



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**NÍZKOTEPLTNÍ VÝMĚNÍK TEPLA**

LOW TEMPERATURE HEAT EXCHANGER

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. František Křivánek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

BRNO 2023



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Bc. František Křivánek</b>
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2022/23

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:

## Nízkoteplotní výměník tepla

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S rozvojem využití lyofilizačních technologií roste zájem o dostupnou technologii dosažení nízkých teplot, kdy zejména teploty pod  $-100\text{ °C}$  jsou již omezeně realizovatelné s využitím běžných chladicích zařízení, avšak tyto teploty jsou stále příliš vzdáleny od kryogenních technologií, které pracují s teplotami pod  $-180\text{ °C}$ . Problematické je také zajištění regulace dosahovaného chladicího výkonu a tím zajištění precizní regulace teploty během procesu lyofilizace. Řešením by mohlo být využití nepřímého chlazení, kdy je prostor lyofilizuje chlazen pomocí teponosné kapaliny, která je připravována (chlazena) ve speciálním tepelném výměníku pomocí par dusíku, případně s využitím přímého odparu kapalného dusíku.

### Cíle diplomové práce:

Cílem práce je provést rešerši vhodných teponosných látek, konstrukčních materiálů a konstrukcí tepelných výměníků, využitelných pro nepřímé chlazení v průběhu procesu lyofilizace. Na základě zpracované rešerše provést koncepční návrh systému nepřímého chlazení a zvolit vhodnou konstrukci tepelného výměníku pro chlazení teponosné látky.

### Seznam doporučené literatury:

POPOV, Dimityr, Kostadin FIKIIN, Borislav STANKOV, Graciela ALVAREZ, Mohammed YOUBI-IDRISSI, Alain DAMAS, Judith EVANS a Tim BROWN, 2019. Cryogenic heat exchangers for process cooling and renewable energy storage: A review. Applied Thermal Engineering. 153, 275-290. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.106>

KAKAC, S. a A. PRAMUANJAROENKIJ, 2012. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN 978-1-4398-4990-3.

KUPPAN, T., 2013. Heat exchanger design handbook. Second edition. Boca Raton: CRC Press. ISBN 9781439842126.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je navrhnout nízkoteplotní výměník pro lyofilizační zařízení. Teoretická část práce obsahuje základní popis technologie lyofilizace, provedenou rešerší problematiky přenosu tepla při nízkých teplotách se zaměřením na vhodné konstrukční materiály a teplonosné látky a přehled využívaných konstrukcí tepelných výměníků. Praktická část práce se zabývá samotným návrhem výměníku tepla pro nepřímé chlazení ve dvou variantách, z nichž jedna využívá systém s přímým výparem teplonosné látky a druhá je zaměřena na čistě kapalinové chlazení.

### **Klíčová slova**

Tepelný výměník, přenos tepla, kryogenní technologie, lyofilizace, nepřímé chlazení, kondenzace

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to design a low-temperature heat exchanger for a lyophilization device. The theoretical part of the work includes a basic description of lyophilization technology, a literature review of heat transfer at low temperatures with a focus on suitable construction materials and heat transfer fluids, and an overview of utilized heat exchanger designs. The practical part of the work deals with the actual design of the heat exchanger for indirect cooling in two variants, one of which utilizes a direct vaporization system of the heat transfer fluid, while the other focuses on purely liquid cooling.

### **Key words**

Heat exchanger, heat transfer, cryogenic technology, lyophilization, indirect cooling, condensation

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KŘIVÁNEK, František. Nízkoteplotní výměník tepla. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/150005>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Hejčík.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Nízkoteplotní výměník tepla** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

26. 5. 2023

-----  
Datum

\_\_\_\_\_  
*František Křivánek*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Jiřímu Hejčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Děkuji také rodině a přátelům, kteří mě za dobu mého studia podporovali.



## OBSAH

Úvod .....	13
1 Rešeršní část práce.....	14
1.1 Kryogenní procesy .....	14
1.2 Lyofilizace .....	14
1.2.1 Postup lyofilizace .....	14
1.2.2 Části lyofilizačního zařízení.....	15
1.3 Mechanismy přenosu tepla .....	17
1.3.1 Přenos tepla vedením .....	17
1.3.2 Přenos tepla prouděním.....	17
1.3.3 Přenos tepla sáláním.....	19
1.3.4 Přenos tepla při změně skupenství .....	20
1.4 Přenos tepla při nízkých teplotách .....	23
1.4.1 Přenos tepla vedením .....	23
1.4.2 Přenos tepla prouděním.....	24
1.4.3 Přenos tepla sáláním.....	25
1.5 Vlastnosti látek při nízké teplotě .....	25
1.5.1 Houževnatost.....	25
1.5.2 Přechodová teplota .....	25
1.5.3 Deformace .....	27
1.5.4 Tepelná roztažnost materiálů .....	29
1.5.5 Tepelná kapacita materiálů.....	30
1.6 Výměníky tepla.....	31
1.6.1 Trubkové výměníky .....	31
1.6.2 Deskové výměníky .....	33
1.6.3 Regenerační výměníky .....	34
1.7 Teplonosné látky.....	35
1.7.1 Kryogenní plyny.....	35
1.7.2 Směsi kryogenních plynů .....	36
1.8 Materiály pro kryogenní aplikace .....	37
1.8.1 Oceli .....	37
1.8.2 Duplexní nerezové oceli.....	38
1.8.3 Nerezové slitiny Inconel.....	38
1.8.4 Hliníkové slitiny .....	39
1.8.5 Měděné slitiny .....	39
1.8.6 Titanové slitiny.....	40
2 Praktická část práce .....	41
2.1 Zadání .....	41
2.2 Možné koncepce .....	41
2.3 Stanovení provozních teplot .....	43
2.4 Volba technického řešení pro kryogenní látku .....	43
2.4.1 Teplonosné látky .....	43

---

2.4.2	Volba koncepce .....	43
2.4.3	Výsledná koncepce .....	45
2.5	Návrh výměníku pro kryogenní látku .....	46
2.5.1	Zadání .....	46
2.5.2	Volba konstrukce výměníku .....	46
2.5.3	Návrh hlavních rozměrů výměníku .....	46
2.5.4	Výpočet 1. části výměníku .....	50
2.5.5	Výpočet 2. části výměníku .....	54
2.5.6	Výpočet 3. části výměníku .....	58
2.5.7	Kontrolní výpočty .....	62
2.5.8	Průběh teplot ve výměníku .....	62
2.5.9	Tlaková ztráta výměníku .....	63
2.6	Volba technického řešení pro teplotnosnou látku .....	68
2.7	Návrh výměníku pro teplotnosnou látku .....	68
2.7.1	Zadání .....	68
2.7.2	Volba konstrukce výměníku .....	68
2.7.3	Návrh hlavních rozměrů výměníku .....	69
2.7.4	Kontrolní výpočty .....	74
2.7.5	Tlaková ztráta výměníku .....	75
DISKUSE.....		77
ZÁVĚR .....		79
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....		80
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....		84
SEZNAM PŘÍLOH.....		92





## Úvod

V dnešní době stále více roste význam nízkoteplotních aplikací, které se dostávají do kryogenních teplot, pro různé průmyslové procesy. Jedním z nejvýznamnějších průmyslových procesů, který vyžaduje nízkoteplotní aplikace, je lyofilizace. Jedná se o postup sušení, při kterém se odstraňuje voda nebo jiná rozpouštědla z materiálu při nízkých teplotách a nízkém tlaku. Lyofilizace je proces nákladný a časově náročný, a proto bývá předmětem výzkumu a inovace.

Ač se tato technologie zdá velice sofistikovaná, její základní principy znali už staří Inkové, kteří používali noční horský mráz k sušení brambor. Tyto potraviny následně bylo jednodušší transportovat i mimo horské oblasti díky vyšší trvanlivosti a nižší váze. První lyofilizaci v umělé atmosféře provedl Dr. Jacques Arsène d'Arsonval na Collège de France v Paříži v roce 1906. Následně tuto technologii využil Downey Harris ke konzervaci živého viru vztekliny, čímž výrazně usnadnil vývoj očkování proti této chorobě. V průběhu druhé světové války vznikla v USA výrazná potřeba zásobovat Evropu a další zaoceánské fronty, co možná nejtrvanlivějšími potravinami. Další rozvoj následoval po rozvoji kosmonautiky, kde každý kilogram váhy navíc představuje dodatečné náklady. Poté našla čím dál dostupnější technologie uplatnění ve farmacii a kosmetice. V posledních desetiletích se technologie stává natolik dostupnou, že se dají běžně koupit lyofilizované produkty i lyofilizační zařízení. [38]

Nízkoteplotní výměník tepla je důležitou komponentou v kryogenních aplikacích, kde se využívá k přenosu tepla při velmi nízkých teplotách. Ve své diplomové práci se budu zabývat aplikací nízkoteplotního výměníku v lyofilizačním zařízení, kde se využívají i kryogenní teploty k dosažení požadovaného stavu produktu.

Použití kryogenních teplot zvyšuje požadavky na návrh celého systému, protože je nutné zajistit dostatečnou tepelnou odolnost celého zařízení a zajistit fungování systému i při postupném ochlazení na nízké teploty. Nebývají zanedbatelné teplotní změny vlastností látek a materiálů, které mohou být i o několik řádů, a proto je potřeba tyto proměnné skutečnosti uvažovat při návrhu celé aplikace.

V rámci diplomové práce je navržen vhodný nízkoteplotní výměník tepla na páry kapalného dusíku a vhodnou teplotnosnou látku, která přenesení chlad do produktové komory a nastíněno možné řešení celého systému pro tuto aplikaci. Návrh zařízení bude probíhat s vizí možného využití kapalného hélia a dosažení co nejnižších teplot.

Součástí práce je i rešeršní část, ve které se budu zabývat nalezením vhodné teplotnosné látky pro danou aplikaci, a to i s přihlédnutím na přechodové děje. Dále se věnuji změně vlastností materiálů a výběru vhodného materiálu pro tuto aplikaci.

## 1 Rešeršní část práce

### 1.1 Kryogenní procesy

Oblast teplot pro které je tento nízkoteplotní výměník navrhován, se nazývá kryogenní oblast a zabývá se jí podobně nazvaný fyzikální obor – kryogenika zkoumá dosahování velmi nízkých teplot a studiem působení těchto teplot na různé materiály.

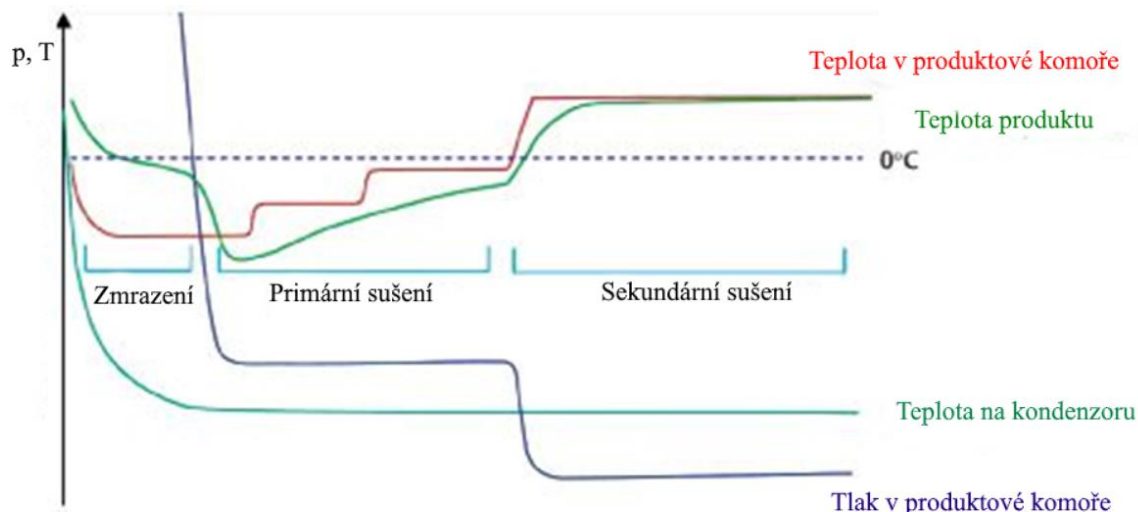
Jako teplotní hranice mezi standardním chlazením a kryogenními procesy se označuje 120 K (-153,15 °C) [5] nebo podle Amerického národního institutu standardů a technologie 93,15 K (-180 °C) [4]. Tato hranice je určena teplotou varu všech významných plynů atmosféry, tyto plyny jsou potom označovány v kapalném stavu jako kryogenní kapaliny či kryogeny.

Těchto procesů se v současnosti nejvíce využívá při výrobě kapalného zemního plynu (LNG), kde se zkapalňování využívá především z důvodu nižšího objemu pro transport, ale také pro separaci jednotlivých složek zemního plynu. Dalšími aplikacemi spojených s kryogenikou je využití kapalného vodíku pro dopravu, pohonné systémy kosmických raket využívající kapalný kyslík a vodík a výzkum supravodičů [4].

### 1.2 Lyofilizace

Lyofilizace či desikace nebo v češtině sušení mrazem je technologie používající se k vysoušení vlhkých materiálů. Využití najde v potravinářství, farmacii, kosmetickém průmyslu, taxidermii, floristice, archeologii a archivnictví. Základem této technologie je sublimace při nízké teplotě a tlaku. To má velkou výhodu, protože při přechodu z kapalného do plynného skupenství většinou dochází k poškození sušeného materiálu. Další výhodou je, že při sušení touto metodou nedochází k ohřátí materiálu a s tím i změně struktury, zahubení bakterií a buněk. Potraviny upravené touto technologií mívají delší životnost, bývají voňavější i chutnější, v případě ovoce nedochází oproti klasickému sušení k takovému úbytku vitamínů (především vitamínů A a C) a minerálů. Nevýhodou této technologie je vyšší energetická i technická náročnost a s ní spojená i vyšší cena. [6]

#### 1.2.1 Postup lyofilizace



Obr. 1.1 Průběh celého procesu lyofilizace, upraveno [27]

### 1. Zmrazení

V prvním fázi je vlhký materiál zmrazen pod bod tání, aby nedocházelo v materiálu k výskytu kapalného skupenství. Je nezbytné provést změnu skupenství co možná nejpomaleji, protože může dojít k mikroskopickému poškození materiálu. V případě nedokonalého promrznutí materiálu by částice kapaliny při nízkém tlaku začaly vařit a vzniklá plynná fáze by poškodila sušený materiál. Teplota zamrazení může být až k  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a může trvat i několik dní. [6]

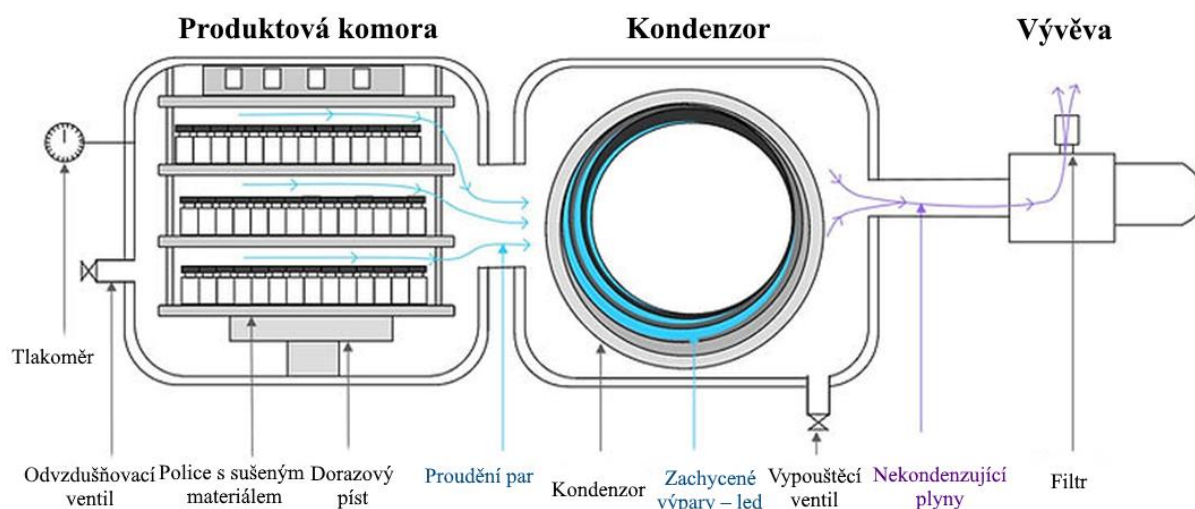
### 2. Primární sušení

V této fázi zvyšujeme teplotu až téměř k bodu tání, souběžně snižujeme tlak až k hodnotám stovek pascalů. Tato fáze neprobíhá prudce, ale teplota je měněna po krocích. Ze stavové rovnice vyplývá, že s rostoucí teplotou stoupá i tlak. Ten je ale neustále udržován na nízkých hodnotách, proto je nutné neohřívat chlazený materiál rychle z důvodu zvýšení tlaku na teplotu varu a tím i znehodnocení sušeného materiálu. Nejvyšší teplota sušení dosahuje v případě květin a potravin  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , proces trvá v řádu vyšších jednotek hodin až několika dnů. Vlhkost je odstraněna až z 95 %. [6]

### 3. Sekundární sušení

Poslední fázi, ne nezbytně nutnou v procesu lyofilizace, využívající se pouze při potřebě odstranit poslední molekuly držící se na povrchu sušeného materiálu díky adsorpci<sup>1</sup>. Teplota se zvedne v některých případech až nad bod tání, tlak se stále snižuje až na vysoké vakuum ( $10^{-1} - 10^{-5}$  Pa), záleží na konkrétním materiálu. Na konci sušení nahrazuje vakuum inertní plyn, jako je dusík. [6]

#### 1.2.2 Části lyofilizačního zařízení



Obr. 1.2 Schéma lyofilizačního zařízení, upraveno [25]

<sup>1</sup> Adsorpcie je proces, jehož principem je hromadění molekul plynu, kapaliny či pevné látky na povrchu či fázovém rozhraní účinkem působení mezi povrchových přitažlivých sil. [37]

### Vývěva

Vývěva je jednou z částí lyofilizačního zařízení, která se využívá k odčerpávání vzduchu či jiných plynů a vodní páry z lyofilizovaného materiálu během procesu. Obvykle se nachází v horní části produktové komory a umožňuje odpařování vody z lyofilizovaného materiálu do vakuového prostoru.

Během procesu se materiál zmrazí a poté se pod nízkým tlakem začne odpařovat voda z lyofilizovaného materiálu. Voda se odpařuje a vznikají vodní páry, které musí být odvedeny z produktové komory pomocí vývěvy.

Vývěva musí být dostatečně velká, aby dokázala zachytit veškeré vodní páry vznikající během celého procesu. Musí být také navržena tak, aby minimalizovala vliv na teplotu lyofilizovaného materiálu, protože příliš vysoká teplota může mít negativní vliv na kvalitu výsledného produktu. Kromě toho musí být vývěva dostatečně odolná, aby mohla fungovat i při agresivních chemických a fyzikálních podmínkách v produktové komoře. [7], [8]

### Kondenzor

Kondenzor je další částí zařízení, která je používána k zachycení vodních par vypařujících se z lyofilizovaného materiálu. Kondenzor se obvykle nachází v dolní části produktové komory a jeho úkolem je převést vodní páry z plynné na kapalnou fázi.

Kondenzor je obvykle chlazený a jeho povrch je pokryt materiálem s vysokou tepelnou vodivostí. Teplo, které se uvolňuje při přeměně vodních par z plynné fáze na kapalnou, se přenáší na kondenzor. Tato voda následně odtéká z kondenzoru a odstraňuje se z produktové komory. [7], [8]

### Produktová komora

Produktová komora je částí zařízení sloužící k uchování a zpracování produktů v procesu lyofilizace. Komora musí být vyrobena z materiálů, které jsou odolné vůči nízkým teplotám a tlakům a zároveň jsou vhodné pro farmaceutické a potravinářské použití, dle využití zařízení. V komoře se nachází police, na které jsou umístěny kontejnery s produktem. Kontejnery jsou vyrobeny z materiálů, které jsou schopny přenášet teplotu a zároveň jsou inertní vůči produktu. Součástí produktové komory je také filtrační systém pro zajištění sterilního prostředí, který zabraňuje kontaminaci produktu během procesu lyofilizace. [7], [8]



Obr. 1.3 Lyofilizační zařízení řady EKS od německé firmy ZIRBUS [28]



### 1.3 Mechanismy přenosu tepla

Přestup neboli sdílení tepla lze z fyzikálního hlediska rozdělit na tři základní způsoby: sdílení tepla vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací). Obvykle se jedná o kombinaci jednotlivých principů. V případě lyofilizačních zařízení se v produktových komorách ve většině případů téměř nevyužívá přenosu tepla prouděním, ale používá se sdílení tepla vedením a zářením [9].

#### 1.3.1 Přenos tepla vedením

Ke sdílení tepla vedením dochází ve spojitém látkovém prostředí, v čisté formě probíhá pouze u pevných látek. V případě kapalných látek lze uvažovat pouze se zanedbatelným vlivem pohybu kapaliny. V ostatních případech se vyskytuje s ostatními druhy přenosu tepla.

Vedení se uskutečňuje molekulárním mechanismem a spočívá v předávání kinetické energie mezi částicemi látky, která se přenáší z míst o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou. Vedení tepla zvyšují volné elektrony či ionty v tekutinách. Intenzitu procesu ovlivňuje maximální teplotní spád v daném místě prostředí, vyjádřený gradientem teploty. Gradient teploty je vektor, kolmý k izotermě a mající směr nejvyššího nárůstu teploty. Místa se stejnou teplotou v teplotním poli jsou nazývána izotermy. Rychlost přenosu tepla je vyjadřována veličinou označovanou jako tepelný tok. Míru ochoty materiálů přenášet teplo vedením vyjadřuje tepelná vodivost, tato veličina je závislá na teplotě.

Tento princip přenosu tepla popisuje Fourierův zákon, který byl zjištěn z experimentálních zkušeností. Dle něj lze vyjádřit hustotou tepelného toku jako:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) [W \cdot m^{-2}] \quad (1.3.1)$$

Kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ], gradient teploty vyjadřuje změnu teploty ve směru normály k izotermickému povrchu [ $K \cdot m^{-1}$ ].

Záporné znaménko symbolizuje přenos tepla z teplého do chladnějšího prostředí. Přenos tepla vedením lze rozdělit i v rámci časové závislosti, a to na stacionární a nestacionární (časově závislý a časově nezávislý).

#### 1.3.2 Přenos tepla prouděním

Probíhá za předpokladů spojitého prostředí v tekutinách, proces funguje díky přenosu energie pohybem částic, což vede k jejich promíchání. Ohřátá kapalina proudí buď přirozeně – změnou hustoty či nuceně za pomoci čerpala nebo ventilátoru. Přenos tepla prouděním je popsán Newtonovým ochlazovacím zákonem a lze vyjádřit hustotou tepelného toku jako:

$$q = \alpha \cdot \Delta t [W \cdot m^{-2}] \quad (1.3.2)$$

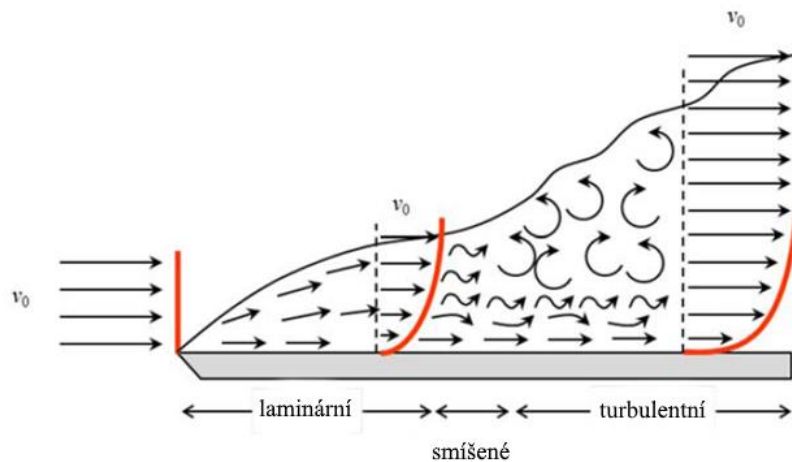
Kde je  $\Delta t$  rozdíl teplot [K] a  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ], může nabývat velkého rozsahu hodnot až přes šest řádů. Tento koeficient lze určit pomocí teorie podobnosti, a to ve většině případů díky bezrozměrným podobnostním číslům:

- Reynoldsovo číslo  
Toto bezrozměrné kritérium dává do podobnosti setrvačné síly a viskozitu tekutiny. Pomocí tohoto podobnostního čísla určujeme druh proudění, které velmi ovlivňuje přestup tepla, zda se jedná o laminární či turbulentní proudění. Jako hranice laminárního proudění je stanovena na  $Re=2\,300$ , pro nucenou vnitřní konvekci. Nabude-li číslo vyšších hodnot, je laminární charakter narušen vznikajícími víry. Nad hodnotu  $Re=10\,000$  lze hovořit o proudění zcela turbulentním.

Toto podobnostní číslo je definováno:

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} [-] \quad (1.3.3)$$

Kde  $w$  je rychlost proudění [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $D$  je charakteristický rozměr [m] a  $\nu$  je kinematická viskozita [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ].



Obr. 1.4 Laminární, smíšené a turbulentní proudění, upraveno [10]

- Prandtlovo číslo  
Bezrozměrné kritérium popisující míru podobnosti mezi rychlostním a teplotním polem, zda převládá přenos tepla prouděním nebo vedením. Pro hodnoty  $Pr \gg 1$  probíhá přenos prouděním, zatímco pro nižší hodnoty  $Pr \ll 1$  probíhá přenos vedením v tekutině. Lze jej definovat takto:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} [-] \quad (1.3.4)$$

Kde  $c_p$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] a  $\eta$  je dynamická viskozita kapaliny [ $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

- Grashofovo číslo  
číslo je definováno jako poměr tíhové síly k viskózní síle a poměr tepelného přenosu prouděním k tepelnému přenosu difuzí. Lze vyjádřit jako:

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \Delta t \cdot \beta}{\nu^2} [-] \quad (1.3.5)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  $L$  je charakteristická délka,  $\Delta t$  je rozdíl teploty mezi horní a dolní vrstvou tekutiny [K],  $\beta$  je koeficient objemové roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ],  $\nu$  je kinematická viskozita tekutiny [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ].

- Nusseltovo číslo  
Udává poměr přenosu tepla vedením a prouděním v mezní vrstvě tekutiny. Následně z něj určíme součinitel přestupu tepla, a to pomocí vyjádření z následujícího vztahu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} [-] \rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (1.3.6)$$

Kde je  $\alpha$  součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ],  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] a  $D$  je charakteristický rozměr [m]. Z této definice většinou určujeme součinitel přestupu tepla  $\alpha$ .

V technické praxi toto číslo určujeme z kritériální rovnice:

$$Nu = k \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (1.3.7)$$

Kde konstanty  $k$ ,  $m$ ,  $n$  jsou známy z vlastností dané tekutiny a tvaru obtékaných ploch, Reynoldsovo i Prandtlovo číslo je určeno z vlastností dané situace.

### 1.3.3 Přenos tepla sáláním

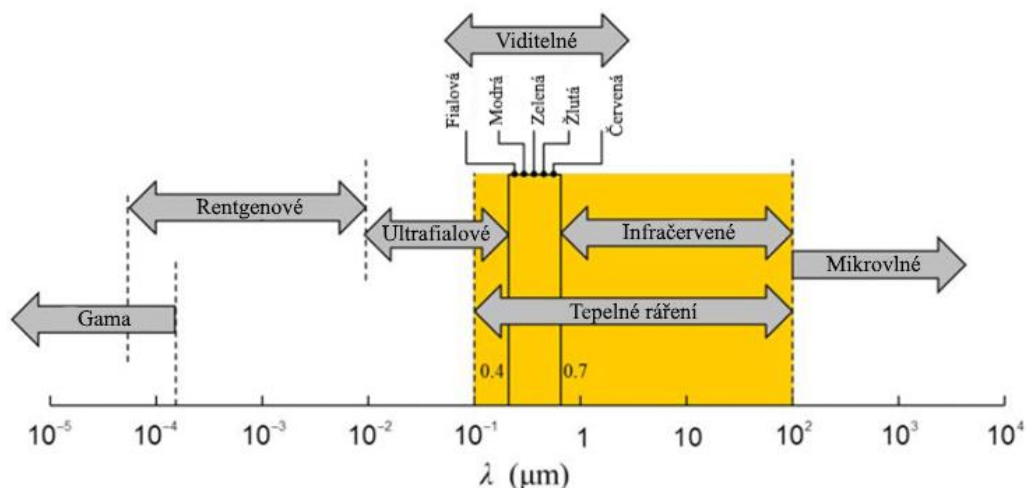
Tento mechanismus sdílení tepla nesouvisí s látkovým prostředím. V tomto přenosu je teplo předáváno pomocí elektromagnetického záření, jehož tepelná složka (0,1 až 100  $\mu m$ ) je nositelem tepelné energie, i v případě prázdného prostoru. Všechna tělesa o teplotě vyšší než 0 K emitují a také absorbují záření, toto záření je závislé na absolutní teplotě těles.

