdot s^{-1})$	Střední rychlost proudění
L	(m)	Charakteristický rozměr potrubí (průměr)/ délka potrubí
ν	$(m^2 \cdot s^{-1})$	Kinematická viskozita
a	$(m^2 \cdot s^{-1})$	Součinitel teplotní vodivosti
μ	$(Pa \cdot s)$	Dynamická viskozita
ρ	$(kg \cdot m^{-3})$	Hustota
λ	$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Tepelná vodivost
c_p	$(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
α	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	Součinitel přestupu tepla
μ_k	$(Pa \cdot s)$	Dynamická viskozita v jádře tekutiny
$\mu_{k,s}$	$(Pa \cdot s)$	Dynamická viskozita u stěny potrubí
d	(m)	Průměr potrubí
\dot{Q}	(W)	Tepelný výkon
k	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	Součinitel prostupu tepla
A	(m^2)	Plocha výměny tepla
\dot{m}	$(kg \cdot s^{-1})$	Hmotnostní průtok
ΔT	$(^\circ C)$	Teplotní rozdíl
R_m	(MPa)	Mez pevnosti
R_e	(MPa)	Mez kluzu
S_d	(MPa)	Hodnota dovoleného napětí
S_c	(MPa)	Hodnota dovoleného napětí při minimální provozní teplotě
S_h	(MPa)	Hodnota dovoleného napětí při maximální provozní teplotě
f	$(-)$	Faktor rozkmitu napětí
S_a	(MPa)	Hodnota přípustného rozkmitu napětí
P	(kPa)	Provozní tlak
$D_{42''}$	(mm)	Vnější průměr trubky 42"
$D_{72''}$	(mm)	Vnější průměr trubky 72"
E_k	$(-)$	Faktor kvality
Y	$(-)$	Koeficient svarového spoje
c	(mm)	Korozní přídavek materiálu
tm	(mm)	Minimální tloušťka stěny
t	(mm)	Použitá tloušťka stěny
l_m	(mm)	Vzdálenost od diskontinuity
R_{tr}	(mm)	Poloměr trubky

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

SUS - stav potrubního systému, kdy je uvažováno pouze trvalé zatížení

OPE - provozní stav potrubního systému

EXP - fiktivní stav, který slouží pro hodnocení flexibility potrubních systémů

MKP - metoda konečných prvků

DN - Diameter Nominal (jmenovitá světlost)

NPS - Nominal Pipe Size (normální velikost trubky)