Tato vyzářená energie je popsána Stefan-Boltzmanovým zákonem, kterým lze zapsat tepelný tok jako:

$$q = \sigma \cdot T^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (1.3.8)$$

Kde je  $\sigma$  Stefanova-Boltzmannova konstanta [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ] a  $T$  je absolutní teplota tělesa vyřazující energii [K].

V oblasti tepelných výměníků ji ve většině případů zanedbáváme. Vzhledem k definici, kde roste tepelný tok se čtvrtou mocninou, je přenos nezanedbatelný při vyšších teplotách. [10]



Obr. 1.5 Spektrum elektromagnetického záření zobrazující oblast tepelného záření žlutě, upraveno [10]

V případě dopadu elektromagnetického záření na jiné těleso je částečně pohlceno, zvyšuje energii tělesa, část se odráží a část prochází tělesem, toto záření dopadá na jiná tělesa či se dále pohybuje prostorem. Poměr mezi jednotlivými částmi záření je dán povrchem a barvou plochy.

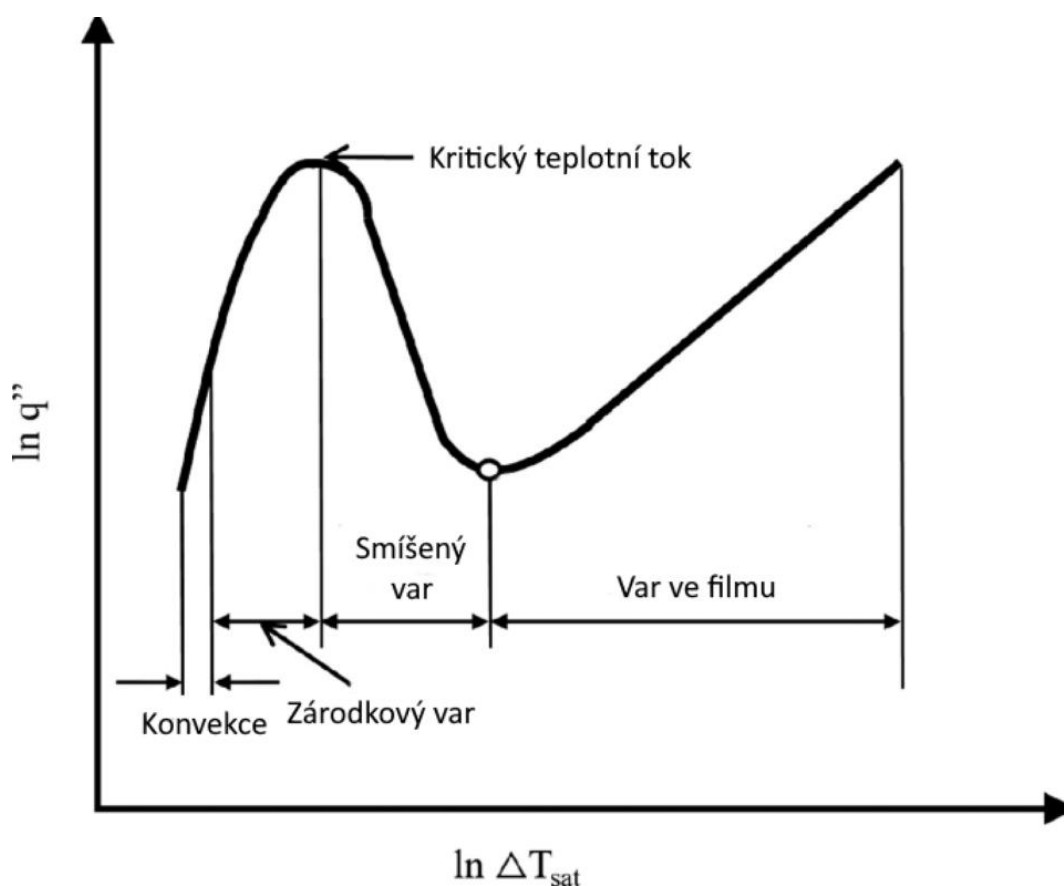
### 1.3.4 Přenos tepla při změně skupenství

Při přenosu tepla prouděním a změně skupenství dochází k výrazné změně vlastností látek, což může být klíčovým faktorem v mnoha procesech a aplikacích. Při přechodu z kapalného do plynného skupenství dochází k vypařování, při kterém se látky zkapalněné při konstantním tlaku nebo konstantní teplotě přeměňují na plyny. Inverzní proces přechodu z plynného do kapalného skupenství se nazývá kondenzace, při které se plyny přeměňují na kapaliny.

Při jednosložkových parách je teplota a tlak kondenzace a varu shodná. To znamená, že když máme například čistou tekutinu v podobě par, tak se při kondenzaci přemění na kapalinu při stejné teplotě a tlaku jako, byly tyto parametry par při varu. Pro páry směsi teplota a tlak kondenzace není shodný s těmito parametry při varu příslušné kapaliny. To znamená, že pokud máme směs dvou látek (např. voda a alkohol) v plynné formě, tak se každá z těchto látek přemění na kapalinu při jiné teplotě a tlaku. Toto se využívá například při destilaci, kdy se pomocí různých teplot varu a kondenzace oddělují jednotlivé složky směsi. [19]

#### Var za konstantního tlaku

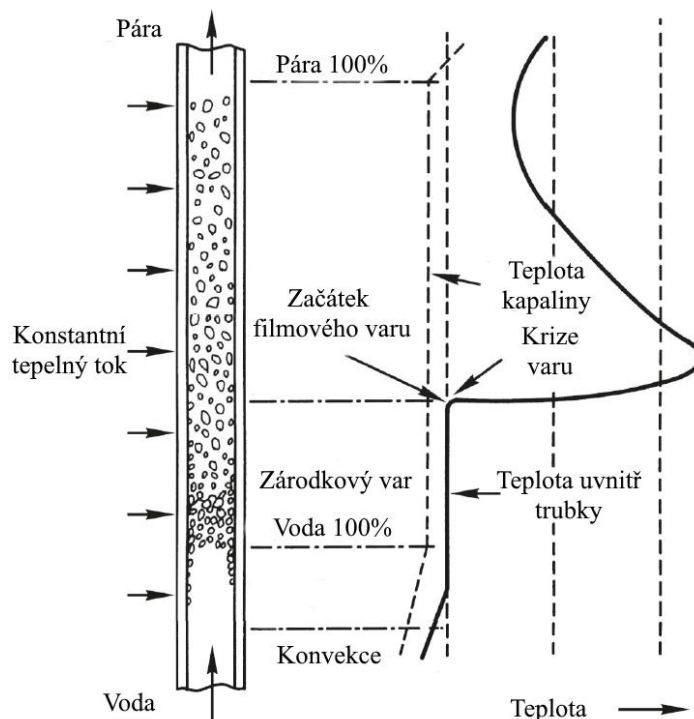
Var a s ním spojené vypařování je fázová přeměna, při které se kapalina mění na plyn. K varu dochází za předpokladu dostatečného rozdílu teplot stěny a média, na základě rozdílu teplot rozlišujeme různé režimy varu. [19]



Obr. 1.6 Závislost tepelného toku nebo také součinitele přestupu tepla  $\alpha$  a rozdílu teplot stěny a média v logaritmických souřadnicích [39]

## Režimy varu

- **Odpařování**  
Režim varu, nazýván odpařování, je typický pro malé toky tepla, při kterých se teplo od teplejší stěny až k hladině dopravuje vedením a volnou konvekcí. Tento stav je charakterizován tepelnými toky do  $10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a malým rozdílem teploty mezi stěnou a teplotou varu do 5 K. Výpočet tepelného toku v tomto režimu je podobný jako u jednofázového proudění. [19]
- **Bublinový neboli zárodkový var**  
Je charakteristický pro tepelné toky v rozmezí  $10^4$  až  $10^6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a rozdíl teploty stěny a teploty varu v rozmezí 8 až 20 K. Při bublinovém varu se na stěně vytvářejí bublinky par a teplo se přenáší pouze ke stěnovému povrchu bublinek. Bublinky mají tendenci se pohybovat směrem nahoru, což způsobuje odtržení bublinek od stěny a nátok nové kapaliny na stěnu. Tím dochází k výraznému promíchání kapaliny u stěny. Rychlost přestupu tepla při bublinovém varu se výrazně zvyšuje a může dosáhnout hodnot až  $5\cdot 10^5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . [19]
- **Var ve filmu**  
Blánový var neboli var ve filmu nastává při velkých rozdílech teploty mezi stěnou a teplotou varu, kdy se vytváří velké množství par, která vytváří tepelně izolující vrstvu mezi stěnou a kapalinou. Jednotlivé bublinky par se nestačí dostatečně rychle odtrhovat od stěny a místo toho se spojují do vrstvy, která odděluje kapalinu od stěny. To způsobuje pokles součinitele přestupu tepla  $\alpha$ , který klesá na hodnoty kolem  $10^3 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$  pro velké rozdíly teploty mezi stěnou a teplotou varu. [19]



Obr. 1.7 Průběh varu ve vertikální trubce, upraveno [2]

Tento významný jev je nazývaný též jako krize varu. Tento efekt může nastat při kontaktu kapaliny s velmi horkým povrchem, jako jsou například rozžhavené

kovové desky nebo plameny. V krizi varu je tepelný tok přenášen výhradně parami, což vede k významnému snížení přenosu tepla. Tento efekt může být nežádoucí v mnoha aplikacích, jako jsou například spalinové výměníky, kde může způsobit poškození tepelného výměníku, protože vysoké teploty mohou způsobit deformace nebo dokonce prasknutí výměníku. [2]

### **Kondenzace za konstantního tlaku**

Kondenzace je proces, kdy se plynná látka přeměňuje na kapalinu. Kondenzace se vyskytuje na styku par se stěnou o nižší teplotě, než je teplota kondenzace této látky. Tento proces může také probíhat na volném povrchu kapaliny nebo i v plynu.

Z hlediska přestupu tepla rozlišujeme dva mechanismy kondenzace:

- **Kapková kondenzace**

Kondenzace začíná tvorbou kapek na chladnější stěně, kde pára přichází do kontaktu s méně teplou povrchovou vrstvou. Podobně jako při bublinovém varu, při kapkové kondenzaci se vysoký součinitel přestupu tepla projevuje díky vysoké koncentraci tepla v místě tvorby kapek. Tyto kapky se tvoří na místech nukleace, jako jsou drobné důlky, prachové částice a jiné nepravidelnosti povrchu. Jakmile kapky dosáhnou určité velikosti, sklouznou dolů a pára je částečně v přímém styku s chladnější stěnou. Součinitel přestupu tepla u kapkové kondenzace je až 10krát větší než u blánové kondenzace. I když jsou snahy udržet stěnu nesmáčivou vůči kondenzátu úspěšné jen krátkodobě, kapky se brzy spojují do filmu. Výroba kondenzátu může být ovlivněna tvarem a uspořádáním teplosměnné plochy. Například chladičí medium může proudit horizontálními trubkami, které nejsou řazeny nad sebou, a chladičí trubice v kondenzátorech jsou umístěny tak, aby z nich kondenzát mohl snadno odtékat. [19]

- **Blánová kondenzace**

Kondenzace nasycených par na vertikální stěně může vést k tvorbě tenké souvislé vrstvy kondenzátu. Pokud se kondenzát dostatečně rychle neodstraňuje, tloušťka vrstvy postupně narůstá. Kondenzát odkapává ze spodní strany chlazených ploch a stéká po svislých stěnách kondenzátoru ve vrstvě, která se postupně zvětšuje. Pokud je vrstva tenká, stéká laminárním způsobem a teplo se přes vrstvu kondenzátu přenáší jen vedením. Součinitele přestupu tepla jsou řádově  $10^3$  až  $10^4$   $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pokud není rychlost kondenzace příliš velká, nebude docházet k míchání ve vrstvě a tok ve filmu bude laminární. [19]

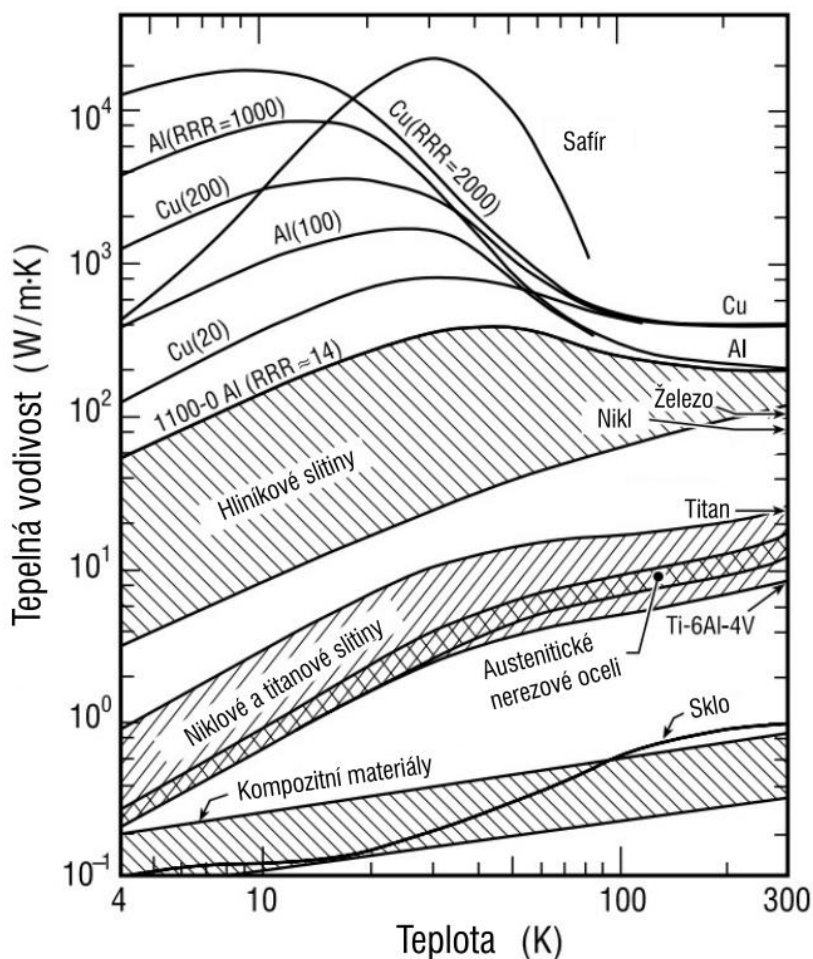
## 1.4 Přenos tepla při nízkých teplotách

Zařízení pro přenos tepla při nízkých teplotách jsou specifická tím, že je nutné zařídit jejich fungování jak při navrhovaném stavu, tak i v přechodových stavech ke kterým dochází vlivem změn jednotlivých veličin na teplotě či teplotní roztažnosti. Též je nutné zamezit sdílení tepla do okolí, které může významně ovlivnit chování zařízení. [10]

### 1.4.1 Přenos tepla vedením

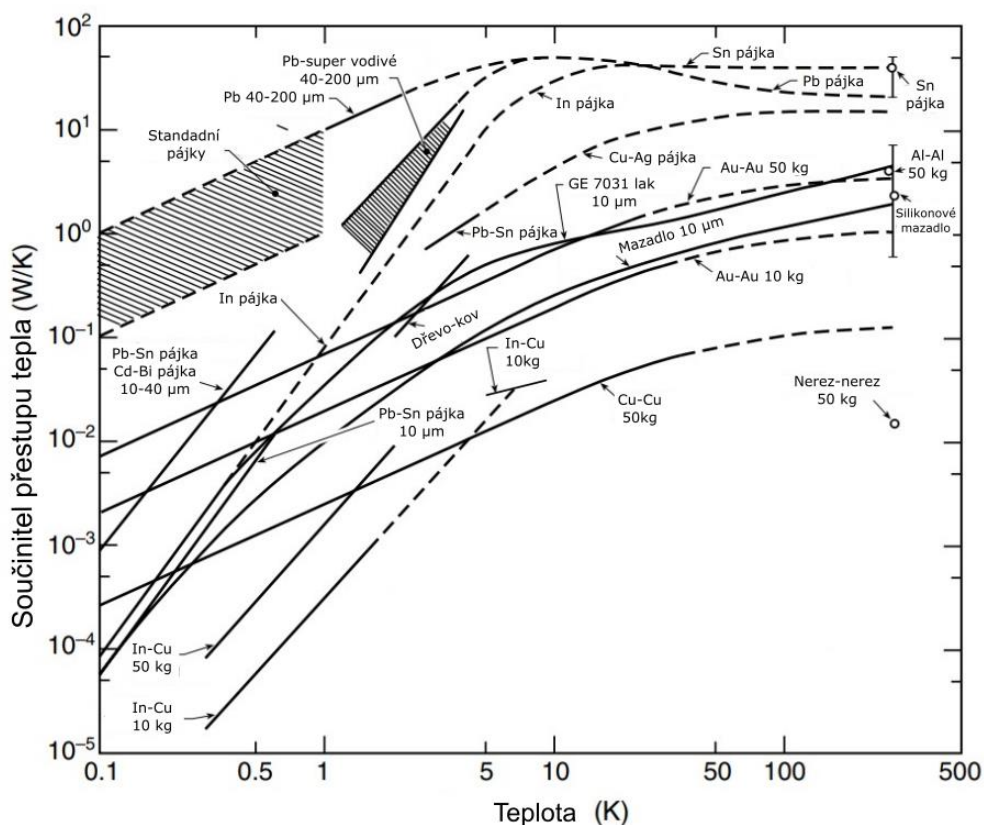
#### Pevné látky

Tepelná vodivost se mění u většiny materiálů řádově s teplotou, viz obrázek 1.8 níže. Dobré tepelné vodiče si udržují lepší tepelné vlastnosti oproti ostatním materiálům. V případě nejčistších vodičů dokonce v určitém intervalu vodivost i roste.



Obr. 1.8 Tepelná vodivost v závislosti na teplotě vybraných látek v logaritmickém měřítku, upraveno [12]

V případě rozhraní více materiálů hraje roli síla a druh spojení a také drsnost povrchu jednotlivých materiálů (s rostoucí silou se zvyšuje počet kontaktních bodů obou materiálů) v případě velmi nízkých teplot  $T < 1$  K může tento odpor (Kapicův odpor) tvořit velkou část tepelného odporu. Snižování tohoto odporu a měrné plochy se docílí spečením jemných prášků (sintrů) Cu, Ag nebo Pt se zrnem menším než 1  $\mu\text{m}$ . [24]



Obr. 1.9 Součinitel přestupu různých materiálů pro plochu 1 cm<sup>2</sup> s různým zatížením a povrchovou úpravou v logaritmických souřadnicích, upraveno [12]

## Kapaliny

Kapaliny jsou špatné tepelné vodiče i za normálních podmínek se snižováním teploty se jejich vlastnosti ještě více zhoršují. Ve většině případů přenos při nízké teplotě je tepelná vodivost zanedbatelná ve srovnání s konvekcí a jevy fázových změn [10]. Výjimkou je supratekuté hélium [13].

## Plyny

Přenos tepla vedením v plynech je mnohem méně efektivní než v pevných látkách, protože plyny mají nižší hustotu a nižší tepelnou vodivost. Tepelná vodivost plynu se snižuje s klesající teplotou, protože snižování teploty způsobuje snížení kinetické energie molekul plynu. Snižování kinetické energie vede ke snížení rychlosti molekulárních srážek, což ovlivňuje rychlost přenosu tepla v plynu. Jinými slovy, s klesající teplotou molekuly plynu se pohybují pomaleji, což snižuje pravděpodobnost srážek mezi nimi, a tedy i počet srážek, které mohou přenášet energii. To má za následek snížení celkové tepelné vodivosti plynu. [10]

### 1.4.2 Přenos tepla prouděním

Přenos tepla konvekcí při nízkých teplotách se výrazně odlišuje od přenosu tepla při běžných teplotách. Při nízkých teplotách se vlastnosti plynu výrazně mění a v důsledku toho se mění i jeho chování při proudění. Při nízkých teplotách se může objevit, vlivem změny viskozity (se snižující teplotou viskozita roste) laminární proudění, kdy se částice plynu pohybují v paralelních vrstvách s minimálním mícháním mezi nimi, to je dáno snížením kinetické energie molekul. Tento typ proudění zásadně snižuje schopnost přenosu tepla. [13]



### 1.4.3 Přenos tepla sáláním

Při nízkých teplotách je sálání dominantním způsobem přenosu tepla, zejména v prostředí s nízkou koncentrací částic. Tento proces je nezávislý na okolním médiu a je tedy velmi účinný i v prostředí s nízkou koncentrací částic. Pokud se jedná o dokonalé vakuum, pak se teplo může šířit pouze sáláním. [13]

Při nízkých teplotách je sálání dominantním způsobem přenosu tepla zejména proto, že většina materiálů má v této oblasti nízkou tepelnou vodivost. Jak vychází ze Stefanova-Boltzmannova zákona přenos tepla sáláním roste s čtvrtou mocninou teploty, to znamená že se snižující teplotou se snižuje i intenzita tepelného toku.

### 1.5 Vlastnosti látek při nízké teplotě

Při nízkých teplotách se mechanické vlastnosti materiálů mohou významně změnit. Je třeba brát v úvahu, že vlastnosti různých materiálů se můžou v závislosti na teplotě výrazně lišit, což může způsobovat problémy při provozování zařízení. V následující podkapitole projdeme základní vlastnosti a pojmy s tím spojené.

#### 1.5.1 Houževnatost

Houževnatost je vlastnost materiálu, udávající jeho odolnost proti deformování a nárazům, bez tvorby trhlin, či rozšiřování již existujících trhlin. Houževnatost přímo ovlivňuje vznik křehkého lomu, jedná se o velmi nebezpečný druh porušení, protože vzniká při nízkém namáhání a nepatrné plastické deformaci. Zároveň se může šířit velmi vysokou rychlostí. Vznik křehkého lomu i houževnatost jsou nejvýznamněji ovlivněny nízkou teplotou, stylem zatěžování, vlastnostmi konstrukce a kvalitou materiálu. Popisem této vlastnosti se zabývá lomová mechanika a samotný materiálový parametr se označuje lomová houževnatost. [10]

V inženýrské praxi získáváme informace o této vlastnosti mechanickými zkouškami. Nejvýznamnější jsou pro nás rázové zkoušky v ohybu. Tato zkouška se používá především u ocelí. Vzhledem k vysoké houževnatosti zkoušených materiálů by nemuselo dojít ke křehkému lomu, ale pouze k plastické deformaci, proto se opatřují zkušební tyče vrubem. To zvyšuje šanci na křehké porušení tělesa. Vzhledem k různým tvarům vrubů nelze dosažené výsledky srovnávat na základě teorie podobnosti. Z těchto důvodů jsou tvar i rozměry zkušebních těles určeny normou.

Rázové zkoušky ohybem se dále dělí podle způsobu uložení vzorků – Charpyho (vzorek uložen na dvou podporách) a Izoda (vzorek uchycen letmo). To ovlivňuje i pozici dopadu rázového kladiva a místa lomu na zkušebním tělese. Na základě zkoušky se určuje absorbovaná energie KV, KU [J], nárazová práce KCV, KCU [ $Jcm^{-2}$ ] a typ vzniklého lomu, zda je smykový (tvárný) či stěpný (křehký). Pro vyhodnocení těchto zkoušek existují pouze předpisy pro použití na lodích. Dle norem je kritériální hodnota pro provoz na lodi určena na KV=27 J, platí pro uhlíkové a manganové oceli s Re=230-270 MPa a tloušťku 10-38 mm. [31]

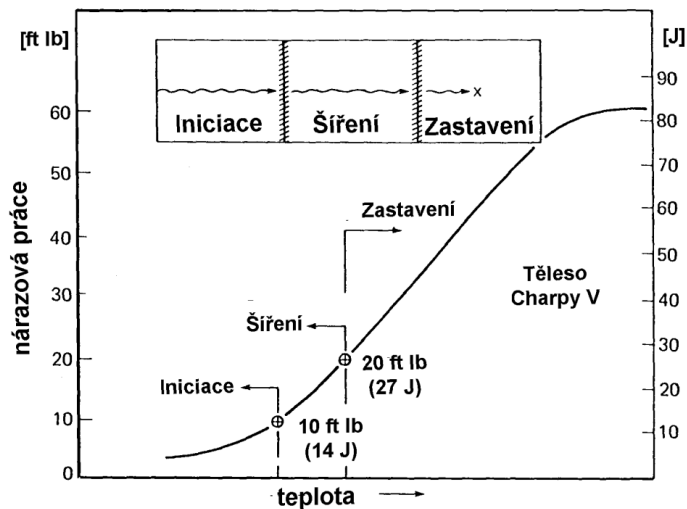
#### 1.5.2 Přejídnová teplota

Přejídnová teplota neboli transientní teplota je takovou teplotou, kdy dochází k přejídnou houževnatého porušení na křehký charakter porušení, při snižování teploty klesá i potřebná práce pro porušení materiálu. Mění se i druh lomu z tvárného lomu na křehký. Tento lom je také charakteristický pro nízké teploty.

Přejídnová teplota také charakterizuje místo strmého nárustu na křivce teplotní závislosti absorbované energie. Nelze přesně stanovit jedna teplota – nachází se na širším teplotním intervalu a neexistuje žádná platná definice přejídnové teploty.

Všeobecně jsou podmínky pro určení této teploty:

- dosažení určené absorbované energie při rázové zkoušce (v současnosti je používaná hodnota pro lodě KV=27 J [29]),
- vyskytuje se určité % smykového (tvárného) lomu,
- příčné rozšíření dosáhne určené hodnoty. [29]



Obr. 1.10 Závislost nárazové práce na teplotě při Charpyho zkouškách materiálu [31]

Přechodovou teplotu zvyšují [29]:

- Kalení  
Kalení může zvýšit přechodovou teplotu tím, že urychluje tvorbu krystalových defektů a tím posiluje strukturu materiálu.
- Tváření za studena (deformace tlakem, malá deformace tahem)  
Zahrnuje deformaci materiálu tlakem nebo malou deformací tahem. Tváření za studena může zvýšit přechodovou teplotu tím, že způsobuje plasticitu a tím deformuje krystalickou mřížku materiálu.
- Postupy, které mají za následek zhrubnutí struktury  
Některé úpravy materiálu, jako je řízené chlazení nebo řízené odlučování, mohou vést k zhrubnutí struktury materiálu. Toto zhrubnutí může zvýšit přechodovou teplotu.
- Postupy, které mají za následek heterogenitu struktury  
Některé úpravy, jako je legování materiálů určitými prvky, mohou vést k heterogenitě struktury materiálu. Tento heterogenní charakter může zvýšit přechodovou teplotu materiálu, protože uspořádání krystalů v různých oblastech může posilovat strukturu materiálu.

Přechodovou teplotu snižují [29]:

- Žihání, zušlechťování

Tyto procesy zahrnují zahřívání materiálu na vysokou teplotu a následné pomalé ochlazování. Tyto procesy mohou snížit přechodovou teplotu tím, že eliminují krystalové defekty a vytvářejí větší krystalové zrno, což snižuje odolnost materiálu proti deformaci.

- tváření za studena, po kterém následuje rekrytalizace

Tyto procesy mohou snížit přechodovou teplotu tím, že eliminují krystalové defekty a vytvářejí větší krystalové zrno, což snižuje odolnost materiálu proti deformaci.

- Postupy, které mají za následek zjemnění struktury

Některé úpravy, jako je rychlé chlazení, mohou vést k zjemnění struktury materiálu. Toto zjemnění může snížit přechodovou teplotu, protože menší krystalová zrna mají nižší odolnost proti deformaci.

- Postupy, které mají za následek vznik homogenní struktury

Některé zpracování, jako je homogenizace materiálu, mohou vést k vzniku homogenní struktury materiálu. Tato homogenní struktura může snížit přechodovou teplotu, protože umožňuje rovnoměrné rozložení deformace po celém materiálu.

### 1.5.3 Deformace

#### Elastická deformace

Při této deformaci je prodloužení úměrné tahové síle (Hookův zákon) a vzorek je schopen obnovit svou velikost po odstranění síly.

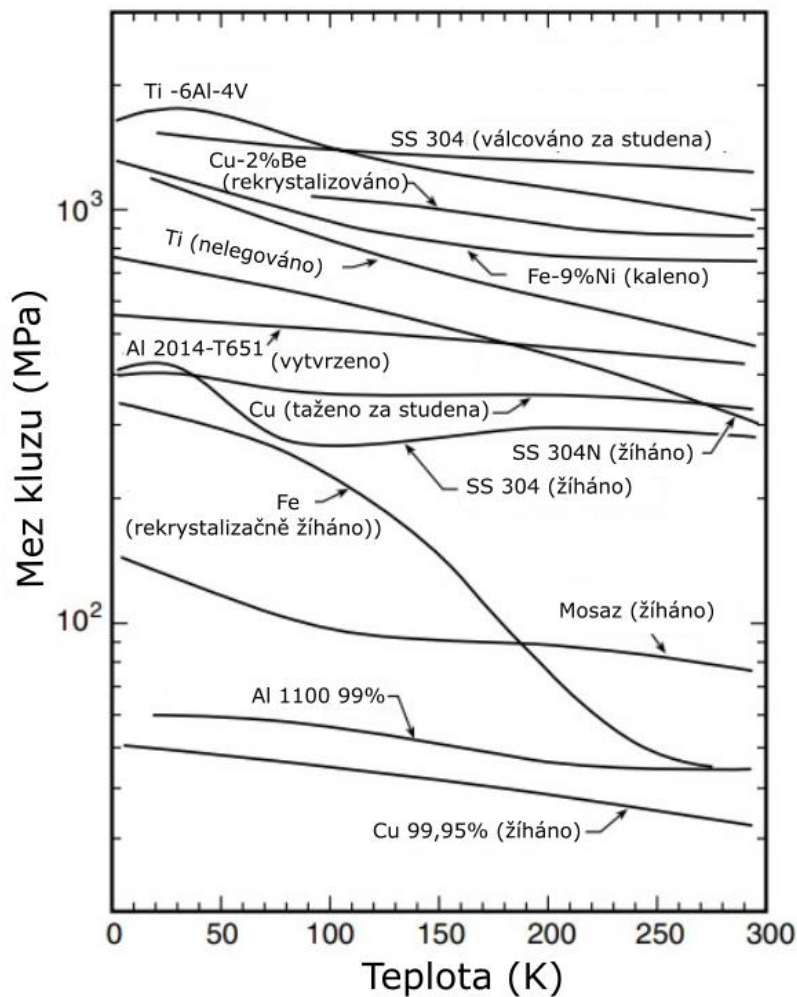
$$\varepsilon = \frac{\sigma_m}{E} [-] \quad (1.5.1)$$

Kde  $E$  je modul pružnosti v tahu (Youngův modul či modul elasticity) [MPa],  $\sigma_m$  je mechanické napětí [MPa] a  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} [-]$  je poměrné délkové prodloužení ( $l$  je označení pro délku zkoušeného vzorku [m] a  $\Delta l$  označujeme změnu délky tohoto vzorku [m]).

Modul pružnosti v tahu je určen vazebnými silami atomů a není tedy ovlivněn nečistotami uvnitř krystalické mřížky, jako jsou příměsi různých prvků při získávání slitin. Teplota velmi ovlivňuje vazební síly atomů v důsledku excitací (tepelným buzením mřížky). Při nízkých teplotách modul pružnosti roste a při vyšších teplotách klesá.

Mez kluzu ( $R_e$ ) je nejmenší tahové napětí od kterého se prodloužení vzorku začíná neúměrně zvyšovat, aniž by rostla tahová síla, po odstranění síly zůstane plastické prodloužení. Dochází k tzn. tečení materiálu a s ním k proměňování jeho fyzikálních vlastností. Mez kluzu charakterizuje přechod mezi elastickou a plastickou deformací. Není vždy přesně definována, a proto rozlišujeme mezi horní mezí kluzu a dolní mezí kluzu. Mez kluzu obecně roste při nízké teplotě.

Pružnost (elasticita či tuhost) je schopnost materiálu absorbovat energii při elastické deformaci a vrátit ji při nezatížení zpět. Maximální pružnost nastává v mezi kluzu a nazývá se modul pružnosti.



Obr. 1.11 Závislost meze kluzu na teplotě jednotlivých materiálů, upraveno [12]

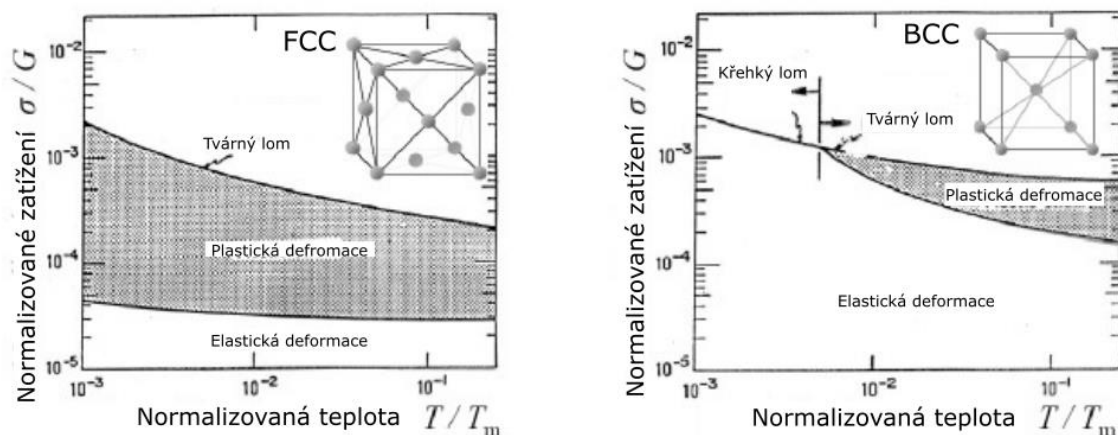
### Plastická deformace

Deformaci, kdy se po odstranění síly nevrátí těleso do původního tvaru, označujeme jako nepružnou nebo plastickou deformaci. Materiál nazýváme tvárný za předpokladu, že může být plasticky deformován bez porušení. V opačném případě ho označujeme za křehký. Tvárnost umožňuje obrábění a umožňuje využít materiál pro nadměrné zatížení. U kovů a kovových materiálů je tato vlastnost ovlivněna krystalovou strukturou a teplotou.

Materiály s plošně centrovanou kubickou mřížkou (FCC) jako jsou slitiny mědi a niklu, hliník a jeho slitiny, austenitické oceli, stříbro, olovo, měď, zlato, platina a inconel. Jsou tvárné i za nízkých teplot, a proto jsou vhodnější pro použití u nízkoteplotních aplikací z důvodu nižší náchylnosti na křehnutí, u některých kovů dokonce dochází k nárůstu houževnatosti. Dále se vyznačují mezi pevnosti závislejší na teplotě, než jejich mez kluzu.

U materiálů s kubickou mřížkou (BCC) jako jsou ostatní druhy feritických ocelí se při nízkých teplotách objevuje přechod tažný – křehký a plastická část deformace se neprojevuje. Mez kluzu i mez pevnosti je u těchto materiálů velmi závislá na teplotě.

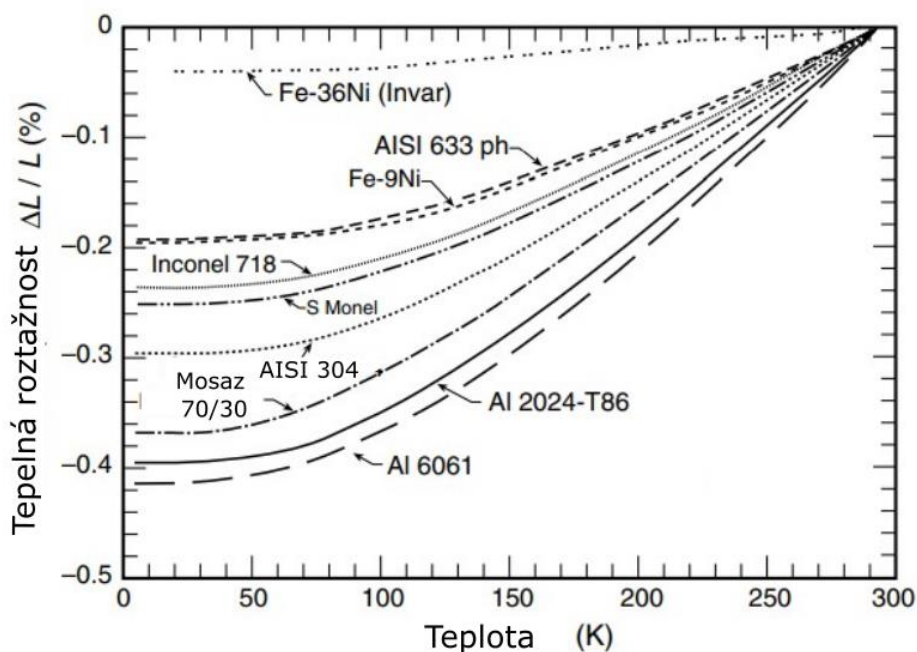
Ostatní struktury materiálů jako mají slitiny zinku, beryllia, hořčíku, kobaltu a titanu. Neexistuje obecná závislost změny plastické deformace na teplotě a závisí na příměsích a osách symetrie.



Obr. 1.12 Závislost normalizovaného zatížení na teplotě pro mřížky FCC a BCC, upraveno [10]

### 1.5.4 Tepelná roztažnost materiálů

Všechny materiály při ochlazení na nízké teploty změni své rozměry. Teplotní smrštění je typicky i v řádech několika desetin procenta změny objemu. U většiny materiálů mezi pokojovou teplotou a kryogenními teplotami. Součinitele teplotní roztažnosti různých materiálů se mohou lišit až o jeden řád. Vzhledem k tomu, že většina zařízení určených pro kryogenní systémy je vyrobena při pokojové teplotě z různých materiálů, jednou z hlavních obav je tepelné smrštění a související napětí, která mohou nastat, když jsou dva různé materiály spojeny. Úvaha o možnosti tepelné roztažnosti je zvláště důležitá pro návrh vakuových těsnění, nosných konstrukcí a izolačních systémů. [3]

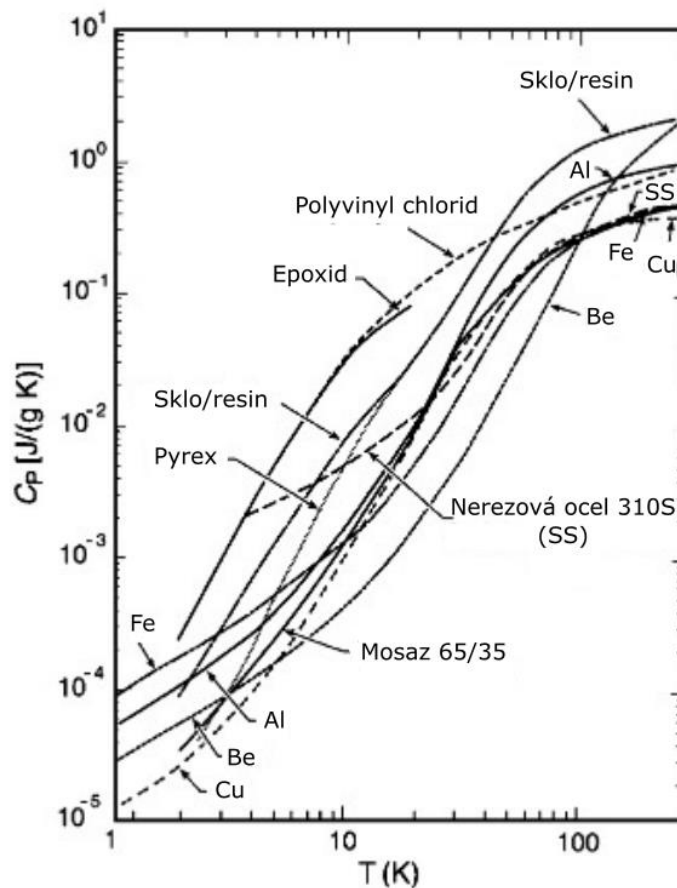


Obr. 1.13 Tepelná roztažnost vybraných materiálů v závislosti na teplotě [3]

### 1.5.5 Tepelná kapacita materiálů

Tepelná kapacita materiálů se ve většině případů snižuje se snižující teplotou. Tento jev je způsoben tím, že při nižších teplotách se snižuje excitace<sup>2</sup> atomů a molekul, jenž vede k nižší schopnosti materiálu absorbovat a udržovat teplo. To může mít vliv na výkon nízkoteplotních zařízení, protože nižší tepelná kapacita znamená, že materiál bude méně efektivní v udržování stabilní teploty [10].

U kovů se s klesající teplotou snižuje jak tepelná kapacita, tak i tepelná vodivost. U polymerů a izolačních materiálů může být tepelná kapacita a tepelná vodivost výrazně ovlivněna, zejména u materiálů, které jsou na bázi uhlíku. [10]



Obr. 1.14 Změna měrné tepelné kapacity vybraných látek v závislosti na teplotě v logaritmických souřadnicích [3]

<sup>2</sup> Tepelná excitace atomů neboli vybuzení je proces, při kterém se atomy v materiálu pohybují rychleji a vibrují větší amplitudou v důsledku přidání tepla. To zvyšuje jejich energii a umožňuje jim přenášet teplo z jednoho místa na druhé. [14]

## 1.6 Výměníky tepla

Tepelné výměníky jsou zařízení sloužící k přenosu tepelné energie mezi dvěma nebo více tekutinami, které mají odlišné teploty. Tato zařízení jsou využívána v mnoha různých oblastech, včetně výroby energie, chemických procesů, potravinářství, elektroniky, chladicích zařízeních i v dalších aplikacích. Podle konstrukčního provedení je možné výměníky tepla rozdělit na trubkové výměníky, deskové výměníky a regenerační výměníky. [2]

### 1.6.1 Trubkové výměníky

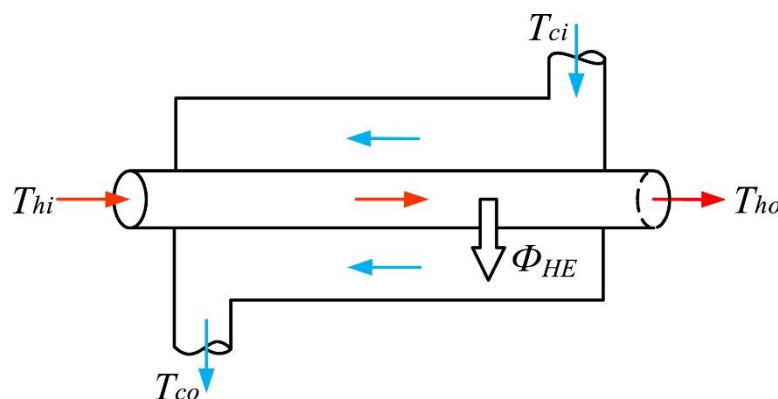
Jsou výměníky tepla vyrobené z trubek, jedna tekutina protéká uvnitř trubek a druhá vně. Vzhledem k možnostem konstrukce, délky trubek a plášťů umožňují širokou škálu jejich návrhu. Podle konstrukce můžeme běžně dostupné výměníky dále rozdělit na dvoutrubkové výměníky, plášťové výměníky a výměníky se spirálovou trubicí. [2]

#### Dvoutrubkové výměníky

Dvoutrubkové výměníky tepla (označované i jako trubka v trubce) jsou typem výměníků, které mají dvě oddělené trubky – jednu uvnitř druhé. Jedna tekutina protéká vnitřní trubicí a druhá tekutina protéká vnější trubicí. Teplo se přenáší mezi tekutinami skrze stěnu vnitřní trubky.

Tyto výměníky se používají v různých aplikacích, včetně chladicích systémů, vytápění domů a průmyslových procesů. Mohou být navrženy s řazením různých počtů trubek a roztečí trubek za sebou podle požadavků na tlakovou ztrátu a přestup tepla. Pro lepší přestup tepla se využívá protiproudého uspořádání proudů, pro zvýšení efektivity výměníku lze použít i více vnitřních trubek nebo můžeme použít i žebrované vnitřní trubky.

Dvoutrubkové výměníky se používají pro malé přenosové plochy (do 50 m<sup>2</sup>) při potřebě větší teplosměnné plochy je ekonomicky výhodnější použít výměník plášťový. Jsou vhodné i pro použití ve vysokých tlacích a teplotách. [2]

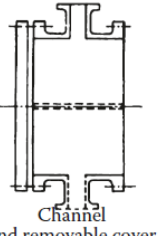
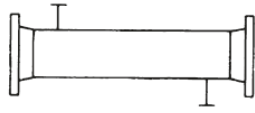
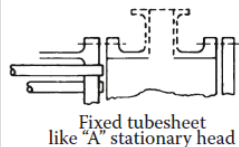
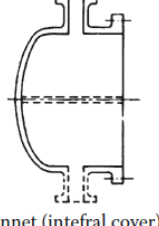
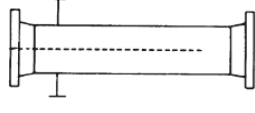
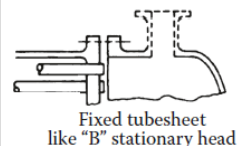
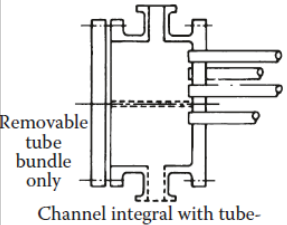

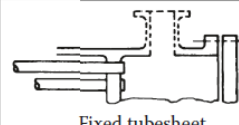
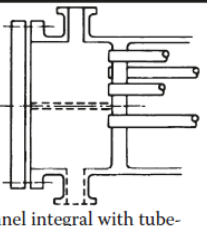
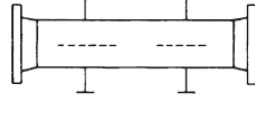
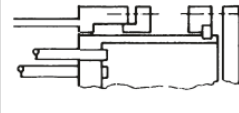
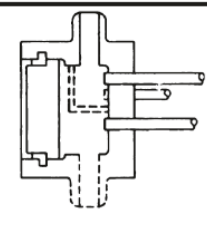
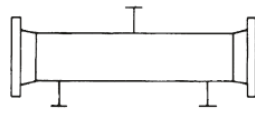
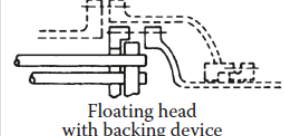
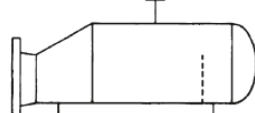
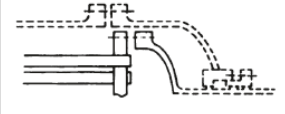
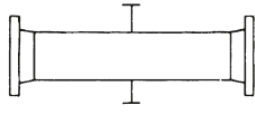
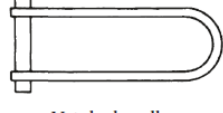
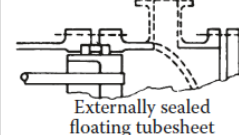


Obr. 1.15 Nejjednodušší provedení dvoutrubkového výměníku v protiproudém uspořádání ( $T_{hi}$  a  $T_{ho}$  označuje vstupující a vystupující teplotu chlazeného média,  $T_{ci}$  a  $T_{co}$  označuje vstupující a vystupující teplotu ohřivaného média a  $\Phi_{HE}$  naznačuje směr tepelného toku) [33]

#### Plášťové výměníky

Nejběžněji používaným typem výměníku – plášťový výměník tepla, který se skládá z jedné trubky umístěné uvnitř většího pláště. Jedna tekutina protéká trubicí a druhá tekutina se pohybuje v prostoru mezi trubicí a pláštěm. Teplota jedné tekutiny se přenáší na druhou tekutinu skrze stěny trubky. Dále se obvykle skládá z dalších částí jako jsou přední a zadní hlava, hradla, přepážky a trubkovnice. Používají se v širokém spektru aplikací jako jsou parogenerátory v elektrárnách, kondenzátory i v některých chladicích systémech. [2]

Mezi jejich největší výhodou patří, že mají dobrý poměr mezi hmotností, objemem k teplosměnné ploše, a také se snadno čistí. Nabízejí velké množství úprav pro zlepšení požadovaných parametrů. Díky jejich širokému rozšíření nalezneme velkou míru standardizace výroby těchto výměníků dle norem DIN, ASME nebo nejrozšířenější TEMA.

	Front end stationary head types	Shell types		Rear end head types
A	 Channel and removable cover	E  One pass shell	L	 Fixed tubesheet like "A" stationary head
B	 Bonnet (integral cover)	F  Two pass shell with longitudinal baffle	M	 Fixed tubesheet like "B" stationary head
C	 Removable tube bundle only Channel integral with tubesheet and removable cover	G  Split flow	N	 Fixed tubesheet like "N" stationary head
N	 Channel integral with tubesheet and removable cover	H  Double split flow	P	 Outside packed floating head
D	 Special high pressure closure	J  Divided flow	S	 Floating head with backing device
		K  Kettle type reboiler	T	 Pull through floating head
		X  Cross flow	U	 U-tube bundle
			W	 Externally sealed floating tubesheet

Obr. 1.16 Standardní typy předních hlav, plášťů a zadních hlav dle TEMA [2]

Tento systém označování zahrnuje třípísmenné kódové značení, které popisuje hlavní charakteristiky výměníku. Kód začíná písmenem, které určuje typ přední hlavy, další písmena určují typ konstrukce pláště a zadní hlavy nebo obrátové komory. [2]



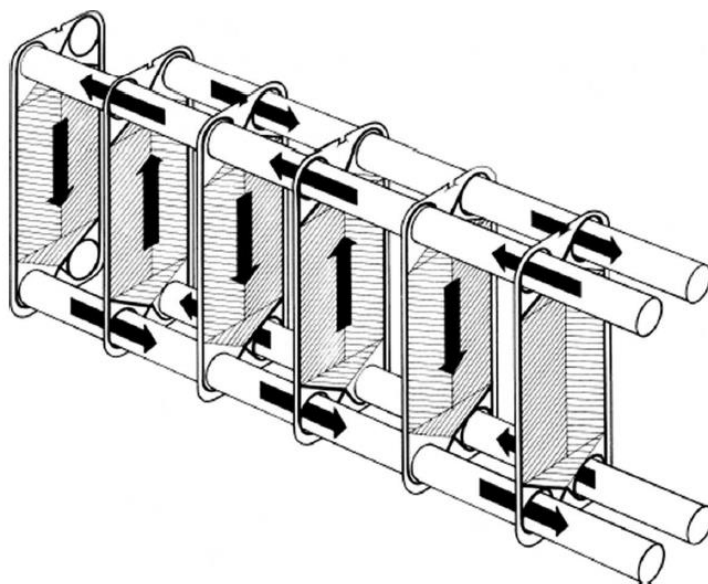
### Trubkové spirálové výměníky

Trubkové spirálové výměníky, též označované jako trubkové výměníky se šroubovitě vinutými trubkami. Skládají se ze svazku trubek, navinutých kolem trnu, který je umístěn v plášti. Trubky lze umístit do více vrstev, přičemž každou vrstvou může protékat jiné médium.

Mezi hlavní přednosti patří velká teplosměnná plocha vzhledem k zastavěnému prostoru. Ve spirálových trubkách navíc dochází oproti rovným trubkám k efektivnějšímu přestupu tepla. Jedná se o cenově velmi drahé výměníky z důvodu nutnosti vyšších nároků na materiály, pro navinutí trubek. Z důvodu použití malých průměrů trubek a, s ním spojeným problémům s čištěním, jsou tyto výměníky používány pouze pro čisté látky. [2]

### 1.6.2 Deskové výměníky

Deskové výměníky se skládají z tenkých desek, po kterých na každé straně teče jiné médium, pro zvýšení přestupu tepla bývají plechy zvlněny, tím se vytváří kanálky, kterými média proudí. Pro přívod a odvod médií do výměníku slouží tzv. porty – otvory umístěné v každém z rohů výměníku. Při vstupu do výměníku bývají po stranách umístěné přepážky pro rovnoměrné proudění média v celé délce kanálu. Tímto se tvoří dva oddělené prostory a v každém z nich proudí jiná tekutina.



Obr. 1.17 Deskový výměník v protiproudém uspořádání [2]

Jak již bylo zmíněno, u těchto výměníků používáme zvlněné plechy, jichž je docíleno prolisováním plechů. Samotný tvar tohoto prolisování ovlivňuje efektivitu přestupu tepla na jedné straně a tlakovou ztrátu na straně druhé a také zvyšuje mechanickou odolnost. Jsou používány různé vzory i kombinace zvlnění plechů výměníku. Běžně jsou vyráběné z nerezové oceli, pro specifičtější prostředí jsou vyráběné z titanu, grafitu nebo polymerů.

Dále lze tento druh výměníků rozdělit na svařované, polosvařované, pájené, těsněné (šroubované), spirálovité a plášťové výměníky. Podle technologie výroby a konstrukčního uspořádání jsou určeny provozní podmínky výměníků.

Mezi hlavní výhody těchto výměníků patří absence zkratových a obtokových proudů (oproti trubkovým výměníkům). Tím je zajištěno i efektivnější proudění průtočným kanálem, s kterým je spojeno turbulentní proudění s lepším přenosem tepla a nižším zanášením výměníku. Jsou kompaktnější než jiné typy výměníků, a to v některých případech

až o polovinu oproti trubkovým výměníkům. Nevýhody této konstrukce jsou především vysoká tlaková ztráta, ale ta se více projevuje až při vyšších rychlostech proudění a také nevhodnost použití pro vysoké tlaky. Dále nejsou vhodné pro výměníky par a plynů, podtlakové kondenzátory, tepelné výměníky látek s vysokým rozdílem hmotnostních průtoků, kapaliny s vysokou viskozitou a pro aplikace s nízkou rychlostí proudění.

Tyto výměníky jsou velmi oblíbené v průmyslu díky své ceně, kompaktnosti a vysoké účinnosti. Jsou široce využívány v různých aplikacích, jako jsou klimatizace, chlazení, ohřev vody, potravinářský a farmaceutický průmysl. Pájené hliníkové výměníky mohou být používány při tlacích do 100 barů a teplotách  $-269\text{ °C}$  až  $204\text{ °C}$  [16].

### 1.6.3 Regenerační výměníky

Regenerační výměníky fungují tak, že teplý plyn ohřívá matici, která předává teplo chladnějšímu plynu proudícímu protiproudě. V regenerátorech a výměnících tepla s úložným prostorem je použita stejná cesta (matrice), kterou obě tekutiny střídavě procházejí. Když horká tekutina prochází cestou, tepelná energie se ukládá do matrice. Během následujícího průtoku studenou tekutinou toutéž cestou je uložená energie z matrice uvolněna. V tomto případě se tepelná energie nepřenáší přes stěnu jako u výměníku tepla s přímým přenosem. Tyto výměníky rozdělujeme na výměníky s pevným ložem, pevnou maticí nebo rotačními výměníky. [2]

Rotační výměníky se nejčastěji používají jako ohříváky spalovacího vzduchu v kotlích a plynových turbínách a také v chladících jednotkách. Výměníky s pevnou maticí najdeme v metalurgickém a sklářském průmyslu v pecích. [19]

Mezi jejich hlavní výhody patří:

- konstrukční jednoduchost,
- zanášení výměníku nesnižuje účinnost výměníku (způsobuje tlakovou ztrátu),
- nevznikají napětí dané teplotní roztažností. [2]

Hlavní nevýhody této konstrukce jsou:

- částečné mísení proudů tekutin,
- v případě potřeby konstantního proudu nutnost další regulace. [2]

Z důvodu vlastností těchto výměníků jsou pro naše zadání nevhodné a dále se jimi nebudeme zabývat.

## 1.7 Teplonosné látky

Nepodařilo se nám nalézt standardní teplonosnou látku používanou ve vícestupňových chladicích zařízeních a vhodnou pro naše teploty. Jako možnost se nám tedy jeví použití kryogenních plynů jako teplonosné látky. Tyto plyny se běžně nacházejí v průmyslu a neměl by být problém s jejich dostupností.