CFD - Computational Fluid Dynamics (výpočetní dynamika tekutin)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Petrochemické zařízení na produkci ethylenu [5]	10
Obr. 2: Schéma výroby petrochemikálií [6]	11
Obr. 3: Schéma procesu	13
Obr. 4: Potrubní systém (obrázek převzat z analýzy firmy CB&I)	14
Obr. 5: Sdílení tepla z jádra tekutiny do stěny tuhého tělesa [12]	17
Obr. 6: Sdílení tepla ze stěny tuhého tělesa do jádra tekutiny [12]	18
Obr. 7: Objemový model	24
Obr. 8: Skořepinový model.....	25
Obr. 9: Detail řezu napojení (rozměry uvedeny v mm).....	30
Obr. 10: Vyšetřovaný provozní stav 1	30
Obr. 11: Vyšetřovaný provozní stav 2	31
Obr. 12: Ukázka výpočtové sítě – detail potrubního napojení	32
Obr. 13: Nastavení hodnot konvekce pro okolní prostředí.....	33
Obr. 14: Nastavené hodnoty konvekce pro stav 1	34
Obr. 15: Nastavené hodnoty konvekce pro stav 2	34
Obr. 16: Detail vybrané části s nastavenými hodnotami konvekce	35
Obr. 17: Rozložení teplotního pole ve stavu 1.....	36
Obr. 18: Rozložení teplotního pole skrze stěnu trubky 72“	36
Obr. 19: Rozložení teplotního pole ve stavu 2.....	37
Obr. 20: Prvek typu SHELL 281 [16].....	38
Obr. 21: Model s vyznačením významných uzlů	39
Obr. 22: Okrajové podmínky uložení	40
Obr. 23: Okrajové podmínky pružných uložení	42
Obr. 24: Okrajové podmínky od vnějších trvalých zatížení	43
Obr. 25: Teplotní okrajové podmínky pro stav 1.....	43
Obr. 26: Teplotní okrajové podmínky pro stav 2.....	44
Obr. 27: Vyhodnocení průběhu napětí (SUS, zvětšení deformace 12x).....	48
Obr. 28: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 1 (OPE, zvětšení deformace 12x)	49
Obr. 29: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 2 (OPE, zvětšení deformace 12x)	49
Obr. 30: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 1 (EXP, zvětšení deformace 12x)	50
Obr. 31: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 2 (EXP, zvětšení deformace 12x)	50
Obr. 32: Vyšetřované místo pro vyhodnocení napětí (zvětšení deformace 12x).....	52
Obr. 33: Detail výpočtové sítě v řezu kolena.....	53
Obr. 34: Průběh napětí na objemovém modelu kolena v 1. vyšetřovaném místě.....	54
Obr. 35: Místo řezu pro linearizaci napětí po tloušťce stěny v 1. vyšetřovaném místě..	54
Obr. 36: Graf průběhu jednotlivých kategorií napětí v 1. vyšetřovaném místě.....	55
Obr. 37: Vyšetřovaná místa pro vyhodnocení působícího sekundárního napětí	56
Obr. 38: Průběh napětí na objemovém modelu kolena ve 2. vyšetřovaném místě.....	56
Obr. 39: Místo řezu pro linearizaci napětí po tloušťce stěny v 2. vyšetřovaném místě..	57
Obr. 40: Graf průběhu jednotlivých kategorií napětí ve 2. vyšetřovaném místě.....	57
Obr. 41: Detail výpočtové sítě v řezu napojení	58
Obr. 42: Průběh napětí na objemovém modelu napojení ve 3. vyšetřovaném místě.....	59
Obr. 43: Místo řezu pro linearizaci napětí po tloušťce stěny ve 3. vyšetřovaném místě	59
Obr. 44: Graf průběhu jednotlivých kategorií napětí ve 3. vyšetřovaném místě.....	60
Obr. 45: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 1 (OPE, deformace zvětšení 12x)	61
Obr. 46: Vyhodnocení průběhu napětí ve stavu 2 (OPE, zvětšení deformace 12x)	61
Obr. 47: Vytížení potrubního systému vzhledem k dovoleným hodnotám	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Veličiny použité pro stanovení součinitele přestupu tepla	19
Tab. 2: Tepelná bilance	23
Tab. 3: Provozní okrajové podmínky	25
Tab. 4: Hodnoty součinitele přestupu tepla pro vnitřní povrch potrubí.....	26
Tab. 5: Přísady materiálu ASTM A691-1.1/4CR	26
Tab. 6: Okrajové podmínky pro uložení potrubního systému	40
Tab. 7: Okrajové podmínky pro uložení v podporách potrubního systému	41
Tab. 8: Nastavená předpětí pro pružinová uložení	41
Tab. 9: Dovolené hodnoty pro kategorizaci napětí.....	52
Tab. 10: Vyhodnocení působícího primárního napětí v 1. vyšetřovaném místě	55
Tab. 11: Vyhodnocení působícího napětí ve 2. vyšetřovaném místě	58
Tab. 12: Vyhodnocení působícího napětí ve 3. vyšetřovaném místě	60
Tab. 13: Vyhodnocení působícího napětí v provozních stavech	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Isometrie: ISO-P20012002-02

Příloha 2 – Isometrie: ISO-P20015704-04

Příloha 3 – Isometrie: ISO-P20017704-04

Příloha 4 – Isometrie: ISO-P20010607-01

Příloha 5 – Výkres: SPI_200012_200013

Příloha 6 – CD s isometriemi v elektronické verzi a programy v GNU Octave