### 1.7.1 Kryogenní plyny

#### Vzduch

Vzduch se může používat jako kryogenní teplonosná látka, tedy látka, která se používá k přenosu tepla při nízkých teplotách. Jedná se o nejčastěji používanou kryogenní látku, protože je běžně dostupná a levná. Vzduch se často používá v průmyslu při ochlazování a mrazicích operacích, například při mrazení potravin, v chemickém průmyslu nebo při výrobě elektroniky. Vzduch se může použít v tekutém stavu, kdy má teplotu okolo  $-196\text{ °C}$ , nebo v plynném stavu, kdy může mít teplotu až  $-190\text{ °C}$ . Využití vzduchu jako kryogenní teplonosné látky má několik výhod, například je to ekologická a bezpečná látka a snadno se získává a ukládá. [8]

#### Kyslík

Kyslík je další kryogenní látka, která se používá pro přenos tepla při velmi nízkých teplotách. Je využíván v mnoha průmyslových odvětvích, jako je například výroba oceli nebo v lékařské praxi pro kryochirurgické zákroky a skladování biologických vzorků. V plynném stavu za standardních podmínek<sup>3</sup>, ale při nízkých teplotách, se může zkapalnit, nebo dokonce ztuhnout v pevném stavu. V kapalném stavu má kyslík teplotu  $-183\text{ °C}$  a v pevném stavu až  $-218\text{ °C}$ . Kyslík má určité nevýhody, jako jsou zvýšená hořlavost a potřeba speciálních zařízení pro manipulaci s touto látkou. [8]

#### Dusík

Dusík se používá jako teplonosná látka pro přenos tepla při velmi nízkých teplotách. Tekutý dusík má teplotu varu  $-196\text{ °C}$  a je používán v mnoha odvětvích, jako je například výroba polovodičů, farmaceutický průmysl, nebo v laboratořích pro skladování biologických vzorků. Je bezbarvý, bez zápachu a bez chuti a lze ho snadno přepravovat v nádobách. Důležité je s dusíkem manipulovat opatrně, protože neopatrná manipulace může vést k udušení, pokud se používá v nevětraných prostorách. [8]

#### Vodík

Tekutý vodík je dobrá teplonosná látka pro přenos tepla při velmi nízkých teplotách, protože má nízkou teplotu varu  $-253\text{ °C}$  a velmi vysokou tepelnou kapacitu. Vodík se používá jako kryogenní látka v průmyslových odvětvích, jako je výroba elektroniky, výroba kosmických lodí, ale také jako palivo pro raketové motory. Nevýhodou vodíku je, že je vysoce hořlavý a vysoce explozivní, je důležité s ním manipulovat opatrně a s použitím vhodných bezpečnostních opatření. [8]

#### Hélium

Helium je další kryogenní látka, která se používá pro přenos tepla při velmi nízkých teplotách. Má nejnižší teplotu varu ze všech známých plynů  $-269\text{ °C}$  a v supravodivém stavu má vysokou tepelnou vodivost, jež umožňuje velmi efektivní přenos tepla. Helium se používá

---

<sup>3</sup> Standardní podmínky (zkráceně STP), přesněji standardní podmínky pro plyny, jsou definovány jako teplota  $0\text{ °C}$ , tlak  $10^5\text{ Pa}$ , tj.  $100\text{ kPa}$  dle NIST lze nalézt i jiné definice [37].

v mnoha průmyslových aplikacích, včetně výroby elektroniky, výroby kosmických lodí a jaderného průmyslu. Helium se také používá jako chladicí látka pro supravodivé magnety, které se používají v urychlovačích částic. Helium je drahé a je nutné s ním zacházet opatrně, protože může způsobit otravu při vdechnutí a manipulace s ním vyžaduje bezpečnostní opatření. [8]

### Metan

Metan je další látka, která může být použita jako teplonosná látka. Jedná se o nejjednodušší uhlovodík a jeho teplota varu je  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Metan se používá jako chladicí látka v různých průmyslových odvětvích, včetně potravinářského, chemického a petrochemického průmyslu. Lze, využít i jako palivo ve vozidlech či surovinu pro výrobu syntetického paliva. Bohužel je metan skleníkovým plynem a jeho využívání se snažíme omezit, aby se snížil dopad lidské činnosti na životní prostředí. [8]

### Argon

Argon je vzácný plyn, který je inertní a chemicky stabilní, což z něj dělá výhodnou látku pro spoustu použití. Je třetí nejhojněji zastoupený plyn v zemské atmosféře po dusíku a kyslíku. Je bezbarvý, bez zápachu, bez chuti a netoxický ve svých kapalných i plynných formách. Má nízkou teplotu varu  $-185,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Argon se také používá jako inertní atmosféra při svařování a řezání kovů. Využití také nachází v medicíně, kde slouží k uchování biologických vzorků. [8]

### Krypton

Krypton je vzácný plyn, jehož teplota varu je  $-152,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Používá se v různých průmyslových aplikacích, jako je například výroba kovů, izolace skel a vysokoteplotní pece. Vzniká při jaderných reakcích a jeho výskyt v určitých izotopech slouží k vyhodnocování těchto reakcí. Krypton má vysokou hustotu, což znamená, že se může používat jako zdroj ionizujícího záření v medicíně a vědeckém výzkumu. Krypton má také využití v osvětlení, jako jsou například reflektory a výbojky. [8]

Tab. 1.1 Vlastnosti vybraných látek [45]

	Parametry za STP <sup>3</sup>	Trojný bod		Kritický bod		
		Bod varu	Teplota	Tlak	Teplota	Tlak
		K	K	kPa	K	kPa
Vzduch	78,903	59,75	5,2646	132,63	3785,02	
Kyslík	90,1878	54,361	0,14628	154,581	5043	
Dusík	77,355	63,151	12,5198	126,192	12,5198	
Vodík	20,271	13,8033	7,041	32,938	1285,8	
Hélium	3,19	-	-	5,1953	228,32	
Metan	111,667	90,6941	11,696	190,564	4599,2	
Argon	87,302	83,8058	68,891	150,687	4863	
Krypton	119,73	11,775	73,5	209,48	5525	

### 1.7.2 Směsi kryogenních plynů

Směsi kryogenních látek mohou být používány jako teplonosné látky v kryogenních oblastech, protože mohou mít lepší tepelné vlastnosti než čisté látky a mohou být ekonomičtější, než použití pouze jedné látky. Ve většině případů přebírají tyto směsi vlastnosti od majoritně zastoupené látky. [8]

## 1.8 Materiály pro kryogenní aplikace

Na základě předchozí podkapitoly se ujasnily požadované vlastnosti a očekávané změny vlastností v závislosti na teplotě. Materiály používané v kryogenních aplikacích musí být schopny odolávat vysokému tlaku, korozi, oxidaci a křehkosti při nízkých teplotách. Kromě toho musí být materiály především schopny udržet pevnost a únavovou odolnost i při extrémně nízkých teplotách.

### 1.8.1 Oceli

Především se pro nízkoteplotní aplikace využívají austenitické oceli. Mají vynikající odolnost proti koroznímu působení agresivních prostředí, jako jsou například chloridy, kyseliny a soli. Je možné je dále dělit na nestabilní a stabilní podle toho, jestli vlivem poklesu teploty a působením deformace u nich dochází k martenzitické přeměně nebo si austenitickou strukturu zachovávají [29]. Tyto oceli se také vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi při nízkých teplotách a jsou vhodné pro aplikace s teplotami v rozmezí -200 °C až 600 °C. [17]

- DIN 1.4301, AISI 304, ČSN 17240

Nejběžnější nerezová ocel obsahující 18 % Cr (chromu) a 10 % Ni (niklu), která má vysokou odolnost vůči korozi a oxidaci a je odolná v širokém rozmezí teplot. Dále se vyznačuje dobrou svařitelností a je snadno zpracovatelná. Tato ocel se používá například pro výrobu nádob, potrubí, kuchyňských nástrojů a spotřebičů, sanitárního vybavení, elektrotechnických součástí a mnoha dalších aplikací. Nevýhodou je špatná obrobitelnost. [29]

- DIN 1.4404, AISI 316, ČSN 17349

Austenitická ocel s nízkým obsahem uhlíku, chromu a niklu, která se všeobecně vyznačuje vysokou odolností vůči korozi. Je to jedna z nejčastěji používaných ocelí v kryogenních aplikacích. Tato ocel má také vynikající svařitelnost a je obecně považována za materiál s nízkou reaktivitou. Často je používán v zařízeních, jako jsou nádrže na kapaliny, vakuové nádrže, potrubí atd. V nízkoteplotních aplikacích se tato ocel často používá jako materiál pro vnitřní stěny nádob a potrubí. [17]

- DIN 1.4541, AISI 321, ČSN 17246

Legovaná austenitická ušlechtilá ocel stabilizovaná titanem, vyznačující se stabilními vlastnostmi v širokém rozsahu teplot, výbornou pevností a korozní odolností. Svařitelná standardními metodami, dobře obrobitelná a jednoduchá na výrobu. Titan pomáhá zabránit vzniku karbidů při vyšších teplotách, což zajišťuje vysokou odolnost proti korozi a oxidaci v teplotním rozmezí od 500 °C do 900 °C. Tato ocel je tedy vhodná pro aplikace s vysokými teplotami, jako jsou například výfuková potrubí v leteckém a kosmickém průmyslu nebo různých druhů pecí. V kryogenních aplikacích může být použita v nižších teplotách až do -196 °C, ale není obvykle preferovanou volbou pro nízkoteplotní aplikace, vzhledem k její vyšší ceně a větší tvrdosti ve srovnání s jinými nerezovými ocelmi, které jsou více odolné proti nízkým teplotám. [18]

- DIN 1.4550 (1.4961), AISI 347

Austenitická ocel s přidavkem titanu, která má vysokou odolnost vůči korozi a tepelnou stabilitu. Tato ocel je vhodná pro aplikace v chemickém a petrochemickém průmyslu, ale také pro použití v kryogenní technice. Tato ocel se často používá v lyofilizačních zařízeních, kde je vyžadována vysoká čistota materiálu a odolnost proti korozi. Při nízkých teplotách se tato ocel chová vhodně a je schopna udržet své mechanické vlastnosti. [18]

- DIN 1.0503, AISI 1045, ČSN 12050

Vysokopevnostní ocel s obsahem uhlíku 0,15-0,22 %, manganu 1,20-1,50 %, chromu 0,80-1,20 % a molybdenu 0,15-0,25 %. Tento materiál je vhodný pro výrobu nástrojů a strojů, kde je potřeba odolnost proti opotřebení, korozi, únavě materiálu při opakovaném zatížení, vysoká pevnost a tvrdost. Využívá se v automobilovém, leteckém průmyslu nebo v energetice. Splňuje požadavky i pro použití v nízkoteplotních aplikacích. [30]

### 1.8.2 Duplexní nerezové oceli

Duplexní ocel je typ korozivzdorné oceli, která se skládá z austenitické a feritické fáze. Tyto fáze jsou přítomny v rovnovážném stavu a poskytují tak vysokou pevnost, odolnost proti korozi a vynikající mechanické vlastnosti. Díky tomu jsou vhodnými pro široké spektrum aplikací, včetně nízkoteplotních výměníků tepla. Oproti ostatním materiálům je jejich předností cena. [22]

- SAF 2205

Jedná se o vysoce korozivzdornou ocel s vynikající mechanickou pevností a odolností proti únavě. Její vlastnosti jsou využívány v mnoha aplikacích, jako jsou nízkoteplotní výměníky tepla, potrubí pro chemický průmysl, ropné a plynové turbíny atd. [22]

- SAF 2507

Je to mnohem odolnější ocel, než SAF 2205 a lze ji použít v náročných prostředích s vysokou korozi a teplotou. [22]

### 1.8.3 Nerezové slitiny Inconel

Inconel je materiál, který se používá především pro vysokoteplotní aplikace, ale některé jeho typy mohou být použity také pro nízkoteplotní aplikace. Lze je využít pro nízkoteplotní výměníky, protože mají dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči korozi při nízkých teplotách. Nevýhodou použití těchto materiálů může být cena a většinou je vhodnější použít jiné materiály, jako jsou austenitické nebo duplexní nerezové oceli [22]. Mají dobré nízkoteplotní vlastnosti a lze je použít při teplotách až kolem  $-196\text{ °C}$  [21].

- Inconel 625

Korozivzdorná niklová slitina s vysokou pevností a odolností proti korozi. Obsahuje nikl, chrom, molybden, niob a železo. Tato slitina je často používána v aplikacích, které vyžadují odolnost proti koroznímu působení při vysokých teplotách, jako jsou například chemické reaktory, potrubí v petrochemickém průmyslu, vysokoteplotní

pece a turbíny. Má také vynikající mechanické vlastnosti a odolnost proti únavě, díky tomu je častá v aplikacích, kde jsou materiály vystaveny cyklickému namáhání. [26]

- Inconel C-276

Nikl-molybdenum-chromium-tungsten superlegovaná ocel, která je vysoce odolná vůči korozivním účinkům a poskytuje vynikající odolnost v extrémních podmínkách, včetně nízkých teplot. Má dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči trhlinám. [26]

- Inconel 718

Inconel 718 je slitina niklu, chromu a molybdenu s přidavkem niobu a titanu. Je to vysokopevnostní slitina s vynikající odolností proti koroznímu a tepelnému namáhání. Je využívána v leteckém průmyslu, výrobě motorů, turbín, ale také v energetice a petrochemickém průmyslu. [26]

#### 1.8.4 Hliníkové slitiny

Hliníkové slitiny jsou používány pro výrobu nízkoteplotních výměníků díky své nízké hmotnosti, dobré tepelné vodivosti a odolnosti proti koroznímu působení v mnoha prostředích. Jejich nevýhodou je vysoká teplotní roztažnost, kdy jsou schopny změnit rozměr z počáteční pokojové teploty až k absolutní nule až o více než 0,4 % (viz obrázek 1.13). Tyto slitiny jsou vhodné pro aplikace s teplotami až do -270 °C [16].

- EN AW 2024

Nejvýznamnější slitina hliníku, používaná pro svou vysokou pevnost. Největší využití této slitiny je v letectví, kde se používá na konstrukci letadel, vrtulníků a raket. [34]

- EN AW-5083

Tato slitina má dobrou odolnost vůči korozi a dobrou svařitelnost. Používá se v kryogenních aplikacích, ale i v konstrukcích lodí a dalších námořních aplikacích. [34]

- EN AW-6061

Tato slitina má dobrou kombinaci pevnosti a tvárnosti, díky čemuž je vhodná pro různé aplikace, včetně nízkoteplotních. Používá se v leteckém a kosmickém průmyslu. [34]

- Al-Li slitiny (2195 Al-Li, 2196 Al-Li, 2050 Al-Li, 2060 Al-Li, 8090 Al-Li)

Tyto slitiny s lithiem mají vysokou pevnost a nízkou hmotnost, což je činí vhodnými pro aplikace v kosmickém průmyslu a v letectví. Mezi jejich velké nevýhody patří vysoká tepelná roztažnost.

#### 1.8.5 Měděné slitiny

Měděné slitiny se často používají v nízkoteplotních a kryogenních aplikacích díky svým vynikajícím vlastnostem, jako je vysoká tepelná vodivost, nízká tepelná roztažnost a dobrá korozní odolnost. Při určitých teplotách dokonce jejich tepelná vodivost roste se snižující teplotou a s vyšší čistotou materiálu [10]. Nevýhodou je vyšší cena [23]. Tyto materiály se dají využít až k -268 °C [21].

### 1.8.6 Titanové slitiny

Titanové slitiny se využívají díky své vysoké pevnosti, odolnosti proti korozi a dobrým mechanickým vlastnostem při nízkých teplotách. Nevýhodou je nižší teplotní vodivost. Tyto slitiny jsou vhodné pro aplikace s teplotami v rozmezí -250 °C až 400 °C. [32]

- Ti-Al6-V4

Titanová slitina označovaná také jako Grade 5. Obsahuje 6 % hmotnostního podílu hliníku a 4 % hmotnostního podílu vanadu. Tato slitina má vynikající mechanické vlastnosti, vysokou pevnost, odolnost proti únavě a dobrou korozní odolnost. Využívá se především v leteckém průmyslu, ale také v medicíně a sportovním průmyslu. [32]

- Ti-15-3

Tato slitina se často používá v leteckém a kosmickém průmyslu, kde je potřeba materiál s vysokou pevností a odolností proti korozi. Může být také použita v různých jiných aplikacích, jako jsou sportovní vybavení nebo chirurgické implantáty. [26]



## 2 Praktická část práce

V první části práce jsme se zabývali vlastnostmi látek a problematice přenosu tepla. V této části se budeme věnovat výběrem vhodného technického řešení a aplikaci předchozích vztahů. Projdeme si dvě možná řešení, přičemž jedno bude s využitím kryogenní teplonosné látky a jedno bude s použitím dostupného teplonosného média na hranici provozních parametrů.

### 2.1 Zadání

Ze zadání práce a z následujících konzultací se zadavatelem a řešerší dané problematiky jsme určili požadavky pro technické řešení:

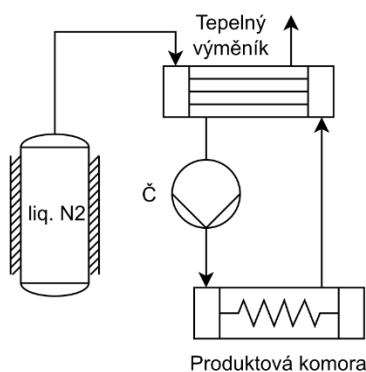
- tepelný výkon výměníku 2500 W,
- chlad do systému bude dodáván pomocí par dusíku,
- nepřímé chlazení s využitím teplonosné látky pro transport do produktové komory (lyofilizačního zařízení),
- dosáhnout teploty teplonosné látky minimálně  $-100\text{ °C}$  pro produktovou komoru zařízení.

### 2.2 Možné koncepce

Ze zadání tedy vyplývá, že pro chlazení produktové komory je využit systém nepřímého chlazení, kdy zdrojem chladu je „odpadní“ sytá pára z Dewarových nádob pro uskladnění kapalného dusíku. Tato pára o teplotě přibližně 77,35 K ( $-195,8\text{ °C}$ ) odebírá teplo teplonosnému médium v tepelném výměníku a následně je odvětrána do atmosféry. Ochlazené teplonosné médium je transportováno do tepelného výměníku produktové komory, kde odnímá teplo z vložených produktů. Ohřáté teplonosné médium je následně dopraveno zpět do tepelného výměníku a pracuje tak v uzavřeném okruhu.

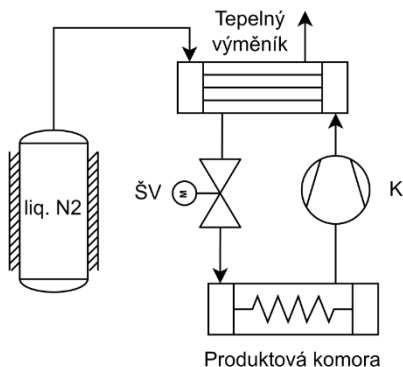
Chladicí výkon tepelného výměníku v produktové komoře je vhodné regulovat v závislosti na druhu vsázky a jejím množstvím, kdy v podstatě jedinou možností regulace výkonu je změna průtoku chladicí kapaliny tepelným výměníkem produktové komory. Rychlost regulace je závislá na provedení chladicího okruhu a vlastního tepelného výměníku, přičemž v případě nepřímého chlazení se nabízejí následující tři provedení chladicího okruhu:

- Kapalinový okruh – teplonosná látka se v celém okruhu vyskytuje pouze v kapalné fázi. Průtok teplonosné látky tepelným výměníkem je řízen oběhovým čerpadlem (Č). Při průchodu výměníkem se teplonosná látka ohřívá, čímž může docházet k nerovnoměrnému rozložení teplot v produktové komoře.



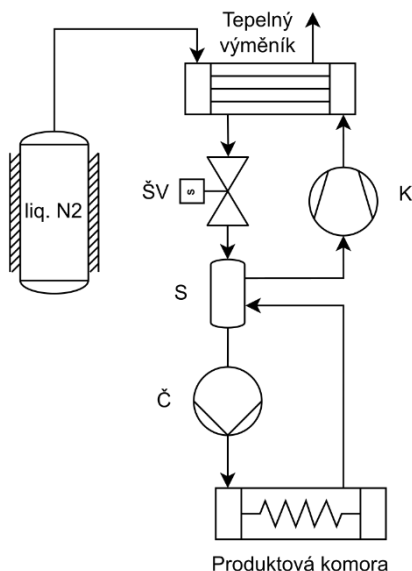
Obr. 2.1 Schématické zobrazení kapalinového chladicího okruhu

- Chladicí okruh s přímým výparem – tepelný výměník produktové komory slouží jako výparník pro teplotně nosnou látku, která vstupuje do tepelného výměníku. Teplotně nosné (chladicí) médium je nastříkáváno pomocí škrťacího ventilu (ŠV) do výměníku v produktové komoře v takovém množství, aby na výstupu z výměníku produktové komory byly přehřáté páry chladiva. Páry chladiva jsou odsávány kompresorem (K) a vřáněny do kondenzačního výměníku, chlazeného parami dusíku.



Obr. 2.2 Schématické zobrazení chladicího okruhu s přímým výparem

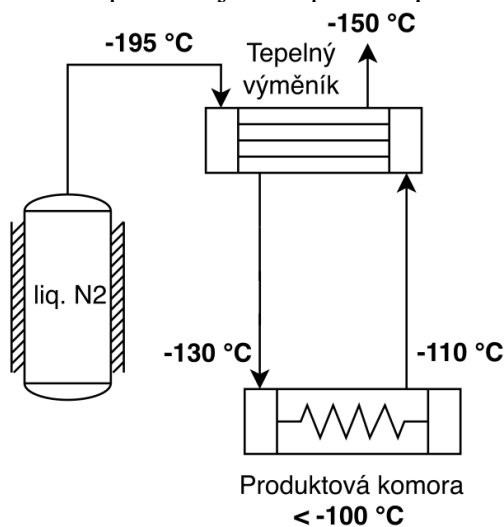
- Chladicí okruh se zatopeným výparníkem – Obdobně jak v předchozím případě slouží tepelný výměník produktové komory jako výparník pro teplotně nosnou látku. Na rozdíl od předchozího případu však ve výměníku produktové komory nedochází k úplnému odpaření teplotně nosného (chladicího) média. Chladicí médium tak na vstupu i výstupu z tepelného výměníku produktové komory prochází středotlakou nádobou, separátorem (S), ve kterém dochází k odloučení kapalně a plynně fáze. Kapalná fáze je přiváděna na vstup do produktového výměníku, zatímco plynná fáze je vedena do kondenzačního výměníku.



Obr. 2.3 Schématické zobrazení chladicího okruhu se zatopeným výparníkem

### 2.3 Stanovení provozních teplot

Před vlastní volbou vhodného chladicího média, byl proveden prvotní návrh provozních teplot teplosměnných médií tak, aby bylo dosaženo dostatečných teplotních spádů teplotního média na jednotlivých výměnících při co nejnížší spotřebě par dusíku.



Obr. 2.4 Schématické zobrazení chladicího okruhu s volbou provozních teplot

### 2.4 Volba technického řešení pro kryogenní látku

#### 2.4.1 Teplonosné látky

##### Vhodná pracovní média

Při provozu lyofilizačního zařízení je teplonosná látka buďto ve skupenství kapalném, nebo prochází fázovou změnou. Z čehož vyplývá, že maximální pracovní teplota teplonosné látky ( $-110\text{ °C}$ ) musí být nižší, než kritický bod. Z vhodných kryogenních látek tuto podmínku splňují pouze dvě a to:

- Metan – s kritickou teplotou  $-82,59\text{ °C}$
- Krypton – s kritickou teplotou  $-63,67\text{ °C}$

Vhodnou pracovní látkou tak mohou být tyto dvě látky v čisté podobě, případně ve směsi s další kryogenní látkou jako je například dusík.

#### 2.4.2 Volba koncepce

Na začátku této kapitoly byla nastíněna možná technická řešení nyní, se na jednotlivá technická řešení podíváme z pohledu použití zvolených teplonosných látek.

##### Kapalinový chladicí systém

U kapalinového chladicího systému obíhá teplonosná látka systémem v podobě podchlazené kapaliny. Při minimálním uvažovaném podchlazení kapaliny  $SC = 10\text{ K}$  na výstupu z produktového výměníku získáme minimální požadovaný pracovní tlak teplonosného média, který je uveden v tabulce 2.1 níže. Zde je dále uvedena hustota pracovního média pro střední teplotu a maximální tlak pracovního média, kterého by pracovní médium dosáhlo při izochorickém ohřevu z pracovních podmínek na teplotu okolí  $20\text{ °C}$ . Tento tlak reprezentuje tlak uvnitř systému při odstaveném zařízení při teplotě  $20\text{ °C}$ . Na tyto tlaky je zapotřebí zařízení pevnostně naddimenzovat. Vzhledem ke značné výši těchto tlaků se koncept čistě kapalinového chlazení jeví jako problematický.

Tab. 2.1 Parametry kryogenních látek pro kapalinový chladicí systém

	Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Metan [43]	Kritická teplota	$T_{c,m}$	-82,59	°C
	Kritický tlak	$p_{c,m}$	4,5992	MPa
	Minimální požadovaný tlak	$p_{min,m}$	2,6037	MPa
	Hustota pro střední teplotu	$\rho_m$	355,16	kg/m <sup>3</sup>
	Maximální tlak	$p_{max,m}$	111,18	MPa
Krypton [43]	Kritická teplota	$T_{c,k}$	-63,67	°C
	Kritický tlak	$p_{c,k}$	5,525	MPa
	Minimální požadovaný tlak	$p_{min,k}$	1,7522	MPa
	Hustota pro střední teplotu	$\rho_k$	2145,5	kg/m <sup>3</sup>
	Maximální tlak	$p_{max,k}$	145	MPa

### Systém s přímým výparem chladiva

U přímého výparu chladiva je teplotněsátá látka v podobě podchlazené kapaliny dávkována do tepelného výměníku v produktové komoře tak, aby na výstupu z produktové komory bylo dosaženo syté či mírně přehřáté páry. Teplotněsátá látka tak v produktovém výměníku (výparníku) prochází fázovou změnou, to znamená že teplotněsátou látkou (chladivem) je látka, jejíž kritický bod je vyšší než pracovní teplota. Obvykle je také požadováno, aby při pracovním bodu byl tlak pracovního média vyšší jak barometrický. Pokud je jako chladivo použita čistá látka či azeotropní směs<sup>4</sup> je teplota napříč produktovým výparníkem konstantní s výjimkou výstupní části, kde dochází k přehřátí chladiva.

Za provozu zařízení je přibližně 50 % pracovního objemu zaplněno kapalinou a dalších 50 % objemu plynem. Po odstavení zařízení a jeho ohřevu na teplotu 20 °C tak dochází k postupnému odpařování kapaliny a nárůstu tlaku v zařízení. Ten však není tak značný a pro obě uvažované kryogenní látky by se, v případě uvažované odpařovací teploty -120 °C konečný tlak v zařízení při teplotě 20 °C, pohyboval mezi 23 MPa a 24 MPa. Hodnota tohoto tlaku by se dala dále snížit připojením dodatečných objemů, které by umožnily expanzi plynu a tím snížení jeho tlaku.

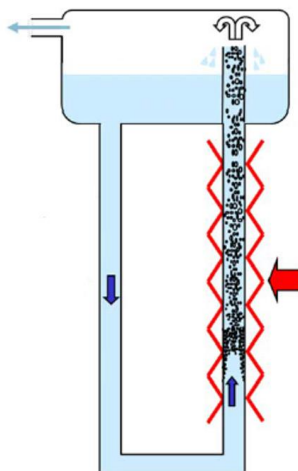
### Systém se zatopeným výparníkem

Systém se zatopeným výparníkem je průnikem dvou předchozích řešení. Do produktového výměníku je dopravována sytá kapalina, která se v produktovém výparníku vypařuje. Nedochází však k jejímu úplnému odpaření a produktový výměník opouští mokrá pára teplotněsáté kapaliny (chladiva). Mokrá pára z výstupu je vedena do středotlaké nádoby, kde se od sebe oddělí sytá kapalina a sytá pára, kdy sytá kapalina je navracena zpět do produktového chladiče a sytá pára je vedena do kondenzátoru. V kryogenní technice je tento způsob využíván v chladičích s otevřeným oběhem pracovní látky, kdy oběh pracovní látky je řízen rozdílem v hustotě kapalně a plynné fáze, tzv. termosifonový či přirozený oběh, viz obrázek 2.5 dále.

Toto řešení výparníku by poskytlo v produktovém výměníku konstantní teplotu po celé její ploše (v případě použití čisté látky nebo azeotropní směsi), což může být výhodou.

<sup>4</sup> Azeotropní směs – směs většinou dvou kapalných složek, která za určitého tlaku vře při určité stálé teplotě; rozeznávají se azeotropní směsi s maximálním nebo minimálním bodem varu větším nebo menším, než je bod varu čistých složek. [37]

Vzhledem k většímu objemu kapaliny však při odstavení zařízení dochází k vyššímu nárůstu tlaku, jehož konečná hodnota se bude pohybovat mezi maximálním tlakem obou předchozích variant.

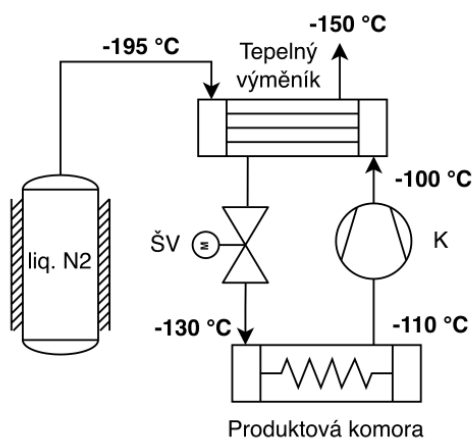


Obr. 2.5 Termosifonový neboli přirozený oběh, kde modrou šipkou je naznačen směr proudění kapaliny a červenou tepelný tok, upraveno [10]

### 2.4.3 Výsledná koncepce

Na základě předchozích kapitol byla pro další zpracování vybrána koncepce chlazení s přímým výparem pracovní látky, která nabízí nejnižší klidové tlaky. Uvažovanou pracovní látkou je zvolen krypton, který není považován za skleníkový plyn a který při klidových podmínkách vykazuje nižší hodnotu tlaku. Celková koncepce zařízení tedy bude následující:

- chlazení s přímým odparem chladiva,
- pracovní médium krypton,
- přehřátí v produktovém výparníku  $SH = 10\text{ K}$ ,
- odpařovací teplota  $-120\text{ °C}$  ve výměníku v produktové komoře,
- předpokládané stlačení v kompresoru 1,5 s izoentropickou kompresí a ohřátím o  $10\text{ K}$ ,
- chlazení kondenzátoru pomocí syté páry dusíku při atmosférickém tlaku,
- výstupní teplota par dusíku z kondenzátoru  $-150\text{ °C}$ .



Obr. 2.6 Schématické zobrazení chladicího okruhu s přímým výparem a zvolenými teplotami

## 2.5 Návrh výměníku pro kryogenní látku

### 2.5.1 Zadání

Na předcházejících stranách bylo objasněno technické řešení tohoto zařízení a z něho vyplývá následující zadání a požadavky na výměník.

- Požadovaný výkon výměníku  $Q_{\text{poz}} = 2,5 \text{ kW}$
- Základní parametry pracovních látek  
Tlak teplotnosné pracovní látky byl určen na základě určené vypařovací teploty výměníku produktové komory a předpokládaného stlačení kompresoru.

Tab. 2.2 Určené vstupní a výstupní parametry látek ve výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku[44]	Tlak	$p_{\text{atm}}$	0,1013	MPa
		Teplota na vstupu	$T_{\text{chl,in}}$	-195,8	°C
		Teplota na výstupu	$T_{\text{chl,out}}$	-150	°C
Teplotnosná látka	Krypton [43]	Tlak	$p_{\text{tl}}$	0,7618	MPa
		Teplota na vstupu	$T_{\text{tl,in}}$	-100	°C
		Teplota na výstupu	$T_{\text{tl,out}}$	-130	°C

### 2.5.2 Volba konstrukce výměníku

#### Volba typu výměníku

Volíme trubkový plášťový výměník ve vertikálním uspořádání trubek. Z důvodu snížení tlakových ztrát výměníku s využitím fázové změny.

#### Volba materiálu výměníku

V předchozích kapitolách jsem se věnovali výběru kryogenních materiálů. V případě naší aplikace a navrhovaného technického řešení není nutné uvažovat nad použitím nijak specifických materiálů pro tuto aplikaci. Především na základě tohoto faktoru můžeme zvolit obyčejnou ocel AISI 304, která se běžně používá při těchto teplotách u přepravy a zkapaňování LNG. Pokud bychom chtěli využít jako chladicí látku kapalně hélium či jinou látku s nižší teplotou než nyní, museli bychom se podívat po jiných materiálech, které jsou diskutovány v předchozích kapitolách, případně použít AISI 304L, která je upravenou verzí této oceli pro nízkoteplotní aplikace. Jako zdroj vlastností materiálu použijeme vztahy dostupné z NIST (Národní institut standardů a technologie USA)[35].

### 2.5.3 Návrh hlavních rozměrů výměníku

#### Odhad teplosměnné plochy výměníku

Střední logaritmický spád (LMTD) celého výměníku

$$\Delta T_1 = T_{\text{tl,out}} - T_{\text{chl,in}} = (-130) - (-195,8) = 65,8 \text{ °C} \quad (2.5.1)$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{tl,in}} - T_{\text{chl,out}} = (-100) - (-150) = 50 \text{ °C} \quad (2.5.2)$$

$$\Delta T_{\text{ln}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{65,8 - 50}{\ln\left(\frac{65,8}{50}\right)} = 57,54 \text{ °C} \quad (2.5.3)$$

Odhad součinitele prostupu tepla

$$k_{\text{odhad}} = 35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Odhad potřebné plochy výměníku ze vztahu

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T_{ln} \quad (2.5.4)$$

$$A_{odhad} = \frac{Q_{poz}}{k_{odhad} \cdot \Delta T_{ln}} = \frac{2500}{35 \cdot 57,54} = 1,241 \text{ m}^2 \quad (2.5.5)$$

### Volba rozměrů výměníku

Volba rozměrů trubky výměníku dle katalogu [46]

Tab. 2.3 Zvolené rozměry trubky výměníku

Vnější průměr trubky	D	8 mm
Vnitřní průměr trubky	d	6 mm
Efektivní délka trubky	$L_t$	1400 mm

Volba počtu trubek

$$N_{t,odhad} = \frac{A_{odhad}}{\pi \cdot D \cdot L_t} = \frac{1,1241}{\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4} = 35,28 \quad (2.5.6)$$

$$\rightarrow \text{volba } N_t = 42$$

Z důvodu snížení rozměrů a naddimenzování výměníku volíme vyšší počet trubek

Celková teplosměnná plocha výměníku

$$A = \pi \cdot D \cdot L_t \cdot N_t = \pi \cdot 0,008 \cdot 1,4 \cdot 42 = 1,478 \text{ m}^2 \quad (2.5.7)$$

Volba dalších parametrů [2]

Tab. 2.4 Volené další parametry výměníku

Konstanta pro rozteč trubek – Pitch Ratio	PR	1,5
Konstanta zohledňující počet chodů výměníku	CTP	0,93
Konstanta zohledňující uspořádání trubek	CL	0,87

Rozteč trubek [2]

$$P_T = D \cdot PR = 8 \cdot 1,5 = 12 \text{ mm} \quad (2.5.8)$$

$$S = CL \cdot P_T^2 = 0,87 \cdot 12^2 = 125,28 \text{ mm}^2 \quad (2.5.9)$$

Odhad průměru pláště ze vztahu [2]

$$N_t = CTP \frac{\pi \cdot D_s^2}{4 \cdot S} \quad (2.5.10)$$

$$D_{s,odhad} = \sqrt{\frac{4 \cdot S \cdot N_t}{\pi \cdot CTP}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 125,28 \cdot 42}{\pi \cdot 0,93}} = 84,87 \text{ mm} \quad (2.5.11)$$

$$\rightarrow \text{volba } D_s = 85 \text{ mm}$$

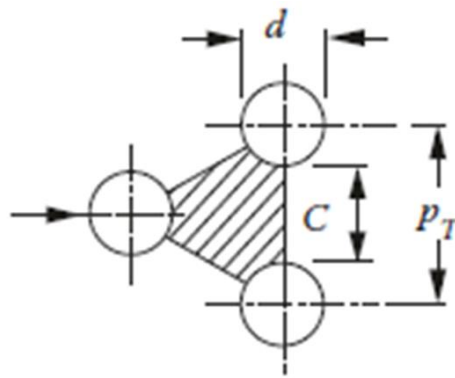
Ekvivalentní průměr pro trojúhelníkové uspořádání trubek [2]

$$D_e = \frac{4 \cdot \left( \frac{P_T^2 \cdot \sqrt{3}}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{8} \right)}{\frac{\pi \cdot D}{2}} = \frac{4 \cdot \left( \frac{12 \cdot \sqrt{3}}{4} - \frac{\pi \cdot 8^2}{8} \right)}{\frac{\pi \cdot 8}{2}} = \quad (2.5.12)$$

$$= 11,85 \text{ mm}$$

Volná vzdálenost mezi trubkami

$$C = P_T - D = 12 - 8 = 4 \text{ mm} \quad (2.5.13)$$



Obr. 2.7 Trojúhelníkové uspořádání trubek ve výměníku, upraveno [2]

### Volba přepážek

Volba rozteče přepážek

$$B = 100 \text{ mm}$$

Počet přepážek

$$N_b = \frac{L_t}{B} - 1 = \frac{1400}{100} - 1 = 13 \quad (2.5.14)$$

### Průtoky médií ve výměníku

Průtočná plocha pláště

$$A_s = \frac{D_s \cdot C \cdot B}{P_T} = \frac{85 \cdot 4 \cdot 100}{12} = 2833, \bar{3} \text{ m}^2 \quad (2.5.15)$$

Průtočná plocha trubek

$$A_t = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,27 \text{ mm}^2 \quad (2.5.16)$$

Z bilanční rovnice určíme hmotnostní toky teplotných látek

$$Q = \dot{m}_1 \cdot \Delta h_1 = \dot{m}_2 \cdot \Delta h_2 \quad (2.5.17)$$



Tab. 2.5 Parametry pracovních látek na vstupu a výstupu výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku[44]	Vstupní entalpie	$h_{chl,in}$	77,16	kJ/kg
		Výstupní entalpie	$h_{chl,out}$	126,48	kJ/kg
Teplonosná látka	Krypton [43]	Vstupní entalpie	$h_{tl,in}$	117,20	kJ/kg
		Výstupní entalpie	$h_{tl,out}$	12,63	kJ/kg

Hmotnostní tok chladícího média

$$\dot{m}_{chl} = \frac{Q_{poz}}{h_{chl,out} - h_{chl,in}} = \frac{2,5}{126,48 - 77,16} = 0,0507 \frac{kg}{s} \quad (2.5.18)$$

Hmotnostní tok teplonosné látky

$$\dot{m}_{tl} = \frac{Q_{poz}}{h_{tl,in} - h_{tl,out}} = \frac{2,5}{117,20 - 12,63} = 0,0239 \frac{kg}{s} \quad (2.5.19)$$

Měrný hmotnostní tok chladícího média

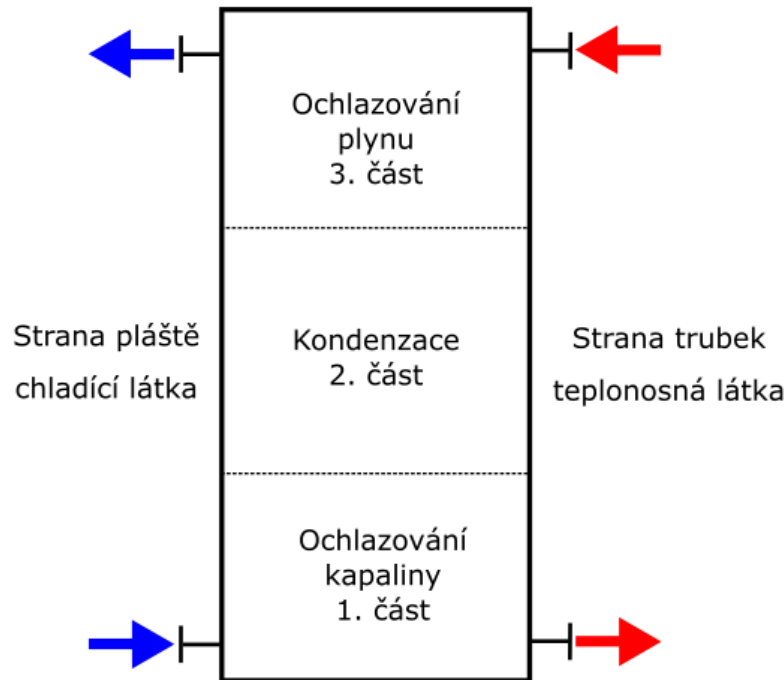
$$G_{chl} = \frac{\dot{m}_{chl}}{A_s} = \frac{0,0507}{3333,3 \cdot 10^{-6}} = 15,21 \frac{kg}{s \cdot m^2} \quad (2.5.20)$$

Měrný hmotnostní tok teplonosné látky v jedné trubce

$$G_{tl} = \frac{\dot{m}_{tl}}{A_t \cdot N_t} = \frac{0,0239}{28,27 \cdot 10^{-6} \cdot 42} = 20,13 \frac{kg}{s \cdot m^2} \quad (2.5.21)$$

### 2.5.4 Výpočet 1. části výměníku

Z důvodu změny skupenství teplotnosné látky a pro usnadnění výpočtu volíme výpočet výměníku po částech a dělíme výměník na tři části – ochlazování par teplotnosného média, změnu skupenství teplotnosného média a chlazení teplotnosného média v kapalně formě. Pořadí výpočtu je určeno z důvodu znalosti parametrů teplotnosné látky při fázové změně oproti chladicí látce, kde musíme parametry dopočítat.



Obr. 2.8 Schématické rozdělení výměníku pro výpočet

### Vstupy a výstupy z této části výměníku

Tab. 2.6 Parametry pracovních látek na vstupu a výstupu první části výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku[44]	Vstupní teplota	$T_{chl,in}$	-195,8	°C
		Vstupní entalpie	$h_{chl,in}$	77,16	kJ/kg
Teplotnosná látka	Krypton [43]	Vstupní teplota	$T_{tl,21}$	-128,2	°C
		Výstupní teplota	$T_{tl,out}$	-130	°C
		Vstupní entalpie	$h_{tl,21}$	18,26	kJ/kg
		Výstupní entalpie	$h_{tl,out}$	12,63	kJ/kg

Z bilanční rovnice (2.5.17) určíme entalpii chladicího média na výstupu

$$\begin{aligned}
 h_{chl,12} &= \frac{\dot{m}_{tl}}{\dot{m}_{chl}} (h_{tl,21} - h_{tl,out}) + h_{chl,in} = \\
 &= \frac{0,0236}{0,0507} (18,26 - 12,63) + 77,16 = 79,82 \frac{kJ}{kg}
 \end{aligned}
 \tag{2.5.22}$$

Na základě entalpie určíme teplotu chladicího média na výstupu [44]

$$T_{chl,12} = -193,42 \text{ °C}$$

### Výkon této části výměníku

$$Q_1 = \dot{m}_{tl} \cdot (h_{tl,21} - h_{tl,out}) = 0,0239 \cdot (18,26 - 12,63) = 134,72 \text{ W} \quad (2.5.23)$$

### Vlastnosti látek

Vlastnosti látek určíme ze středních hodnot teplot pro danou část výměníku.

Střední teplota teplotnosné látky

$$T_{ch,tl,1} = \frac{T_{tl,out} + T_{tl,21}}{2} = \frac{(-130) + (-128,2)}{2} = -129,0 \text{ °C} \quad (2.5.24)$$

Střední teplota chladicí látky

$$T_{ch,chl,1} = \frac{T_{chl,in} + T_{chl,12}}{2} = \frac{(-195,8) + (-193,4)}{2} = -194,6 \text{ °C} \quad (2.5.25)$$

Střední teplota stěny

$$T_{w,1} = \frac{T_{ch,chl,1} + T_{ch,tl,1}}{2} = \frac{(-194,6) + (-129,1)}{2} = -161,9 \text{ °C} \quad (2.5.26)$$

Vlastnosti médií byly zjištěny z programu CoolProp 6.4 [44] pro dusík a pomocí RefProp 10 [43] pro krypton. Tepelná vodivost materiálu byla zvolena dle vztahů NIST (Národní institut standardů a technologie USA) [35], určeno v příloze 4.

Tab. 2.7 Vlastnosti médií a materiálu v první části výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku [44]	Tepelná vodivost	$\lambda_{chl,1}$	0,0073	W/(m·K)
		Prandtlovo číslo	$Pr_{chl,1}$	0,8463	-
		Střední viskozita látky	$\mu_{chl,1}$	5,5248	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
		Viskozita látky u stěny	$\mu_{w,chl,1}$	7,6917	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
Teplotnosná látka	Krypton [43]	Tepelná vodivost	$\lambda_{tl,1}$	0,0756	W/(m·K)
		Prandtlovo číslo	$Pr_{tl,1}$	1,7575	-
		Střední viskozita látky	$\mu_{tl,1}$	240,35	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
Materiál výměníku	AISI 304[35]	Tepelná vodivost	$\lambda_{m,1}$	9,7416	W/(m·K)

### Střední logaritmický spád LMTD

$$\Delta T_{1,1} = T_{tl,out} - T_{chl,in} = (-130) - (-195,8) = 65,8 \text{ °C} \quad (2.5.27)$$

$$\Delta T_{2,1} = T_{tl,21} - T_{chl,12} = (-128,2) - (-193,4) = 65,2 \text{ °C} \quad (2.5.28)$$

$$\Delta T_{ln1} = \frac{\Delta T_{1,1} - \Delta T_{2,1}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{1,1}}{\Delta T_{2,1}}\right)} = \frac{65,8 - 65,2}{\ln\left(\frac{65,8}{65,2}\right)} = 65,5 \text{ °C} \quad (2.5.29)$$

### Součinitel přestupu tepla na straně pláště

Reynoldsovo číslo chladicího média

$$Re_{chl,1} = \frac{G_{chl} \cdot D_e}{\mu_{chl,1}} = \frac{17,89 \cdot 0,0118}{5,5248 \cdot 10^{-6}} = 38\,363 \quad (2.5.30)$$

$10^4 < Re_{chl,1} \rightarrow$  turbulentní proudění

Nusseltovo číslo pro proudění pláštěm dle McAdamse [2]

$$\begin{aligned} Nu_{chl,1} &= 0,36 \cdot Re_{chl,1}^{0,55} \cdot Pr_{chl,1}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu_{chl,1}}{\mu_{w,chl,1}} \right)^{0,14} \\ &= 0,36 \cdot 38363^{0,55} \cdot 0,8463^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{5,5248 \cdot 10^{-6}}{7,6917 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 107,94 \end{aligned} \quad (2.5.31)$$

Z definice Nusseltova čísla rovnice (1.3.6) určíme součinitel přestupu tepla na straně pláště.

$$\alpha_{chl,1} = \frac{Nu_{chl,1} \cdot \lambda_{chl,1}}{D_e} = \frac{107,94 \cdot 0,0073}{0,0118} = 66,54 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.5.32)$$

### Součinitel přestupu tepla na straně trubek

Reynoldsovo číslo teplotnosné látky

$$Re_{tl,1} = \frac{G_{tl} \cdot d}{\mu_{tl,1}} = \frac{20,13 \cdot 0,006}{240,35 \cdot 10^{-6}} = 502,56 \quad (2.5.33)$$

$Re_{tl,1} < 2300 \rightarrow$  laminární proudění

Nuseltovo číslo pro laminární proudění [1], uvažujeme délku trubky  $L_{t,1}=0,06$  m

$$\begin{aligned} Nu_{tl,1} &= (Nu_1^3 + 0,7^3 + (Nu_2 - 0,7)^3)^{\frac{1}{3}} \\ &= (3,66^3 + 0,7^3 + (7,19 - 0,7)^3)^{\frac{1}{3}} = 6,86 \end{aligned} \quad (2.5.34)$$

kde

$$Nu_1 = 3,66 \quad (2.5.35)$$

$$\begin{aligned} Nu_2 &= 1,615 \cdot \left( Pr_{tl,1} \cdot Re_{tl,1} \cdot \frac{d}{L_{t,1}} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &= 1,615 \cdot \left( 1,7575 \cdot 502,6 \cdot \frac{0,006}{0,06} \right)^{\frac{1}{3}} = 7,19 \end{aligned} \quad (2.5.36)$$

Z definice Nusseltova čísla rovnice (1.3.6) určíme součinitel přestupu tepla uvnitř trubek.

$$\alpha_{tl,1} = \frac{Nu_{tl,1} \cdot \lambda_{tl,1}}{d} = \frac{8,86 \cdot 0,0756}{0,006} = 86,49 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.5.37)$$

### Koeficient prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla pro trubky je určen [42]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + R_{fo} + \frac{A_o}{\lambda_w} \cdot \ln \frac{A_o}{A_m} + \left(R_{fi} + \frac{1}{\alpha_t}\right) \cdot \frac{A_o}{A_i}} \quad (2.5.38)$$

kde

- $\alpha_s$  je součinitel přestupu tepla vně trubky [W/ (m<sup>2</sup>·K)],
- $R_{fo}$  je odpor zanášením vně trubky výměníku [K·m<sup>2</sup>/W], pro naši aplikaci neuvažujeme,
- $R_{fi}$  je odpor zanášením uvnitř trubky výměníku [K·m<sup>2</sup>/W], pro naši aplikaci neuvažujeme,
- $\lambda_w$  je součinitel tepelné vodivosti trubky výměníku [W/ (m·K)],
- $\alpha_t$  je součinitel přestupu tepla uvnitř trubky [W/ (m<sup>2</sup>·K)],
- $A_o$  je celková plocha přestupu tepla [m<sup>2</sup>],
- $A_i$  je vnitřní plocha trubky pro přestupu tepla [m<sup>2</sup>],
- $A_m$  je střední efektivní plocha přestupu tepla [m<sup>2</sup>].

Přičemž pro případ bez žebek a bez uvažování zanášení, lze tento vztah zjednodušit:

$$\frac{A_o}{A_m} \rightarrow \frac{r_o}{r_o + r_i} \quad \frac{A_o}{A_i} \rightarrow \frac{r_o}{r_i}$$

Potom platí

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{r_o}{\lambda_w} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{\alpha_t} \cdot \frac{r_o}{r_i}} \quad (2.5.39)$$

Odtud pro náš případ

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{chl,1}} + \frac{r_o}{\lambda_{m,1}} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{\alpha_{tl,1}} \cdot \frac{r_o}{r_i}} = \quad (2.5.40)$$

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{66,54} + \frac{0,004}{9,742} \cdot \ln \frac{0,004}{0,003} + \frac{1}{86,49} \cdot \frac{0,004}{0,003}} = 32,72 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

kde

$$r_o = \frac{D}{2} = \frac{0,008}{2} = 0,004 \text{ m} \quad (2.5.41)$$

$$r_i = \frac{d}{2} = \frac{0,006}{2} = 0,003 \text{ m} \quad (2.5.42)$$

### Teplosměnná plocha této části výměníku

Teplosměnnou plochu určíme z rovnice (2.5.4)

$$A_1 = \frac{Q_1}{k_1 \cdot \Delta T_{ln,1}} = \frac{237,92}{32,72 \cdot 65,52} = 0,063 \text{ m}^2 \quad (2.5.43)$$

### Délka trubek této části výměníku

$$L_{t,1} = \frac{A_1}{\pi \cdot D \cdot N_t} = \frac{0,063}{\pi \cdot 0,008 \cdot 42} = 0,0595 \text{ m} \quad (2.5.44)$$

## 2.5.5 Výpočet 2. části výměníku

### Vstupy a výstupy z této části výměníku

Tab. 2.8 Parametry pracovních látek na vstupu a výstupu druhé části výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku[44]	Vstupní teplota	$T_{chl,12}$	-193,4	°C
		Vstupní entalpie	$h_{chl,12}$	79,82	kJ/kg
Teplonosná látka	Krypton [43]	Vstupní teplota	$T_{tl,32}$	-128,2	°C
		Výstupní teplota	$T_{tl,21}$	-128,2	°C
		Vstupní entalpie	$h_{tl,32}$	110,66	kJ/kg
		Výstupní entalpie	$h_{tl,21}$	18,26	kJ/kg

Z bilanční rovnice (2.5.17) určíme entalpii chladicího média na výstupu z této části výměníku

$$h_{chl,23} = \frac{\dot{m}_{tl}}{\dot{m}_{chl}} (h_{tl,32} - h_{tl,21}) + h_{chl,12} = \quad (2.5.45)$$

$$= \frac{0,0239}{0,0507} (110,66 - 18,26) + 79,82 = 123,40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Na základě entalpie určíme teplotu chladicího média na výstupu z této části výměníku [44]

$$T_{chl,23} = -152,92 \text{ °C}$$

### Výkon této části výměníku

$$Q_2 = \dot{m}_{tl} \cdot (h_{tl,23} - h_{tl,12}) = 0,0239 \cdot (110,66 - 18,26) = 2209 \text{ W} \quad (2.5.46)$$

### Vlastnosti látek

Vlastnosti látek určíme ze středních hodnot teplot pro danou část výměníku.

Střední teplota teplotnosné látky

$$T_{tl,2} = \frac{T_{tl,32} + T_{tl,21}}{2} = \frac{(-128,2) + (-128,2)}{2} = -128,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.47)$$

Střední teplota chladicí látky

$$T_{ch,chl,2} = \frac{T_{chl,23} + T_{chl,12}}{2} = \frac{(-152,9) + (-193,4)}{2} = -173,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.48)$$

Střední teplota stěny

$$T_{w,2} = \frac{T_{ch,chl,2} + T_{ch,tl,2}}{2} = \frac{(-128,2) + (-173,2)}{2} = -150,67 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.49)$$

Tab. 2.9 Vlastnosti médií a materiálu v druhé části výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látko	Páry dusíku[44]	Tepelná vodivost	$\lambda_{chl,2}$	0,0094	W/(m·K)
		Prandtlovo číslo	$Pr_{chl,2}$	0,7950	-
		Střední viskozita látky	$\mu_{chl,2}$	6,9576	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
		Viskozita látky u stěny	$\mu_{w,chl,2}$	8,4006	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
Teplotnosná látko	Krypton[43]	Tepelná vodivost v kapalném skupenství	$\lambda_{tl,1,2}$	0,0749	W/(m·K)
		Prandtlovo číslo	$Pr_{tl,1,2}$	1,7493	-
		Střední viskozita látky v kapalném skupenství	$\mu_{tl,1,2}$	235,52	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
		Střední viskozita látky v plynném skupenství	$\mu_{tl,g,2}$	12,973	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
		Kritický tlak plynu	$p_{tl,krit}$	5,5	MPa
Materiál výměníku	AISI 304[35]	Tepelná vodivost	$\lambda_{m,2}$	10,20	W/(m·K)

### Střední logaritmický spád LMTD

$$\Delta T_{1,2} = T_{tl,21} - T_{chl,12} = (-128,2) - (-193,4) = 65,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.50)$$

$$\Delta T_{2,2} = T_{tl,32} - T_{chl,23} = (-128,2) - (-152,9) = 24,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.51)$$

$$\Delta T_{ln2} = \frac{\Delta T_{1,2} - \Delta T_{2,2}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{1,1}}{\Delta T_{2,1}}\right)} = \frac{65,2 - 24,7}{\ln\left(\frac{65,2}{24,7}\right)} = 41,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.52)$$

### Součinitel přestupu tepla na straně pláště

Reynoldsovo číslo chladícího média

$$Re_{chl,2} = \frac{G_{chl} \cdot D_e}{\mu_{chl,2}} = \frac{17,9 \cdot 0,0118}{6,958 \cdot 10^{-6}} = 30\,463 \quad (2.5.53)$$

$10^4 < Re_{chl,2} \rightarrow$  turbulentní proudění

Nusseltovo číslo pro proudění pláštěm dle McAdamse [2]

$$\begin{aligned} Nu_{chl,2} &= 0,36 \cdot Re_{chl,2}^{0,55} \cdot Pr_{chl,2}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu_{chl,2}}{\mu_{w,chl,2}} \right)^{0,14} \\ &= 0,36 \cdot 30463^{0,55} \cdot 0,7927^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{6,958 \cdot 10^{-6}}{8,401 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 95,00 \end{aligned} \quad (2.5.54)$$

Z definice Nusseltova čísla rovnice (1.3.6) určíme součinitel přestupu tepla na straně pláště.

$$\alpha_{chl,2} = \frac{Nu_{chl,2} \cdot \lambda_{chl,2}}{D_e} = \frac{95,00 \cdot 0,0094}{0,0118} = 75,21 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.5.55)$$

### Součinitel přestupu tepla na straně trubky

Pro kondenzaci ve vertikálních trubkách lze použít vztah pro okamžitou hodnotu Nusseltova čísla [36]

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \left\{ (1-x)^{0,8} + \frac{3,8(1-x)^{0,04} \cdot x^{0,76}}{p^{*0,38}} \right\} \quad (2.5.56)$$

Kde jsou podobnostní čísla Nu, Re a Pr pro kapalně skupenství, x označuje hmotnostní podíl plynné fáze,  $p^*$  je definováno jako poměr tlaku fázové změny ke kritickému tlaku tekutiny.

Pro získání průměrné hodnoty Nusseltova čísla použijeme integraci.

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1}^{L_2} Nu \, dL \quad (2.5.57)$$

Kde  $L_1$  a  $L_2$  jsou okraje zkoumaného úseku a k nim jsou přiřazeny hmotnostní podíly  $x_1$  a  $x_2$ .



Dostaneme

$$Nu = \frac{0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}}{x_2 - x_1} \left[ -\frac{(1-x)^{1,8}}{1,8} + \frac{3,8}{p^{*0,38}} \left( \frac{x^{1,76}}{1,76} - \frac{0,04x^{2,76}}{2,76} \right) \right]_{x_1}^{x_2} \quad (2.5.58)$$

Tento vztah upravíme pro náš případ kompletní fázové přeměny tj,  $x_1=0$  a  $x_2=1$ .

Výsledný vztah pro náš případ lze zapsat

$$\begin{aligned} Nu_{tl,2} &= 0,023 \cdot Re_{tl,l,2}^{0,8} \cdot Pr_{tl,l,2}^{0,4} \cdot \left( \frac{2,104}{p^{*0,38}} + \frac{1}{1,8} \right) = & (2.5.59) \\ &= 0,023 \cdot 512,86^{0,8} \cdot 1,749^{0,4} \cdot \left( \frac{2,104}{0,1385^{0,38}} + \frac{1}{1,8} \right) = 21,24 \end{aligned}$$

kde

$$p^* = \frac{p_{tl}}{p_{krit}} = \frac{0,762}{5,5} = 0,1385 \quad (2.5.60)$$

Reynoldsovo číslo teplotnosné látky pro kapalně skupenství

$$Re_{tl,l,2} = \frac{G_{tl} \cdot d}{\mu_{tl,l,2}} = \frac{20,13 \cdot 0,006}{235,52 \cdot 10^{-6}} = 512,86 \quad (2.5.61)$$

Z definice Nusseltova čísla rovnice (1.3.6) určíme součinitel přestupu tepla uvnitř trubek.

$$\alpha_{tl,2} = \frac{Nu_{tl,2} \cdot \lambda_{tl,2}}{d} = \frac{21,12 \cdot 0,0749}{0,006} = 265,09 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.5.62)$$

### Koeficient prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla je určen stejným způsobem, jako v předchozí části výměníku vyjdeme z rovnice (2.5.39).

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{chl,2}} + \frac{r_0}{\lambda_{m,2}} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{\alpha_{tl,2}} \cdot \frac{r_o}{r_i}} = & (2.5.63) \\ &= \frac{1}{\frac{1}{75,21} + \frac{0,004}{10,20} \cdot \ln \frac{0,004}{0,003} + \frac{1}{265,1} \cdot \frac{0,004}{0,003}} = 54,23 \frac{W}{m^2 \cdot K} \end{aligned}$$

**Teplosměnná plocha této části výměníku**

Teplosměnnou plochu vyjdeme z rovnice (2.5.43), pro tento případ dostáváme

$$A_2 = \frac{Q_2}{k_2 \cdot \Delta T_{ln,2}} = \frac{2209}{54,23 \cdot 41,77} = 0,9752 \text{ m}^2 \quad (2.5.64)$$

**Délka trubek této části výměníku**

$$L_{t,2} = \frac{A_2}{\pi \cdot D \cdot N_t} = \frac{0,9752}{\pi \cdot 0,008 \cdot 42} = 0,9238 \text{ m} \quad (2.5.65)$$

**2.5.6 Výpočet 3. části výměníku****Vstupy a výstupy této části výměníku**

Tab. 2.10 Parametry pracovních látek na vstupu a výstupu třetí části výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku[44]	Vstupní teplota	$T_{chl,23}$	-152,9	°C
		Výstupní teplota	$T_{chl,out}$	-150	°C
		Vstupní entalpie	$h_{chl,23}$	123,40	kJ/kg
		Výstupní entalpie	$h_{chl,out}$	126,48	kJ/kg
Teplonosná látka	Krypton [43]	Vstupní teplota	$T_{tl,in}$	-100	°C
		Výstupní teplota	$T_{tl,32}$	-128,2	°C
		Vstupní entalpie	$h_{tl,in}$	117,20	kJ/kg
		Výstupní entalpie	$h_{tl,32}$	110,66	kJ/kg

**Výkon této části výměníku**

$$Q_3 = \dot{m}_{tl} \cdot (h_{tl,in} - h_{tl,32}) = 0,0239 \cdot (117,20 - 110,66) = 156,28 \text{ W} \quad (2.5.66)$$

**Vlastnosti látek**

Střední teplota teplonosné látky

$$T_{ch,tl,3} = \frac{T_{tl,in} + T_{tl,32}}{2} = \frac{(-100) + (-128,2)}{2} = -114,1 \text{ °C} \quad (2.5.67)$$

Střední teplota chladicí látky

$$T_{ch,chl,3} = \frac{T_{chl,out} + T_{chl,23}}{2} = \frac{(-150) + (-152,9)}{2} = -151,5 \text{ °C} \quad (2.5.68)$$

Střední teplota stěny

$$T_{w,3} = \frac{T_{ch,chl,3} + T_{ch,tl,3}}{2} = \frac{(-151,5) + (-114,1)}{2} = -132,8 \text{ °C} \quad (2.5.69)$$

Tab. 2.11 Vlastnosti médií a materiálu v třetí části výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku[44]	Tepelná vodivost	$\lambda_{chl,3}$	0,0114	W/(m·K)
		Prandtlovo číslo	$Pr_{chl,3}$	0,7719	-
		Střední viskozita látky	$\mu_{chl,3}$	8,3513	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
		Viskozita látky u stěny	$\mu_{w,chl,3}$	9,5034	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
Teplonosná látka	Krypton[43]	Tepelná vodivost	$\lambda_{tl,3}$	0,0056	W/(m·K)
		Prandtlovo číslo	$Pr_{tl,3}$	0,8606	-
		Střední viskozita látky	$\mu_{tl,3}$	14,408	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
Materiál výměníku	AISI 304[35]	Tepelná vodivost	$\lambda_{m,3}$	10,847	W/(m·K)

### Střední logaritmický spád LMTD

$$\Delta T_{1,3} = T_{tl,in} - T_{chl,out} = (-100) - (-150) = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.70)$$

$$\Delta T_{2,3} = T_{tl,32} - T_{chl,23} = (-128,2) - (-152,9) = 24,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.71)$$

$$\Delta T_{ln3} = \frac{\Delta T_{1,3} - \Delta T_{2,3}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{1,3}}{\Delta T_{2,3}}\right)} = \frac{50 - 24,7}{\ln\left(\frac{50}{24,7}\right)} = 35,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.72)$$

### Součinitel přestupu tepla na straně pláště

Reynoldsovo číslo chladícího média

$$Re_{chl,3} = \frac{G_{chl} \cdot D_e}{\mu_{chl,3}} = \frac{15,2 \cdot 0,0118}{8,3513 \cdot 10^{-6}} = 25\,379 \quad (2.5.73)$$

$10^4 < Re_{chl,3} \rightarrow$  turbulentní proudění

Nusseltovo číslo pro proudění pláštěm dle McAdamse [2]

$$\begin{aligned} Nu_{chl,3} &= 0,36 \cdot Re_{chl,3}^{0,55} \cdot Pr_{chl,3}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_{chl,3}}{\mu_{w,chl,3}}\right)^{0,14} \\ &= 0,36 \cdot 21458^{0,55} \cdot 0,7716^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{8,3513 \cdot 10^{-6}}{9,5034 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,14} = 85,79 \end{aligned} \quad (2.5.74)$$

Z definice nusseltova čísla rovnice (1.3.6) určíme součinitel přestupu tepla na straně pláště.

$$\alpha_{chl,3} = \frac{Nu_{chl,3} \cdot \lambda_{chl,3}}{D_e} = \frac{85,79 \cdot 0,0114}{0,0118} = 82,77 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (2.5.75)$$

### Součinitel prostupu tepla na straně trubek

Reynoldsovo číslo teplotnosné látky

$$Re_{tl,3} = \frac{G_{tl} \cdot d}{\mu_{tl,3}} = \frac{20,13 \cdot 0,006}{14,408 \cdot 10^{-6}} = 8\,384 \quad (2.5.76)$$

$2300 < Re_{chl,3} < 10^4 \rightarrow$  přechodné neboli smíšené proudění

Nusseltovo číslo pro přechodné proudění pláštěm

$$Nu_{tl,3} = (1 - \gamma) \cdot Nu_{tl,lam,3} + \gamma \cdot Nu_{tl,tur,3} \quad (2.5.77)$$

Kde korekční faktor pro přechodné proudění

$$\gamma = \frac{Re_{tl,3} - 2300}{10^4 - 2300} = \frac{8384 - 2300}{10^4 - 2300} = 0,79 \quad (2.5.78)$$

Nusseltovo číslo pro laminární proudění [1]

$$\begin{aligned} Nu_{tl,lam,3} &= (Nu_1^3 + 0,7^3 + (Nu_2 - 0,7)^3)^{\frac{1}{3}} = \quad (2.5.79) \\ &= (3,66^3 + 0,7^3 + (7,52 - 0,7)^3)^{\frac{1}{3}} = 7,07 \end{aligned}$$

kde

$$Nu_1 = 3,66 \quad (2.5.80)$$

$$\begin{aligned} Nu_2 &= 1,615 \cdot \left( Pr_{tl,3} \cdot 2300 \cdot \frac{d}{L_{t,3}} \right)^{\frac{1}{3}} = \quad (2.5.81) \\ &= 1,615 \cdot \left( 0,8661 \cdot 2300 \cdot \frac{0,006}{0,25} \right)^{\frac{1}{3}} = 7,42 \end{aligned}$$

Délku trubky výměníku uvažujeme  $L_{t,3}=0,25$  m.

Nusseltovo číslo pro turbulentní proudění [1],

$$Nu_{tl,tur,3} = \frac{\frac{\xi_3}{8} \cdot 10^4 \cdot Pr_{tl,3}}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi_3}{8}} \cdot \left( Pr_{tl,3}^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} - \left( 1 + \left( \frac{d}{L_{t,3}} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \quad (2.5.82)$$

$$Nu_{tl,tur,3} = \frac{\frac{0,0308}{8} \cdot 10^4 \cdot 0,8661}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{0,0308}{8}} \cdot \left( 0,8661^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} - \left( 1 + \left( \frac{0,006}{0,25} \right)^{\frac{2}{3}} \right) = 34,82$$

kde

$$\xi_3 = (1,8 \cdot \log 10^4 - 1,5)^{-2} = 0,0308 \quad (2.5.83)$$

Dostáváme dosazením do rovnice (2.5.77)

$$\begin{aligned} Nu_{tl,3} &= (1 - \gamma) \cdot Nu_{tl,lam,3} + \gamma \cdot Nu_{tl,tur,3} = \\ &= (1 - 0,79) \cdot 7,07 + 0,79 \cdot 34,82 = 29,00 \end{aligned} \quad (2.5.84)$$

Z definice Nusseltova čísla rovnice (1.3.6) určíme součinitel přestupu tepla uvnitř trubek.

$$\alpha_{tl,3} = \frac{Nu_{tl,3} \cdot \lambda_{tl,3}}{d} = \frac{29,00 \cdot 0,0056}{0,006} = 27,00 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.5.85)$$

### Koeficient prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla je určen stejným způsobem, jako v předchozích částech výměníku vyjdeme z rovnice (2.5.39).

$$\begin{aligned} k_3 &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{chl,3}} + \frac{r_0}{\lambda_{m,3}} \cdot \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{1}{\alpha_{tl,3}} \cdot \frac{r_0}{r_i}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{82,77} + \frac{0,004}{10,847} \cdot \ln \frac{0,004}{0,003} + \frac{1}{27,00} \cdot \frac{0,004}{0,003}} = 16,24 \frac{W}{m^2 \cdot K} \end{aligned} \quad (2.5.86)$$

### Teplosměnná plocha této části výměníku

Pro výpočet teplosměnné plochy výměníku postupujeme stejně jako v předchozích částech.

$$A_3 = \frac{Q_3}{k_3 \cdot \Delta T_{ln,3}} = \frac{156,28}{16,24 \cdot 35,9} = 0,2680 \text{ m}^2 \quad (2.5.87)$$

### Délka trubek této části výměníku

$$L_{t,3} = \frac{A_3}{\pi \cdot D \cdot N_t} = \frac{0,2680}{\pi \cdot 0,008 \cdot 42} = 0,2539 \text{ m} \quad (2.5.88)$$

### 2.5.7 Kontrolní výpočty

Celkový navrhnutý výkon výměníku

$$Q_{skut} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 134,72 + 2209 + 156,28 = 2500 \text{ W} \quad (2.5.89)$$

Vypočtená potřebná délka trubek výměníku

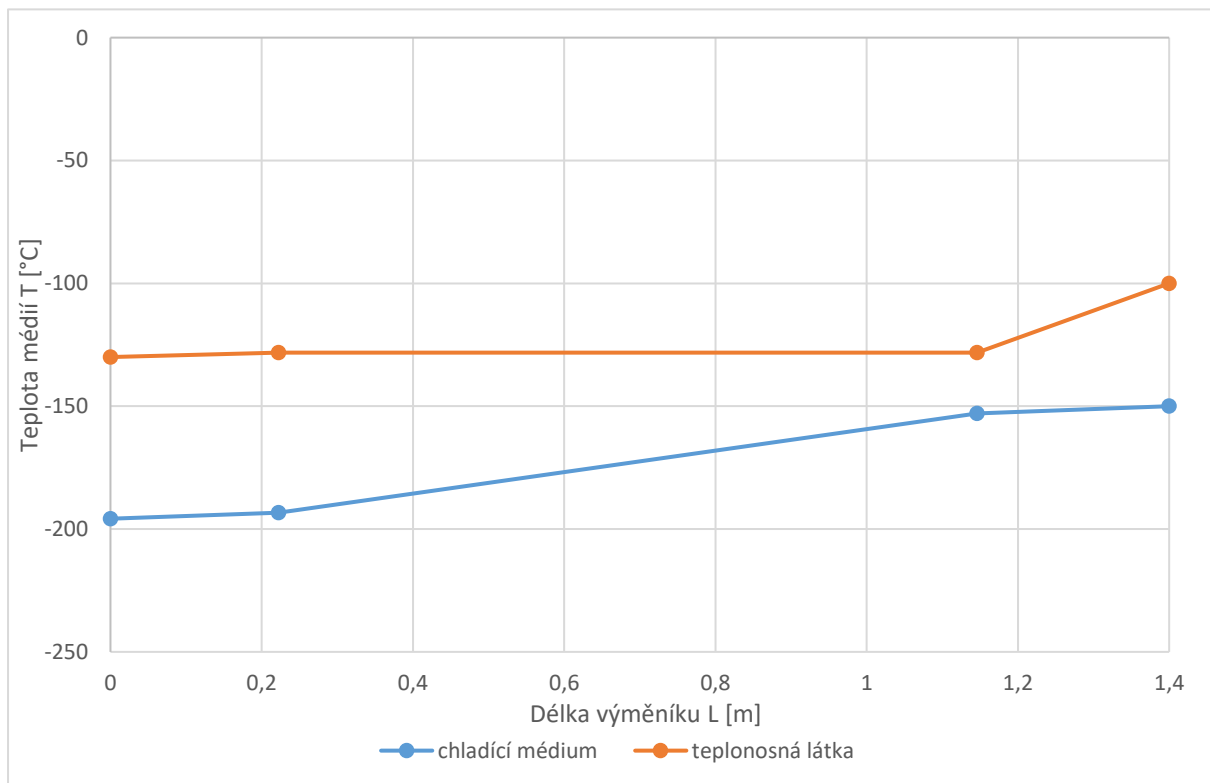
$$L_{t,vyp} = L_{t,1} + L_{t,2} + L_{t,3} = 0,0595 + 0,924 + 0,254 = 1,237 \text{ m} \quad (2.5.90)$$

Předimenzování výměníku

$$\%OD = \left(1 - \frac{L_{t,vyp}}{L_t}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1,237}{1,4}\right) \cdot 100 = 11,6 \% \quad (2.5.91)$$

Pro kontrolu zvolených rozměrů pro náš výměník jsme určili předimenzování výměníku jako poměr vypočítané potřebné délky trubky a navržené délky uvažované v průběhu výpočtu. Vychází nám předimenzování o 11,6 %. Tato hodnota poskytuje dostatečnou zálohu návrhu výměníku.

### 2.5.8 Průběh teplot ve výměníku



Obr. 2.9 Průběh teplot ve výměníku vykreslený pomocí programu Excel

## 2.5.9 Tlaková ztráta výměníku

### Tlaková ztráta v plášti

Vzhledem k tomu, že není kladen zvláštní požadavek na tlakovou ztrátu výměníku, volíme zjednodušený výpočet ztrát. Na straně chladicí látky bez fázové změny počítáme výměník jako jeden celek.

Střední teplota teplotnosné látky

$$T_{ch,chl} = \frac{T_{chl,out} + T_{chl,in}}{2} = \frac{(-150) + (-195,8)}{2} = -172,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.92)$$

Střední teplota stěny

$$T_w = \frac{T_{ch,chl} + \frac{T_{tl,in} + T_{tl,out}}{2}}{2} = \frac{(-172,9) + \frac{-100 + 130}{2}}{2} = -143,0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.5.93)$$

Tab. 2.12 Vlastnosti chladicí látky pro výpočet tlakových ztrát

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látky	Páry dusíku [44]	Střední hustota	$\rho_{chl}$	3,4738	$\text{kg/m}^3$
		Střední viskozita	$\mu_{chl}$	6,9753	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
		Viskozita látky u stěny	$\mu_{w,chl}$	7,6917	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$

Reynoldsovo číslo chladicí látky pro celý plášť

$$Re_{chl} = \frac{G_{chl} \cdot D_e}{\mu_{chl}} = \frac{17,89 \cdot 0,0118}{6,9753 \cdot 10^{-6}} = 30\,385 \quad (2.5.94)$$

Součinitel tření [2]

$$f_{chl} = e^{(0,576 - 0,19 \cdot \ln(Re_{chl}))} = e^{(0,576 - 0,19 \cdot \ln(30385))} = 0,2503 \quad (2.5.95)$$

Korekční faktor na proměnné vlastnosti [2]

$$\phi_s = \left( \frac{\mu_{chl}}{\mu_{w,chl}} \right)^{0,14} = \left( \frac{6,9753 \cdot 10^{-6}}{7,6917 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 0,9864 \quad (2.5.96)$$

Tlaková ztráta při průtoku pláštěm [2]

$$\begin{aligned} \Delta p_p &= \frac{f_{chl} \cdot G_{chl}^2 \cdot (N_b + 1) \cdot D_s}{2 \cdot \rho_{chl} \cdot D_e \cdot \phi_s} = \\ &= \frac{0,2503 \cdot 17,89^2 \cdot (13 + 1) \cdot 0,085}{2 \cdot 3,4738 \cdot 0,0118 \cdot 0,9864} = 1173,93 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (2.5.97)$$

**Tlaková ztráta v trubkovém prostoru výměníku**

Všeobecně jsou definovány ztráty v trubkovém prostoru při jednofázovém proudění jako

$$\Delta p_t = \Delta p_n + \Delta p_{c,e} + \Delta p_{t,f} \quad (2.5.98)$$

kde  $\Delta p_t$  je celková ztráta v trubkovém prostoru,  $\Delta p_n$  je ztráta na vstupních hrdlech,  $\Delta p_{c,e}$  je tlaková ztráta způsobená náhlým zúžením a rozšířením proudu při vstupu a výstupu média do trubek a z trubek tuto tlakovou ztrátu  $\Delta p_{c,e}$  lze zanedbat [47],  $\Delta p_{t,f}$  je tlaková ztráta způsobená třením uvnitř trubek.

Tlakové ztráty z důvodu fázové změny musíme rozdělit stejným způsobem, jako u tepelného výpočtu. To znamená, že budeme mít složenou tlakovou ztrátu v trubkovém prostoru ze čtyřech složek.

$$\Delta p_t = \Delta p_n + \Delta p_{t,1} + \Delta p_{t,2} + \Delta p_{t,3} \quad (2.5.99)$$

## 1. Ztráta na vstupních hrdlech [47]

$$\Delta p_n = \frac{1,5 \cdot G_{tl,n}^2}{2 \cdot \rho_{tl,in}} = \frac{1,5 \cdot 0,0239^2}{2 \cdot 48,53} = 5,59 \text{ Pa} \quad (2.5.100)$$

kde hustota média na vstupu  $\rho_{tl,in} = 48,53 \text{ kg/m}^3$  [43] a hmotnostní průtok hrdlem

$$G_{tl,n} = \frac{m_{tl}}{\frac{\pi \cdot d_n^2}{4}} = \frac{0,0239}{\frac{\pi \cdot 0,05^2}{4}} = 19,02 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (2.5.101)$$

Průměr vstupního hrdla  $d_n$  uvažujeme 50 mm

## 2. Tlaková ztráta při průtoku trubkou první části výměníku [1]

$$\Delta p_{t,1} = f_{t,1} \cdot \frac{L \cdot N_b}{d} \cdot \frac{G_{tl}^2}{2 \cdot \rho_{tl,1}} \quad (2.5.102)$$

kde součinitel tření pro laminární proudění je definován jako

$$f_{t,1} = \frac{64}{Re_{tl,1}} = \frac{64}{503,6} = 0,1273 \quad (2.5.103)$$

Počet tahů výměníku  $N_b$  je v našem případě jeden, hustota média této části výměníku  $\rho_{tl,1} = 2221 \text{ kg/m}^3$  [43]. Délku počítáme jako

$$L = L_t - L_{t,2} - L_{t,3} \quad (2.5.104)$$

Z důvodu předpokladu fungování výměníku dle návrhu, tj. bez zanášení a s vypočtenými výkony, tudíž veškerá naddimenzovaná délka slouží na podchlazení teplonosné látky v první části výměníku.



Dosazením do rovnice (2.5.102) získáme tlakovou ztrátu trubek první části výměníku

$$\Delta p_{t,1} = 0,1273 \cdot \frac{(1,4 - 0,92 - 0,25) \cdot 1}{0,006} \cdot \frac{20,13^2}{2 \cdot 2221} = 0,43 \text{ Pa} \quad (2.5.105)$$

### 3. Tlaková ztráta druhé části výměníku

Pro okamžitou tlakovou ztrátu při kondenzaci ve vertikální trubce, za předpokladu rovnoměrných rychlostních profilů v plynné i kapalně fázi, platí: [48]

$$\frac{dp_{t,2}}{dz} = \frac{dp_{m,2}}{dz} + \frac{dp_{f,2}}{dz} + \frac{dp_{gr,2}}{dz} \quad (2.5.106)$$

Výpočet provedeme pomocí homogenního modelu proudění v trubce. Pro tento model zavedeme.

- Homogenní podíl plynné fáze v trubce [48]

$$\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \left( \frac{1-x}{x} \cdot \frac{\rho_{tl,g,2}}{\rho_{tl,l,2}} \right)} \quad (2.5.107)$$

- Homogenní hustotu dvoufázového proudění [48]

$$\rho_H = x \cdot \rho_{tl,g,2} + (1-x) \cdot \rho_{tl,l,2} \quad (2.5.108)$$

- Homogenní viskozitu dvoufázového proudění [48]

$$\mu_{TP} = x \cdot \mu_{tl,g,2} + (1-x) \cdot \mu_{tl,l,2} \quad (2.5.109)$$

- Reynoldsovo číslo pro dvoufázové proudění [48]

$$Re_{tl,TP,2} = \frac{G_{tl} \cdot d}{\mu_{TP}} \quad (2.5.110)$$

Tab. 2.13 Doplnění vlastností látek ostatní použité parametry jsou získány v kapitole 2.5.5

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Teplonosná látka	Krypton [43]	Hustota látky v kapalném skupenství	$\rho_{tl,l,2}$	2137,8	kg/m <sup>3</sup>
		Hustota látky v plynném skupenství	$\rho_{tl,g,2}$	57,65	kg/m <sup>3</sup>

Tlakový gradient hybnosti je definován jako [48]

$$\frac{dp_{m,2}}{dz} = -\frac{d}{dz} \left( \frac{x^2}{\varepsilon_H \cdot \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H) \cdot \rho_l} \right) \cdot G^2 \quad (2.5.111)$$

Pro náš případ dostáváme

$$\frac{dp_{m,2}}{dz} = -\frac{d}{dz} \left( \frac{x^2}{\varepsilon_H \cdot \rho_{tl,g,2}} + \frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H) \cdot \rho_{tl,l,2}} \right) \cdot G_{tl}^2 \quad (2.5.112)$$

Pro kompletní fázovou změnu, dostáváme integrál

$$\Delta p_{m,2} = -G_{tl}^2 \cdot \int_0^1 \left( \frac{x^2}{\varepsilon_H(x) \cdot \rho_{tl,g,2}} + \frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H(x)) \cdot \rho_{tl,l,2}} \right) dx \quad (2.5.113)$$

S proměnou funkcí podílu plynné fáze  $\varepsilon_H(x)$ . Výslednou soustavu rovnic řešíme pomocí programu sMath studio (Příloha 5). Dostáváme tlakovou změnu v trubce způsobenou hybností.

$$\Delta p_{m,2} = -3,61 \text{ Pa}$$

Tlakový gradient gravitačních sil je definován [48]

$$\frac{dp_{gr,2}}{dz} = -\rho_H \cdot g \cdot \sin\theta \quad (2.5.114)$$

kde pro vertikální trubky platí  $\theta = 90^\circ$ .

Pro náš případ dostáváme integrál [48]

$$\Delta p_{gr,2} = -L_{t,2} \int_0^1 [\rho_H(x) \cdot g] dx \quad (2.5.115)$$

kde  $\rho_H$  je funkcí  $x$ . Výslednou soustavu rovnic řešíme stejně jako v předchozím případě pomocí programu sMath studio (Příloha 5). Dostáváme tlakovou změnu v trubce způsobenou gravitačními silami.

$$\Delta p_{gr,2} = -1939,82 \text{ Pa}$$

Tlakový gradient třecích sil je definován [48]

$$\frac{dp_{f,2}}{dz} = 2 \cdot f_{TP} \cdot \frac{G_{tl}^2}{d \cdot \rho_H} \quad (2.5.116)$$

kde součinitel tření je

$$f_{TP} = \frac{0,079}{Re_{tl,TP,2}^{0,25}} \quad (2.5.117)$$

Pro náš případ dostáváme integrál

$$\Delta p_{f,2} = L_{t,2} \int_0^1 2 \cdot f_{TP}(x) \cdot \frac{G_{tl}^2}{d \cdot \rho_H(x)} dx \quad (2.5.118)$$

kde součinitel tření  $f_{TP}$  a homogenní hustota  $\rho_H$  jsou funkce  $x$ . Výslednou soustavu rovnic řešíme stejně jako v předchozích případech pomocí programu sMath studio (Příloha 5). Dostáváme tlakovou ztrátu v trubce způsobenou třecími silami.

$$\Delta p_{f,2} = 13,91 \text{ Pa}$$

Výsledná tlaková ztráta druhé části výměníku

$$\begin{aligned} \Delta p_{t,2} &= \Delta p_{m,2} + \Delta p_{gr,2} + \Delta p_{f,2} = \\ &= -3,61 - 1939,82 + 13,91 = -1\,929,52 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (2.5.119)$$

4. Tlaková ztráta při průtoku trubkou třetí části výměníku [1]

$$\Delta p_{t,3} = f_{t,3} \cdot \frac{L_3 \cdot N_b}{d} \cdot \frac{G_{tl}^2}{2 \cdot \rho_{tl,3}} = 0,1273 \cdot \frac{0,25 \cdot 1}{0,006} \cdot \frac{20,13^2}{2 \cdot 2221} = 1,30 \text{ Pa} \quad (2.5.120)$$

kde součinitel tření pro přechodové proudění je definován jako

$$f_{t,3} = \frac{0,0791}{Re_{tl,3}^{0,25}} = \frac{0,0791}{8384} = 0,0083 \quad (2.5.121)$$

Počet tahů výměníku  $N_b$  je v našem případě jeden, hustota média této části výměníku  $\rho_{tl,3} = 2221 \text{ kg/m}^3$  [43].

### Celkové ztráty v trubkách

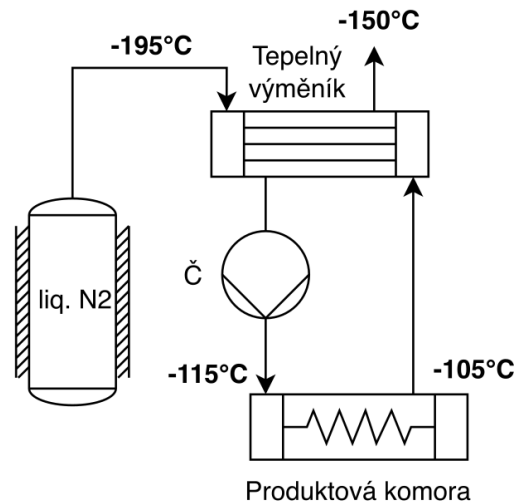
Celkovou tlakovou ztrátu v trubkách dostaneme jako součet tlakové ztráty na vstupním hrdle a jako součet jednotlivých tlakových změn ve všech částech trubky výměníku.

$$\begin{aligned} \Delta p_t &= \Delta p_n + \Delta p_{t,1} + \Delta p_{t,2} + \Delta p_{t,3} = \\ &= 5,59 + 0,43 - 1930 + 1,3 = -1923 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (2.5.122)$$

Z vypočteného výsledku lze vidět, že v trubkách žádná tlaková ztráta není díky vertikální orientaci výměníku, ba naopak je zde tlakový zisk.

## 2.6 Volba technického řešení pro teplonosnou látku

Pro porovnání řešení s kryogenní látkou jsme zvolili běžně dostupnou teplonosnou látku s pracovními teplotami o něco vyššími, než jsou zadané. Látka Therminol VLT má pracovní teplotou  $-115\text{ °C}$  až  $175\text{ °C}$  [40]. Volíme koncepci kapalinového chladicího okruhu s pracovními teplotami teplonosné látky  $-115\text{ °C}$  až  $-105\text{ °C}$ .



Obr. 2.10 Schéma kapalinového chladicího okruhu pro Therminol VLT s návrhem teplot

## 2.7 Návrh výměníku pro teplonosnou látku

### 2.7.1 Zadání

Na předcházejících stranách bylo objasněno technické řešení tohoto zařízení a z něho vyplývá následující zadání a požadavky na výměník.

- Požadovaný výkon výměníku  $Q_{\text{poz}} = 2,5\text{ kW}$
- Základní parametry pracovních látek

Tab. 2.14 Určené vstupní a výstupní parametry látek ve výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku [44]	Tlak	$p_{\text{atm}}$	0,1013	MPa
		Vstupní teplota	$T_{\text{chl,in}}$	-195,8	$\text{°C}$
		Výstupní teplota	$T_{\text{chl,out}}$	-150	$\text{°C}$
Teplonosná látka	Therminol VLT [40]	Vstupní teplota	$T_{\text{tl,in}}$	-105	$\text{°C}$
		Výstupní teplota	$T_{\text{tl,out}}$	-115	$\text{°C}$

### 2.7.2 Volba konstrukce výměníku

#### Volba konstrukce výměníku

Volíme trubkový plášťový výměník v horizontálním uspořádání trubek. Volba deskového výměníku je nevhodná z důvodu vysoké viskozity teplonosné látky a tím spojenými očekávanými vyššími tlakovými ztrátami.

#### Volba materiálu výměníku

Materiál výměníku volíme stejný jako u předchozího výměníku – AISI 304. Se stejným zdrojem vlastností materiálu z NIST [35].

### 2.7.3 Návrh hlavních rozměrů výměníku

#### Odhad teplosměnné plochy výměníku

Střední logaritmický spád (LMTD) celého výměníku

$$\Delta T_1 = T_{tl,out} - T_{chl,in} = (-115) - (-195,8) = 80,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.7.1)$$

$$\Delta T_2 = T_{tl,in} - T_{chl,out} = (-105) - (-150) = 45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.7.2)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{80,8 - 45}{\ln\left(\frac{80,8}{45}\right)} = 61,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.7.3)$$

Odhad součinitele prostupu tepla

$$k_{odhad} = 40 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Odhad potřebné plochy výměníku ze vztahu

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T_{ln} \quad (2.7.4)$$

$$A_{odhad} = \frac{Q_{poz}}{k_{odhad} \cdot \Delta T_{ln}} = \frac{2500}{40 \cdot 61,2} = 1,022 \text{ } m^2 \quad (2.7.5)$$

#### Volba rozměrů výměníku

Volba rozměrů trubky výměníku dle katalogu [46]

Tab. 2.15 Zvolené rozměry trubky výměníku

Vnější průměr trubky	D	8 mm
Vnitřní průměr trubky	d	6 mm
Efektivní délka trubky	L <sub>t</sub>	800 mm

Volba počtu trubek

$$N_{t,odhad} = \frac{A_{odhad}}{\pi \cdot D \cdot L_t} = \frac{1,022}{\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8} = 50,8 \quad (2.7.6)$$

→ volba  $N_t = 58$

Z důvodu snížení rozměrů a naddimenzování výměníku volíme vyšší počet trubek

Celková teplosměnná plocha výměníku

$$A = \pi \cdot D \cdot L_t \cdot N_t = \pi \cdot 0,008 \cdot 0,8 \cdot 58 = 1,166 \text{ m}^2 \quad (2.7.7)$$

Volba dalších parametrů [2]

Tab. 2.16 Volené další parametry výměníku

Rozteč trubek – Pitch Ratio	PR	1,5
Konstanta zohledňující počet chodů výměníku	CTP	0,93
Konstanta zohledňující uspořádání trubek	CL	0,87

Rozteč trubek

$$P_T = D \cdot PR = 8 \cdot 1,5 = 12 \text{ mm} \quad (2.7.8)$$

$$S = CL \cdot P_T^2 = 0,87 \cdot 12^2 = 125,28 \text{ mm}^2 \quad (2.7.9)$$

Odhad průměru pláště ze vztahu [2]

$$N_t = CTP \frac{\pi \cdot D_s^2}{4 \cdot S} \quad (2.7.10)$$

$$D_{s,odhad} = \sqrt{\frac{4 \cdot S \cdot N_t}{\pi \cdot CTP}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 125,28 \cdot 58}{\pi \cdot 0,93}} = 99,74 \text{ mm} \quad (2.7.11)$$

→ volba  $D_s = 100 \text{ mm}$

Ekvivalentní průměr pro trojúhelníkové uspořádání trubek [2]

$$D_e = \frac{4 \cdot \left( \frac{P_T^2 \cdot \sqrt{3}}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{8} \right)}{\frac{\pi \cdot D}{2}} = \frac{4 \cdot \left( \frac{9 \cdot \sqrt{3}}{4} - \frac{\pi \cdot 8^2}{8} \right)}{\frac{\pi \cdot 8}{2}} = \quad (2.7.12)$$

$$= 11,85 \text{ mm}$$

Volná vzdálenost mezi trubkami

$$C = P_T - D = 12 - 8 = 4 \text{ mm} \quad (2.7.13)$$

**Volba přepážek**

Volba rozteče přepážek

$$B = 100 \text{ mm}$$

Počet přepážek

$$N_b = \frac{L_t}{B} - 1 = \frac{800}{100} - 1 = 7 \quad (2.7.14)$$

**Průtoky médií ve výměníku**

Průtočná plocha pláště

$$A_s = \frac{D_s \cdot C \cdot B}{P_T} = \frac{0,1 \cdot 4 \cdot 100}{12} = 3333, \bar{3} \text{ mm}^2 \quad (2.7.15)$$

Průtočná plocha trubek

$$A_t = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,27 \text{ mm}^2 \quad (2.7.16)$$

Z bilanční rovnice určíme hmotnostní toky teplotnosných látek

$$Q = \dot{m}_1 \cdot \Delta h_1 = \dot{m}_2 \cdot \Delta h_2 \quad (2.7.17)$$

Tab. 2.17 Parametry pracovních látek na vstupu a výstupu výměníku

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry	Vstupní entalpie	$h_{chl,in}$	77,16	kJ/kg
	dušíku[44]	Výstupní entalpie	$h_{chl,out}$	126,48	kJ/kg
Teplotnosná látka	Therminol	Vstupní entalpie	$h_{tl,in}$	17,8	kJ/kg
	VLT[40]	Výstupní entalpie	$h_{tl,out}$	3,85	kJ/kg

Hmotnostní tok chladicího média

$$\dot{m}_{chl} = \frac{Q_{poz}}{h_{chl,out} - h_{chl,in}} = \frac{2,5}{126,48 - 77,16} = 0,0507 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (2.7.18)$$

Hmotnostní tok teplotnosné látky

$$\dot{m}_{tl} = \frac{Q_{poz}}{h_{tl,in} - h_{tl,out}} = \frac{2,5}{17,8 - 3,85} = 0,1792 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (2.7.19)$$

Měrný hmotnostní tok chladicího média

$$G_{chl} = \frac{\dot{m}_{chl}}{A_s} = \frac{0,0507}{3333 \cdot 10^{-6}} = 21,72 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (2.7.20)$$

Měrný hmotnostní tok teplotnosné látky v jedné trubce

$$G_{tl} = \frac{\dot{m}_{tl}}{A_t \cdot N_t} = \frac{0,1792}{28,27 \cdot 10^{-6} \cdot 58} = 109,28 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (2.7.21)$$

### Vlastnosti látek

Střední teplota teplotnosné látky

$$T_{ch,tl} = \frac{T_{tl,out} + T_{tl,in}}{2} = \frac{(-115) + (-105)}{2} = -100 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.7.22)$$

Střední teplota chladicí látky

$$T_{ch,chl} = \frac{T_{chl,in} + T_{chl,out}}{2} = \frac{(-195,8) + (-150)}{2} = -173 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.7.23)$$

Střední teplota stěny

$$T_w = \frac{T_{ch,chl,1} + T_{ch,tl,1}}{2} = \frac{(-195,8) + (-100)}{2} = -141 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.7.24)$$

Tab. 2.18 Vlastnosti médií a materiálu

		Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Chladicí látka	Páry dusíku [44]	Tepelná vodivost	$\lambda_{chl}$	0,0094	W/(m·K)
		Prandtlovo číslo	$Pr_{chl}$	0,7946	-
		Střední viskozita látky	$\mu_{chl}$	6,9753	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
		Viskozita látky u stěny	$\mu_{w,chl}$	8,9739	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
Teplotnosná látka	Therminol VLT [40]	Tepelná vodivost	$\lambda_{tl}$	0,1294	W/(m·K)
		Tepelná kapacita	$c_{p,tl}$	1,4	kJ/(kg·K)
		Střední viskozita látky	$\mu_{tl}$	0,031	$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
Materiál výměníku	AISI 304 [35]	Tepelná vodivost	$\lambda_m$	10,545	W/(m·K)

### Součinitel prostupu tepla na straně pláště

Reynoldsovo číslo chladicího média

$$Re_{chl} = \frac{G_{chl} \cdot D_e}{\mu_{chl}} = \frac{15,21 \cdot 0,0118}{6,9753 \cdot 10^{-6}} = 25\,828 \quad (2.7.25)$$

$$10^4 < Re_{chl} \rightarrow \text{turbulentní proudění}$$

Nusseltovo číslo pro proudění pláštěm dle McAdamse [2]

$$Nu_{chl} = 0,36 \cdot Re_{chl}^{0,55} \cdot Pr_{chl}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu_{chl}}{\mu_{w,chl}} \right)^{0,14} \quad (2.7.26)$$

$$= 0,36 \cdot 25828^{0,55} \cdot 0,7946^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{6,9753 \cdot 10^{-6}}{8,9739 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 85,97$$



Z definice Nusseltova čísla rovnice (1.3.6) určíme součinitel přestupu tepla na straně pláště.

$$\alpha_{chl} = \frac{Nu_{chl} \cdot \lambda_{chl}}{D_e} = \frac{85,97 \cdot 0,0094}{0,0118} = 68,25 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.7.27)$$

### Součinitel přestupu tepla na straně trubek

Prantlovo číslo teplotnosné látky

$$Pr_{tl} = \frac{c_{p,tl} \cdot \mu_{tl}}{\lambda_{tl}} = \frac{1400 \cdot 31 \cdot 10^{-3}}{0,1294} = 335,39 \quad (2.7.28)$$

Reynoldsovo číslo teplotnosné látky

$$Re_{tl} = \frac{G_{tl} \cdot d}{\mu_{tl}} = \frac{109,28 \cdot 0,006}{0,031 \cdot 10^{-6}} = 21,15 \quad (2.7.29)$$

$Re_{chl} < 2300 \rightarrow$  laminární proudění

Nuseltovo číslo pro laminární proudění [1]

$$\begin{aligned} Nu_{tl} &= (Nu_1^3 + 0,7^3 + (Nu_2 - 0,7)^3)^{\frac{1}{3}} = \\ &= (3,66^3 + 0,7^3 + (6,07 - 0,7)^3)^{\frac{1}{3}} = 5,89 \end{aligned} \quad (2.7.30)$$

kde

$$Nu_1 = 3,66 \quad (2.7.31)$$

$$\begin{aligned} Nu_2 &= 1,615 \cdot \left( Pr_{tl} \cdot Re_{tl} \cdot \frac{d}{L_t} \right)^{\frac{1}{3}} = \\ &= 1,615 \cdot \left( 335,39 \cdot 21,15 \cdot \frac{0,006}{0,8} \right)^{\frac{1}{3}} = 6,07 \end{aligned} \quad (2.7.32)$$

Z definice Nusseltova čísla rovnice (1.3.6) určíme součinitel přestupu tepla uvnitř trubek.

$$\alpha_{tl} = \frac{Nu_{tl} \cdot \lambda_{tl}}{d} = \frac{5,94 \cdot 0,0055}{0,006} = 127,08 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.7.33)$$

**Koeficient prostupu tepla**

Součinitel prostupu tepla je určen stejným způsobem, jako u předchozího výměníku (bez uvažování zanášení). Vyjdeme z rovnice (2.5.39).

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{chl}} + \frac{r_o}{\lambda_m} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{\alpha_{tl}} \cdot \frac{r_o}{r_i}} = \quad (2.7.34)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{68,25} + \frac{0,004}{10,545} \cdot \ln \frac{0,004}{0,003} + \frac{1}{127,08} \cdot \frac{0,004}{0,003}} = 39,6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

kde

$$r_o = \frac{D}{2} = \frac{0,008}{2} = 0,004 \text{ m} \quad (2.7.35)$$

$$r_i = \frac{d}{2} = \frac{0,006}{2} = 0,003 \text{ m} \quad (2.7.36)$$

**2.7.4 Kontrolní výpočty****Potřebnou teplosměnnou plochu výměníku**

Potřebnou teplosměnnou plochu určíme z rovnice (2.5.4), dostáváme

$$A_{vyp} = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_{ln}} = \frac{2500}{39,6 \cdot 61,16} = 1,032 \text{ m}^2 \quad (2.7.37)$$

**Potřebná délka trubek výměníku**

$$L_{t,vyp} = \frac{A_{vyp}}{\pi \cdot D \cdot N_t} = \frac{1,032}{\pi \cdot 0,006 \cdot 58} = 0,708 \text{ m} \quad (2.7.38)$$

**Předimenzování**

$$\%OD = \left(1 - \frac{L_{t,vyp}}{L_t}\right) = \left(1 - \frac{0,708}{0,8}\right) = 11,49 \% \quad (2.7.39)$$

Pro kontrolu zvolených rozměrů pro náš výměník jsme určili předimenzování výměníku jako poměr vypočítané potřebné délky trubky a navržené délky uvažované v průběhu výpočtu. Vychází nám předimenzování o 11,49 %. Tato hodnota poskytuje dostatečnou zálohu návrhu výměníku.

## 2.7.5 Tlaková ztráta výměníku

### Tlaková ztráta v plášti

Součinitel tření [2]

$$f_{chl} = e^{(0,576-0,19 \cdot \ln(Re_{chl}))} = e^{(0,576-0,19 \cdot \ln(30385))} = 0,2581 \quad (2.7.40)$$

Korekční faktor na proměnné vlastnosti [2]

$$\phi_s = \left( \frac{\mu_{chl}}{\mu_{w,chl}} \right)^{0,14} = \left( \frac{6,9753 \cdot 10^{-6}}{8,9739 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 0,9653 \quad (2.7.41)$$

Tlaková ztráta při průtoku pláštěm [2]

$$\begin{aligned} \Delta p_p &= \frac{f_{chl} \cdot G_{chl}^2 \cdot (N_b + 1) \cdot D_s}{2 \cdot \rho_{chl} \cdot D_e \cdot \phi_s} = \\ &= \frac{0,2581 \cdot 15,21^2 \cdot (7 + 1) \cdot 0,085}{2 \cdot 3,4738 \cdot 0,0118 \cdot 0,9853} = 150,23 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (2.7.42)$$

### Tlaková ztráta v trubkovém prostoru výměníku

$$\Delta p_t = \Delta p_n + \Delta p_{c,e} + \Delta p_{t,f} \quad (2.7.43)$$

tlakovou ztrátu  $\Delta p_{c,e}$  zanedbáváme [47]. Potom dostáváme pro náš případ.

$$\Delta p_t = \Delta p_n + \Delta p_{t,f} \quad (2.7.44)$$

Ztráta na vstupních hrdlech [47]

$$\Delta p_n = \frac{1,5 \cdot G_{tl,n}^2}{2 \cdot \rho_{tl}} = \frac{1,5 \cdot 91,27^2}{2 \cdot 857} = 7,29 \text{ Pa} \quad (2.7.45)$$

kde hustota média na vstupu  $\rho_{tl} = 857 \text{ kg/m}^3$  [43] a hmotnostní průtok hrdlem

$$G_{tl,n} = \frac{m_{tl}}{\frac{\pi \cdot d_n^2}{4}} = \frac{0,1792}{\frac{\pi \cdot 0,05^2}{4}} = 91,27 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (2.7.46)$$

Průměr vstupního hrdla  $d_n$  uvažujeme 50 mm

Tlaková ztráta při průtoku trubkou výměníku [1]

$$\Delta p_{t,f} = f_t \cdot \frac{L \cdot N_b}{d} \cdot \frac{G_{tl}^2}{2 \cdot \rho_{tl}} \quad (2.7.47)$$

kde součinitel tření pro laminární proudění je definován jako

$$f_t = \frac{64}{Re_{tl}} = \frac{64}{21,15} = 3,026 \quad (2.7.48)$$

Počet tahů výměníku  $N_b$  je v našem případě jeden.

Dosazením do rovnice dostáváme

$$\Delta p_{t,f} = 3,026 \cdot \frac{0,8 \cdot 1}{0,006} \cdot \frac{109,28^2}{2 \cdot 857} = 2\,811,02 \text{ Pa} \quad (2.7.49)$$

Celková ztráta v trubkách

$$\Delta p_t = \Delta p_n + \Delta p_{t,f} = 7,29 + 2811,02 = 2\,818,31 \text{ Pa} \quad (2.7.50)$$

## DISKUSE

V první části práce byla zpracována rešerše daného problému a zadaná oblast je značně složitá. Stálo by za to se zabývat se touto problematikou po rešeršní stránce, více dopodrobna. Zejména problematikou spojenou s teplotní odolností dalších komponent navrhovaného zařízení, jako jsou například těsnění či teplotní dilatace výměníků v závislosti na jejich konstrukci. Dále bohužel nebyla nalezena průmyslová teplonosná látka pro takto nízké teploty, je možné že existuje. Nicméně navržené řešení je teoreticky schopné provozu, ale za předpokladu využití kryogenní teplonosné látky nebo za použití průmyslové teplonosné látky na hraně provozních teplot což zvyšuje tlakovou ztrátu a snižuje přestup tepla.

V praktické části byla diskutovány možná technická řešení. Z nich byla navržena dvě každé z nich má své výhody a nevýhody.

### 1. Varianta chladícího okruhu s přímým výparem, s použitím teplonosné látky kryptonu

Výhody:

- nižší provozní teploty,
- možnost upravení systému a dosažením nižších teplot,
- rovnoměrnější rozložení teplot v produktové komoře,
- fázová změna v kombinaci s vertikální orientací výměníku umožňuje případný přirozený oběh teplonosné látky.

Nevýhody:

- výpočet prostupu tepla kondenzace může být velmi nepřesný,
- potřeba zajistit doplňkový objem pro odstavení zařízení, v případě absence doplňkového objemu dosáhne tlak v zařízení až 24 MPa při 20 °C.

Navržené řešení je teoreticky schopno provozu, bohužel výpočetní metody prostupu tepla a tlakových ztrát při kondenzaci jsou velmi omezené a dosahují oproti experimentům nepřesnosti i v desítkách procent [48].

### 2. Varianta chladícího kapalného okruhu, s použitím teplonosné látky Therminol VLT

Výhody:

- v jednoduchosti tohoto systému oproti druhému řešení,
- zařízení není pod tlakem, ale v případě odstávky a spouštění zařízení by stálo za úvahu použití doplňkových objemů pro stabilnější tlak zařízení.

Nevýhody:

- horší rozložení pracovních teplot v produktové komoře,
- pracovní teploty na hraně uváděných pracovních teplot,
- vyšší viskozita pracovní látky,
- vyšší tlaková ztráta,
- horší prostup tepla.

Tab.2.19 Porovnání navržených výměníků

		1. varianta	2. varianta	Jednotky
Pracovní teploty	Vstup	-100	-100	°C
	Výstup	-130	-105	°C
Geometrie výměníku	Průměr pláště	0,085	0,1	m
	Délka svazku trubek	1,4	0,8	m
	Počet trubek	42	58	-
	Teplosměnná plocha	1,478	1,166	m <sup>2</sup>
	Předimenzování výměníků	11,6	11,5	%
Součinitel prostupu tepla		43,9 <sup>5</sup>	39,6	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Střední logaritmičeský spád		57,5	61,2	°C
Tlaková ztráta	V plášti	1,2	0,150	kPa
	V trubkách	-1,9	2,8	kPa

V tabulce výše lze vidět porovnání navržených výměníků tepla, za povšimnutí stojí podobný součinitel prostupu tepla. Dále stojí za pozornost rozdílná tlaková ztráta v plášti a v trubkách, toto je způsobeno rozdílnou viskozitou látek a také fázovou změnou a vertikálním uspořádáním výměníku v 1. variantě řešení.

<sup>5</sup> Pro potřeby porovnání výměníků byl použit vážený průměr částí koeficientů přestupu tepla vůči délce výměníku  $k = \frac{k_1(L_t - L_{t,2} - L_{t,3}) + k_2 \cdot L_{t,2} + k_3 \cdot L_{t,3}}{L_t}$

## ZÁVĚR

Cílem úvodní části práce bylo provést rešerši vhodných teplonosných látek, konstrukčních materiálů a konstrukcí výměníků. Následně navrhnout vhodné technické řešení pro nízkoteplotní aplikaci nepřímého chlazení pro lyofilizační zařízení. Jako zdroj chladu byly zadány páry dusíku.

V teoretické části jsou zpracovány a rozvedeny aspekty přenosu tepla, jak při běžných podmínkách, tak při nízkých teplotách. Rozvedena byla i další problematika související s využitím kryogenních teplot, jako jsou termodynamické změny vlastností těchto látek, tak mechanické změny v závislosti na teplotě. Byly nastíněny základní konstrukční modifikace výměníků pro použití nepřímého chlazení. Součástí práce je i stručná rešerše vhodných teplonosných látek. Vzhledem k této aplikaci nebyly nalezeny žádné čistě účelové průmyslové látky, a proto bylo zvažováno použití kryogenních plynů. Na základě předchozích kapitol byla zpracována, rešerše zabývající se různými materiály, které se využívají nebo jsou vhodné pro nízkoteplotní výměníky.

V praktické části práce byly nastíněny možné způsoby řešení nepřímého chlazení. Na základě těchto způsobů byla navržena dvě řešení. Přičemž jedno je založeno na teplonosné látce kryptonu a využívá systém s přímým výparem teplonosné látky a druhé využívá teplonosnou látku Therminol VLT a kapalinový chladicí systém. K oběma těmto řešení byl, napočítán výměník tepla a následně provedena diskuse.

Podařilo se nám navrhnout dva systémy, použitelné pro zadanou aplikaci. Především u systému s přímým výparem bylo použito pro výpočet kondenzace různých korelací. Stálo by za to, porovnat různé možnosti výpočtů a následně doplnit i případným experimentem, protože podle odborných článků dosahují výpočtové modely vysokých odchylek oproti experimentům. Tímto směrem se nabízí možnost vhodného rozšíření práce do budoucna. Zajímavým rozšířením práce by mohlo být dopočítání výměníku v produktové komoře a doplnění ostatních komponent pro variantu s přímým výparem a úvaha o přirozeného oběhu systému.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VDI E. V., ed. *VDI Heat Atlas*. 2nd ed. Heidelberg: Springer Berlin, 2010. ISBN 978-3-540-77876-9. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77877-6>
- [2] KAKAÇ a PRAMUANJAROENKIJ. *Heat Exchanger: election, rating, and thermal design*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-4990-3.
- [3] VAN SCIVER, Steven W. *Helium Cryogenics*. Second Edition. New York: Springer, 2012. ISBN 978-1-4419-9978-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-9979-5
- [4] *KRYOGENIKA JAKO FASCINUJÍCÍ OBOR: Další díl seriálu „Made in PBS“* [online]. Velká Bíteš: PBS, 2021 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [www.pbs.cz/cz/Blog/MADE-IN-PBS-KRYOGENIKA](http://www.pbs.cz/cz/Blog/MADE-IN-PBS-KRYOGENIKA)
- [5] OTA, Josef. *Kryogenní technika a její aplikace*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2904-2.
- [6] *Lyofilizace ovoce, zeleniny, masa a jiných potravin* [online]. Praha: Bio trade, 2020 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.biotrade.cz/aplikace-11/lyofilizace-a-suseni-13/lyofilizace-ovoce-zeleniny-masa-a-jinych-potravin-108>
- [7] REY, Louis a Joan C. MAY. *Freeze drying/lyophilization of pharmaceutical and biological products*. 3rd ed. London: Informa Healthcare, 2011. *Drugs and the pharmaceutical sciences*, v. 206. ISBN 978-143-9825-754
- [8] FLYNN, Thomas M. *CRYOGENIC ENGINEERING*. Second Edition Revised and Expanded. Louisville, Colorado, U.S.A.: CRYOCO, 2005. ISBN 0-8247-5367-4.
- [9] MORAN, MICHAEL J., HOWARD N. SHAPIRO, DAISIE D. BOETTNER a MARGARET B. BAILEY. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Eighth Edition. USA: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-41293-5.
- [10] BAUDOUY, BAILEY, ed. *Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Superconductivity for Accelerators: Heat Transfer and Cooling Techniques at Low Temperature* [online]. Erice, Italy: CERN, 2014. [cit. 2023-03-13] Dostupné také z: [cds.cern.ch/record/1974061/files/CERN-2014-005-p329.pdf](http://cds.cern.ch/record/1974061/files/CERN-2014-005-p329.pdf)
- [11] BARRON, Randall F. a Gregory F. NELLIS. *Cryogenic Heat transfer*. Second Edition. Boca Raton, London, New York: Taylor and Francis, 2016. ISBN 978-1-4822-2745-1.
- [12] EKIN, Jack W. *Experimental Techniques for Low Temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties, and Superconductor Critical-Current Testing*. New York: Oxford University Press, 2006. ISBN ISBN 0-19-857054-6.
- [13] SKRBEK, Ladislav. *Fyzika nízkých teplot*. Praha: Matfyzpress, 2011. ISBN ISBN978-80-7378-168-2
- [14] COLWELL, Catharine H. *PhysicsLAB: Excitation* [online]. PhysicsLAB [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [dev.physicslab.org/Document.aspx?doctype=3&filename=AtomicNuclear\\_Excitation.xml](http://dev.physicslab.org/Document.aspx?doctype=3&filename=AtomicNuclear_Excitation.xml)
- [15] BOSTOCK, Thomas D. a Ralph G. SCURLOCK. *Low-Loss Storage and Handling of Cryogenic Liquids: The Application of Cryogenic Fluid Dynamics*. International Cryogenics Monograph Series. Second Edition. Southampton, UK: Springer Cham, 2019. ISBN 978-3-030-10640-9. [cit. 2023-03-13] Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-10641-6
- [16] POPOV, Dimityr, Borislav a ALVAREZ. *Cryogenic heat exchangers for process cooling and renewable energy storage*. Applied Thermal Engineering, 2019. ISSN 1359-4311. [cit. 2023-03-13] Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.02.106



- [17] P. FERNÁNDEZ-PISÓN, J.A. RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, E. GARCÍA-TABARÉS, I. AVILÉS-SANTILLANA a S. SGOBBA. *Flow and fracture of austenitic stainless steels at cryogenic temperatures: Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2021. [cit. 2023-03-13] Dostupné z: doi: /10.1016/j.engfracmech.2021.108042
- [18] KIM, Jeong-Hyeon, Chi-Seung LEE, Myung-Hyun KIM a Jae-Myung LEE. A constitutive equation for predicting the material nonlinear behavior of AISI 316L, 321, and 347 stainless steel under low-temperature conditions: *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2014. [cit. 2023-03-13] Dostupné z: doi: /10.1016/j.ijmecsci.2014.06.008
- [19] BALÁŠ, Marek. Výměníky se změnou fáze [Přednáška]. Brno: FSI VUT, Zimní semestr 2022/23.
- [20] *Compendium of chemical terminology: Gold Book* [online]. Second Edition. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1997 [cit. 2023-05-13]. ISBN ISBN 0-9678550-9-8. Dostupné z: [goldbook.iupac.org/doi:10.1351/goldbook](http://goldbook.iupac.org/doi:10.1351/goldbook)
- [21] STRICKLER, Chris. Material & Designs Used for Low-Temp Heat Exchangers. *Super radiator coils* [online]. USA, 25.1. 2021 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.superradiatorcoils.com/blog/low-temp-heat-exchanger-material-and-design-options>
- [22] Duplex stainless steel makes an excellent choice for manufacturers. *ENERQUIP* [online]. USA [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [www.enerquip.com/duplex-stainless-steel-makes-an-excellent-choice-for-manufacturers/](http://www.enerquip.com/duplex-stainless-steel-makes-an-excellent-choice-for-manufacturers/)
- [23] Alternatives to Copper & Aluminum for Heat Exchangers. *Super radiator coils* [online]. USA, 8.9. 2020 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [www.superradiatorcoils.com/blog/other-than-copper-and-aluminum-what-materials-are-used-to-build-heat-exchangers](http://www.superradiatorcoils.com/blog/other-than-copper-and-aluminum-what-materials-are-used-to-build-heat-exchangers)
- [24] *Kapicův odpor: Fyzika a technika nízkých teplot* [online]. Brno: MUNI, 2009 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: [physics.mff.cuni.cz/kfnt/vyuka/fnt/Kapicuv\\_odpor.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/kfnt/vyuka/fnt/Kapicuv_odpor.pdf)
- [25] Lyophilization equipment. In: *Wixstatic* [online]. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: [https://static.wixstatic.com/media/748b64\\_acd4ca5c0aaa442abded79ee7ae154f7~mv2.jpg/v1/fill/w\\_740,h\\_320,al\\_c,q\\_80,usm\\_0.66\\_1.00\\_0.01,enc\\_auto/748b64\\_acd4ca5c0aaa442abded79ee7ae154f7~mv2.jpg](https://static.wixstatic.com/media/748b64_acd4ca5c0aaa442abded79ee7ae154f7~mv2.jpg/v1/fill/w_740,h_320,al_c,q_80,usm_0.66_1.00_0.01,enc_auto/748b64_acd4ca5c0aaa442abded79ee7ae154f7~mv2.jpg)
- [26] *Alloys* [online]. Brno: Bibusmetals, 2010 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: [www.bibusmetals.cz/en/alloys/](http://www.bibusmetals.cz/en/alloys/)
- [27] Lyophilization process. In: *Sanity* [online]. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: [cdn.sanity.io/images/0vv8moc6/biopharm/63398294165b5eac42c0532abb8cb1199d5f3911-464x206.jpg?fit=crop&auto=format](http://cdn.sanity.io/images/0vv8moc6/biopharm/63398294165b5eac42c0532abb8cb1199d5f3911-464x206.jpg?fit=crop&auto=format)
- [28] *Freeze dryers and lyophilizers for your production: Single chamber systems for efficient and cost-effective freeze drying* [online]. Bad Grund: Zirbus [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.zirbus.com/freeze-dryer/bulk-freeze-dryer/>
- [29] *Oceli do nízkých a kryogenních teplot* [online]. Plzeň: ZCU [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: [https://www.ateam.zcu.cz/download/nizke\\_teploty.pdf](https://www.ateam.zcu.cz/download/nizke_teploty.pdf)
- [30] KAYNAK, Yusuf. *Cryogenic Cooling-induced Machining Performance of AISI 1045 Steel* [online]. 2015. Karabuk, 2015 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: [www.researchgate.net/publication/275701714\\_Cryogenic\\_Cooling-induced\\_Machining\\_Performance\\_of\\_AISI\\_1045\\_Steel](http://www.researchgate.net/publication/275701714_Cryogenic_Cooling-induced_Machining_Performance_of_AISI_1045_Steel)
- [31] *KMT/PSM\*M - Progresivní strojírenské materiály (2022): Oceli pro kryogenní aplikace* [online]. Liberec: TUL, 2022 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=442797&forceview=1>

- [32] NAGAI, Kotobu, T. YURI, Toshio OGATA a Osamu UMEZAWA. *Cryogenic Mechanical Properties of Ti6Al4V Alloys with Three Levels of Oxygen Content* [online]. Isij International - ISIJ INT, 1991 [cit. 2023-04-13]. 31. 882-889. Dostupné z: doi:10.2355/isijinternational.31.882
- [33] Tube heat exchanger. In: Wiley [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: [onlinelibrary.wiley.com/cms/asset/f060e0df-782f-4070-947b-930df16ed2e7/etep13247-fig-0003-m.jpg](https://onlinelibrary.wiley.com/cms/asset/f060e0df-782f-4070-947b-930df16ed2e7/etep13247-fig-0003-m.jpg)
- [34] *Tabulka slitin: Standardně používané Al slitiny pro zápusťkové výkovky* [online]. Kamenice: Strojmetal Aluminium Forging [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: [www.strojmetal.cz/tabulka-slitin](http://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin)
- [35] *Cryogenics Material Properties* [online]. USA: NIST [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/materialproperties.htm>
- [36] KANDLIKAR, S. G., Masahiro SHOJI a V. K. DHIR. *Handbook of phase change: boiling and condensation*. Philadelphia, 1999. ISBN 15-603-2634-4.
- [37] *Slovníky.cz* [online]. Praha: Maxdorf, 2023 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: [www.slovníky.cz/](http://www.slovníky.cz/)
- [38] SCHMIEDBERGER, Karel. *Historie lyofilizace* [online]. Praha: Lyotrade Freeze Dryers, 2022 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [www.lyotrade.cz/post/2017/01/14/historie-lyofilizace](http://www.lyotrade.cz/post/2017/01/14/historie-lyofilizace)
- [39] Dependence of heat flux and wall temperature difference. In: *springernature.com* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: [media.springernature.com/lw685/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-031-20924-6\\_8/MediaObjects/505964\\_1\\_En\\_8\\_Fig12\\_HTML.png](https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-031-20924-6_8/MediaObjects/505964_1_En_8_Fig12_HTML.png)
- [40] Industrial MacDermid Enthone. (n.d.). Therminol® LT – Low-Temperature Heat Transfer Fluids [online] [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://industrial.macdermidenthone.com/products-and-applications/heat-transfer-fluids/therminol/low-temperature>
- [41] Chen, J., Han, J., & Xu, D. (2019). Thermal expansion properties of the polycaprolactam nanocomposites reinforced with single-walled carbon nanotubes. *Results in Physics*, 12, 1645-1652. ISSN 2211-3797. Dostupné z: doi:10.1016/j.rinp.2019.01.067.
- [42] *TEMA: Standards of The Tubular Exchanger Manufacturers Association* [online]. Tenth Edition. USA: Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2019 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: [www.ingeduca.com/wp-content/uploads/2020/11/TEMA-10th-Edition-2019.pdf](http://www.ingeduca.com/wp-content/uploads/2020/11/TEMA-10th-Edition-2019.pdf)
- [43] Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden, M.O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.
- [44] Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014). Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498-2508. doi:10.1021/ie4033999.
- [45] LEACHMAN, Jacob W., Richard T. JACOBSEN, Eric W. LEMMON a Steven G. PENONCELLO. *Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids*. Second Edition. New York: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-57833-0.
- [46] NEREZOVÉ TRUBKY BEZEŠVÉ. *Inoxsteel.cz* [online]. Hranice, 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: [www.inoxsteel.cz/produkty/nerezove-trubky-bezesve](http://www.inoxsteel.cz/produkty/nerezove-trubky-bezesve)

- [47] KUPPAN, T. *Heat exchanger design handbook* [online]. Second edition. Boca Raton: CRC Press, 2013 [cit. 2023-05-16]. Mechanical engineering. ISBN 978-042-9105-647. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b14877/heat-exchanger-design-handbook>
- [48] THOME, John R. *Engineering Data Book III* [online]. 2004-2006. Switzerland: Wolverine Tube, 2006 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: [pdfcoffee.com/wolverine-engineering-data-book-pdf-free.html](http://pdfcoffee.com/wolverine-engineering-data-book-pdf-free.html)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Pro přehlednost je seznam použitých symbolů a zkratek rozdělen na řešeršní část a praktickou.

### Řešeršní část

Symbol	Veličina	Jednotka
$c_p$	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$D$	Charakteristický rozměr	m
$E$	Youngův modul	MPa
$g$	Gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
$Gr$	Grashofovo číslo	—
$L$	Charakteristivká délka	m
$l$	Délka	m
$Nu$	Nusseltovo číslo	—
$Pr$	Prandtlovo číslo	—
$q$	Tepelný tok	$W \cdot m^{-2}$
$Re$	Reynoldsovo číslo	—
$Re$	Mez kluzu	MPa
$T$	Teplota	K
$w$	Rychlost proudění	$m \cdot s^{-1}$
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\beta$	Součinitel objemové roztažnosti	$K^{-1}$
$\Delta l$	Změna délky	m
$\Delta t$	Teplotní diference	K
$\varepsilon$	Elastická deformace	—
$\eta$	Dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
$\lambda$	Tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\nu$	Kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\sigma$	Stefanova-Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
$\sigma_m$	Mechanické napětí	MPa

## Praktická část

### Index Význam

1	1. část výměníku
2	2. část výměníku
3	3. část výměníku
g	Plyn
chl	Chladicí látka
tl	Teplonosná látka
l	Kapalina
p	Plášť
t	Trubka

### Symbol Veličina Jednotka

%OD	Předimenzování výměníku	%
A	Teplosměnná plocha	$m^{-2}$
A <sub>1</sub>	Teplosměnná plocha 1. část výměníku	$m^{-2}$
A <sub>2</sub>	Teplosměnná plocha 2. část výměníku	$m^{-2}$
A <sub>3</sub>	Teplosměnná plocha 2. část výměníku	$m^{-2}$
A <sub>i</sub>	Vnitřní plocha trubky pro přestupu tepla	$m^{-2}$
A <sub>m</sub>	Střední efektivní plocha přestupu tepla	$m^{-2}$
A <sub>o</sub>	Celková plocha přestupu tepla	$m^{-2}$
A <sub>odhad</sub>	Odhadovaná teplosměnná plocha	$m^{-2}$
A <sub>s</sub>	Průtočná plocha pláště	$m^{-2}$
A <sub>t</sub>	Průtočná plocha trubek	$m^{-2}$
B	Rozteč přepážek	m
C	Volná vzdálenost mezi trubkami	m
CL	Konstanta zohledňující uspořádání trubek	–
c <sub>p,tl</sub>	Tepelná kapacita teplonosné látky	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
CTP	Konstanta zohledňující počet chodů výměníku	–
D	Vnější průměr trubky	m
d	Vnitřní průměr trubky	m
D <sub>e</sub>	Efektivní průměr pro trojúhelníkové uspořádání trubek	m
d <sub>n</sub>	Průměr vstupního hrdla	m
D <sub>s</sub>	Průměr pláště	m
D <sub>s,odhad</sub>	Odhadovaný průměr pláště	m
f <sub>chl</sub>	Součinitel tření v chladicí látce	–
f <sub>t</sub>	Součinitel tření trubek	–
f <sub>t,1</sub>	Součinitel tření 1.část	–
f <sub>t,3</sub>	Součinitel tření	–
f <sub>TP</sub>	Součinitel tření při dvoufázovém proudění	–
G	Měrný hmotnostní tok	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$

$g$	Gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
$G_{chl}$	Měrný hmotnostní tok chladicí látky	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
$G_{tl}$	Měrný hmotnostní tok teplotnosné látky	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
$G_{tl,n}$	Hmotnostní průtok hrdlem	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
$h$	Entalpie	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h_{chl,12}$	Entalpie chladicí látky mezi částmi 1 a 2	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h_{chl,23}$	Entalpie chladicí látky mezi částmi 2 a 3	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h_{chl,in}$	Entalpie chladicí látky mezi na vstupu do výměníku	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h_{chl,out}$	Entalpie chladicí látky mezi na výstupu z výměníku	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h_{tl,21}$	Entalpie teplotnosné látky mezi částmi 2 a 1	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h_{tl,32}$	Entalpie teplotnosné látky mezi částmi 3 a 2	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h_{tl,in}$	Entalpie teplotnosné látky na vstupu do výměníku	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h_{tl,out}$	Entalpie teplotnosné látky na výstupu z výměníku	$kJ \cdot kg^{-1}$
$k$	Součinitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$k_1$	Součinitel prostupu tepla 1. části výměníku	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$k_2$	Součinitel prostupu tepla 2. části výměníku	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$k_3$	Součinitel prostupu tepla 3. části výměníku	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$k_{odhad}$	Odhadovaný součinitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$L_t$	Efektivní délka trubky	$m$
$L_{t,1}$	Efektivní délka trubky 1. část	$m$
$L_{t,2}$	Efektivní délka trubky 2. část	$m$
$L_{t,3}$	Efektivní délka trubky 3. část	$m$
$L_{t,vyp}$	Vypočítaná potřebná délka trubky	$m$
$m_{chl}$	Hmotnostní průtok chladicí látky	$kg \cdot s^{-1}$
$m_{tl}$	Hmotnostní průtok teplotnosné látky	$kg \cdot s^{-1}$
$N_b$	Počet tahů výměníku	—
$N_t$	Počet trubek výměníku	—
$N_{t,odhad}$	Odhad počtu trubek výměníku	—
$Nu_1$	Pomocné Nusseltovo číslo 1	—
$Nu_2$	Pomocné Nusseltovo číslo 2	—
$Nu_{chl,1}$	Nusseltovo číslo chladicí látky 1.část	—
$Nu_{chl,2}$	Nusseltovo číslo chladicí látky 2.část	—
$Nu_{chl,3}$	Nusseltovo číslo chladicí látky 3.část	—
$Nu_{tl,1}$	Nusseltovo číslo teplotnosné látky 1.část	—
$Nu_{tl,2}$	Nusseltovo číslo teplotnosné látky 2.část	—
$Nu_{tl,3}$	Nusseltovo číslo teplotnosné látky 3.část	—
$Nu_{tl,lam,3}$	Nusseltovo číslo teplotnosné látky pro laminární proudění 3.část	—
$Nu_{tl,tur,3}$	Nusseltovo č. teplotnosné látky pro turbulentní proudění 3.část	—
$p$	Tlak	$MPa$
$p^*$	Poměr tlaku fázové změny ke kritickému tlaku	—
$p_{atm}$	Atmosférický tlak	$MPa$
$p_c$	Kritický tlak	$MPa$
$p_{c,k}$	Kritický tlak kryptonu	$MPa$

$p_{c,m}$	Kritický tlak metanu	MPa
$p_{max,k}$	Maximální tlak v zařízení kryptonu	MPa
$p_{max,m}$	Maximální tlak v zařízení metanu	MPa
$p_{min,k}$	Minimální tlak v zařízení kryptonu	MPa
$p_{min,m}$	Minimální tlak v zařízení metanu	MPa
PR	Konstanta pro rozteč trubek	—
Pr	Prantlovo číslo	—
$Pr_{chl}$	Prantlovo číslo chladící látky	—
$Pr_{chl,1}$	Prantlovo číslo chladící látky 1. část	—
$Pr_{chl,2}$	Prantlovo číslo chladící látky 2. část	—
$Pr_{chl,3}$	Prantlovo číslo chladící látky 3. část	—
$Pr_{tl}$	Prantlovo číslo teponosné látky	—
$Pr_{tl,1}$	Prantlovo číslo teponosné látky 1. část	—
$Pr_{tl,3}$	Prantlovo číslo teponosné látky 3. část	—
$Pr_{tl,1,2}$	Prantlovo číslo teponosné látky v kapalném skupenství 3. části	—
PT	Rozteč trubek	m
$p_{tl}$	Tlak teponosné látky	MPa
Q	Výkon	W
$Q_1$	Výkon 1. část	W
$Q_2$	Výkon 2. část	W
$Q_3$	Výkon 3. část	W
$Q_{poz}$	Požadovaný výkon výměníku	W
$Q_{skut}$	Skutečný výkon výměníku	W
Re	Reynoldsovo číslo	—
$Re_{chl}$	Reynoldsovo číslo chladící látky pro celý výměník	—
$Re_{chl,1}$	Reynoldsovo číslo chladící látky pro 1. část	—
$Re_{chl,2}$	Reynoldsovo číslo chladící látky pro 2. část	—
$Re_{chl,3}$	Reynoldsovo číslo chladící látky pro 3. část	—
$Re_{tl}$	Reynoldsovo číslo teponosné látky pro celý výměník	—
$Re_{tl,1}$	Reynoldsovo číslo teponosné látky pro 1. část	—
$Re_{tl,2}$	Reynoldsovo číslo teponosné látky pro 2. část	—
$Re_{tl,3}$	Reynoldsovo číslo teponosné látky pro 3. část	—
$Re_{tl,TP,2}$	Reynoldsovo číslo dvoufázové proudění	—
$R_{fi}$	Odpor zanášením uvnitř trubky	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
$R_{fo}$	Odpor zanášením vně trubky	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
$r_i$	Vnitřní poloměr trubky	m
$r_o$	Vnější poloměr trubky	m
S	Plocha mezi pláštěm a svazkem	$m^{-2}$
SC	Podchlazení tekutiny	$^{\circ}C$
SH	Přehřátí tekutiny	$^{\circ}C$
$T_{c,k}$	Kritická teplota kryptonu	$^{\circ}C$
$T_{c,m}$	Kritická teplota metanu	$^{\circ}C$
$T_{ch,chl}$	Střední teplota chladící látky	$^{\circ}C$

$T_{ch,chl,1}$	Střední teplota chladicí látky v 1. části	$^{\circ}\text{C}$
$T_{ch,chl,2}$	Střední teplota chladicí látky v 2. části	$^{\circ}\text{C}$
$T_{ch,chl,3}$	Střední teplota chladicí látky v 3. části	$^{\circ}\text{C}$
$T_{ch,tl}$	Střední teplota teponosné látky	$^{\circ}\text{C}$
$T_{ch,tl,1}$	Střední teplota teponosné látky v 1. části	$^{\circ}\text{C}$
$T_{ch,tl,2}$	Střední teplota teponosné látky v 2. části	$^{\circ}\text{C}$
$T_{ch,tl,3}$	Střední teplota teponosné látky v 3. části	$^{\circ}\text{C}$
$T_{chl,12}$	Teplota chladicího média mezi částí 1 a 2	$^{\circ}\text{C}$
$T_{chl,23}$	Teplota chladicího média mezi částí 2 a 3	$^{\circ}\text{C}$
$T_{chl,in}$	Teplota chladicího média na vstupu do výměníku	$^{\circ}\text{C}$
$T_{chl,out}$	Teplota chladicího média na výstupu z výměníku	$^{\circ}\text{C}$
$T_{tl,21}$	Teplota teponosné látky mezi výměníky 2 a 3	$^{\circ}\text{C}$
$T_{tl,32}$	Teplota teponosné látky mezi výměníky 1 a 2	$^{\circ}\text{C}$
$T_{tl,in}$	Teplota teponosné látky na vstupu	$^{\circ}\text{C}$
$T_{tl,out}$	Teplota teponosné látky na výstupu	$^{\circ}\text{C}$
$T_w$	Střední teplota stěny	$^{\circ}\text{C}$
$T_{w,1}$	Střední teplota stěny v 1.části	$^{\circ}\text{C}$
$T_{w,2}$	Střední teplota stěny v 2.části	$^{\circ}\text{C}$
$T_{w,3}$	Střední teplota stěny v 3.části	$^{\circ}\text{C}$
$x$	Hmotnostní podíl plynné fáze k celkovému množství tekutiny	—
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_{chl}$	Součinitel přestupu tepla na straně chladicí látky	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_{chl,1}$	Součinitel přestupu tepla na straně chladicí látky v 1.části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_{chl,2}$	Součinitel přestupu tepla na straně chladicí látky v 2.části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_{chl,3}$	Součinitel přestupu tepla na straně chladicí látky v 3.části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_s$	Součinitel přestupu tepla vně trubky	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_t$	Součinitel přestupu tepla uvnitř trubky	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_{tl,1}$	Součinitel přestupu tepla na straně teponosné látky 1.část	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_{tl,2}$	Součinitel přestupu tepla na straně teponosné látky 2. část	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha_{tl,3}$	Součinitel přestupu tepla na straně teponosné látky 3. část	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$\gamma$	Korekční faktor pro přechodné prodění	—
$\Delta p_{c,e}$	Tlaková ztráta změnou proudu	MPa
$\Delta p_{f,2}$	Tlaková změna způsobená třením 2. část	MPa
$\Delta p_{gr,2}$	Tlaková změna způsobená gravitačním zrychlením 2. část	MPa
$\Delta p_{m,2}$	Tlaková změna způsobená hybností 2. část	MPa
$\Delta p_n$	Tlaková ztráta ve vstupních hrdlech	MPa
$\Delta p_p$	Tlaková ztráta v plášti výměníku	MPa
$\Delta p_t$	Tlaková ztráta v trubkách	MPa
$\Delta p_{t,1}$	Tlaková změna v 1. části	MPa
$\Delta p_{t,2}$	Tlaková změna v 2. části	MPa
$\Delta p_{t,3}$	Tlaková změna v 3. části	MPa
$\Delta p_{t,f}$	Tlaková ztráta třením v trubkách	MPa
$\Delta T_1$	Rozdíl teplot LMTD na jedné straně výměníku	$^{\circ}\text{C}$



$\Delta T_{1,1}$	Rozdíl teplot LMTD na jedné straně výměníku 1. část	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{1,2}$	Rozdíl teplot LMTD na jedné straně výměníku 2.část	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{1,3}$	Rozdíl teplot LMTD na jedné straně výměníku 3.část	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_2$	Rozdíl teplot LMTD na druhé straně výměníku	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{2,1}$	Rozdíl teplot LMTD na druhé straně výměníku 1. část	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{2,2}$	Rozdíl teplot LMTD na druhé straně výměníku 2.část	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{2,3}$	Rozdíl teplot LMTD na druhé straně výměníku 3.část	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{\ln}$	Střední logaritmický spád (LMTD) výměníku	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{\ln 1}$	Střední logaritmický spád (LMTD) v 1. části	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{\ln 2}$	Střední logaritmický spád (LMTD) v 2. části	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_{\ln 3}$	Střední logaritmický spád (LMTD) v 3. části	$^{\circ}\text{C}$
$\varepsilon_H$	Homogenní podíl plynné fáze	—
$\theta$	Orientace trubky	$^{\circ}$
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{chl}}$	Tepelná vodivost chladící látky	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{chl},1}$	Tepelná vodivost chladící látky v 1. části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{chl},2}$	Tepelná vodivost chladící látky v 2. části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{chl},3}$	Tepelná vodivost chladící látky v 3.části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_m$	Tepelná vodivost materiálu výměníku	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{m,1}$	Tepelná vodivost materiálu výměníku 1. části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{m,2}$	Tepelná vodivost materiálu výměníku 2. části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{m,3}$	Tepelná vodivost materiálu výměníku 3. části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{tl}}$	Tepelná vodivost teplonosné látky	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{tl},1}$	Tepelná vodivost teplonosné látky v 1. části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{tl},3}$	Tepelná vodivost teplonosné látky v 3. části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_{\text{tl},1,2}$	Tepelná vodivost teplonosné látky v kapalném skup. ve 2.části	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\lambda_w$	Tepelná vodivost trubky výměníku	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\mu$	Dynamická viskozita	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{chl}}$	Dynamická viskozita chladící látky	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{chl},1}$	Dynamická viskozita chladící látky v 1.části	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{chl},2}$	Dynamická viskozita chladící látky v 2.části	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{chl},3}$	Dynamická viskozita chladící látky v 3.části	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{tl}}$	Dynamická viskozita teplonosné látky	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{tl},1}$	Dynamická viskozita teplonosné látky v 1.části	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{tl},3}$	Dynamická viskozita teplonosné látky v 2.části	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{\text{TP}}$	Dynamická viskozita dvoufázového proudění	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{w,\text{chl}}$	Dynamická viskozita chladící látky u stěny	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{w,\text{chl},1}$	Dynamická viskozita chladící látky u stěny v 1.části	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{w,\text{chl},2}$	Dynamická viskozita chladící látky u stěny v 2.části	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\mu_{w,\text{chl},3}$	Dynamická viskozita chladící látky u stěny v 3.části	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\xi_1$	Pomocný součinitel 2 část	—
$\xi_3$	Pomocný součinitel 3 část	—
$\pi$	Ludolfovo číslo	—

$\rho_H$	Homogenní hustotu dvoufázového proudění	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{chl}$	Střední hustota chladicí látky ve výměníku	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_k$	Hustota kryptonu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_m$	Hustota methanu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{tl}$	Hustota teplonosné látky	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{tl,1}$	Hustota teplonosné látky 1. části	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{tl,3}$	Hustota teplonosné látky 3. části	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{tl,g,2}$	Hustota teplonosné látky v plynném skupenství 2. část	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{tl,in}$	Hustota teplonosné látky na vstupu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\rho_{tl,l,2}$	Hustota teplonosné látky v kapalném skupenství 2. část	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\phi_s$	Korekční faktor na proměnné vlastnosti	—



## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Vlastnosti kryptonu při tlaku 0,7618 MPa a teplotách 120-180 K
- Příloha 2 p-h diagram kryptonu
- Příloha 3 Thermanol VLT datasheet
- Příloha 4 Výpočetní tabulka excel pro vlastnosti materiálů
- Příloha 5 Výpočet tlakových ztrát v sMath studio

Příloha 1 – Vlastnosti krypton při tlaku 0,7618 MPa a teplotách 120-180 K

**Vlastnosti kryptonu při tlaku 0,7618 MPa**

Teplota K	Hustota kg/m <sup>3</sup>	Entalpie kJ/kg	Entropie kJ/(kg·K)	Tepelná vodivost mW/(m·K)	Dynamická viskozita μPa·s	Kinematická viskozita cm <sup>2</sup> /s	Prandtlovo číslo -
120	2417,5	0,30714	0,00028	92,443	408,09	0,00169	2,2907
121	2409,9	0,82642	0,00459	91,737	398	0,00165	2,2546
122	2402,2	1,3465	0,00887	91,039	388,29	0,00162	2,22
123	2394,5	1,8674	0,01313	90,339	378,94	0,00158	2,1869
124	2386,7	2,3893	0,01735	89,639	369,92	0,00155	2,1554
125	2378,9	2,912	0,02155	88,939	361,23	0,00152	2,1252
126	2371,1	3,4358	0,02572	88,24	352,85	0,00149	2,0964
127	2363,2	3,9606	0,02987	87,541	344,76	0,00146	2,0689
128	2355,3	4,4865	0,034	86,842	336,94	0,00143	2,0427
129	2347,3	5,0135	0,0381	86,144	329,4	0,0014	2,0176
130	2339,3	5,5418	0,04218	85,446	322,1	0,00138	1,9936
131	2331,2	6,0713	0,04623	84,749	315,05	0,00135	1,9708
132	2323,1	6,6021	0,05027	84,052	308,22	0,00133	1,949
133	2315	7,1343	0,05429	83,355	301,62	0,0013	1,9282
134	2306,7	7,6679	0,05828	82,659	295,22	0,00128	1,9084
135	2298,5	8,203	0,06226	81,962	289,02	0,00126	1,8896
136	2290,2	8,7396	0,06622	81,267	283,01	0,00124	1,8717
137	2281,8	9,2779	0,07017	80,571	277,18	0,00121	1,8547
138	2273,4	9,8179	0,07409	79,875	271,53	0,00119	1,8385
139	2264,9	10,36	0,07801	79,18	266,04	0,00117	1,8232
140	2256,3	10,903	0,0819	78,485	260,7	0,00116	1,8087
141	2247,7	11,449	0,08579	77,789	255,52	0,00114	1,795
142	2239	11,996	0,08965	77,094	250,49	0,00112	1,7821
143	2230,3	12,546	0,09351	76,399	245,59	0,0011	1,77
144	2221,4	13,097	0,09736	75,703	240,82	0,00108	1,7586
145	2212,5	13,651	0,10119	75,007	236,17	0,00107	1,7479
146	2203,5	14,208	0,10501	74,311	231,65	0,00105	1,738
147	2194,5	14,767	0,10883	73,615	227,24	0,00104	1,7288
148	2185,3	15,328	0,11263	72,918	222,95	0,00102	1,7203
149	2176,1	15,892	0,11643	72,221	218,75	0,00101	1,7125
150	2166,8	16,459	0,12022	71,523	214,66	0,00099	1,7053
151	2157,4	17,028	0,12401	70,824	210,66	0,00098	1,6989
152	2147,9	17,601	0,12779	70,125	206,76	0,00096	1,6932
153	2138,3	18,177	0,13156	69,425	202,94	0,00095	1,6881
153,15*	2136,8	18,263	0,13213	69,321	202,38	0,00095	1,6874
153,15*	57,651	110,66	0,73546	5,4361	13,925	0,00242	0,92504
154	57,162	110,97	0,73744	5,4568	13,993	0,00245	0,91472
155	56,604	111,32	0,73974	5,4816	14,074	0,00249	0,90354

**Pokračování na další stránce**

**Pokračování vlastnosti kryptonu při tlaku 0,7618 MPa**

Teplota K	Hustota kg/m <sup>3</sup>	Entalpie kJ/kg	Entropie kJ/(kg·K)	Tepelná vodivost mW/(m·K)	Dynamická viskozita μPa·s	Kinematická viskozita cm <sup>2</sup> /s	Prandtlovo číslo -
156	56,061	111,67	0,74199	5,5069	14,155	0,00253	0,89326
157	55,533	112,02	0,74419	5,5325	14,237	0,00256	0,88377
158	55,019	112,36	0,74636	5,5584	14,318	0,0026	0,87499
159	54,518	112,7	0,74849	5,5847	14,4	0,00264	0,86685
160	54,029	113,03	0,75059	5,6112	14,481	0,00268	0,85927
161	53,552	113,36	0,75266	5,638	14,563	0,00272	0,8522
162	53,087	113,69	0,75469	5,6651	14,645	0,00276	0,84559
163	52,632	114,02	0,7567	5,6923	14,728	0,0028	0,83939
164	52,187	114,34	0,75867	5,7198	14,81	0,00284	0,83357
165	51,752	114,66	0,76062	5,7474	14,892	0,00288	0,82809
166	51,327	114,98	0,76255	5,7752	14,975	0,00292	0,82292
167	50,91	115,3	0,76445	5,8032	15,057	0,00296	0,81803
168	50,503	115,61	0,76632	5,8313	15,14	0,003	0,81341
169	50,103	115,92	0,76818	5,8595	15,223	0,00304	0,80903
170	49,711	116,23	0,77001	5,8879	15,305	0,00308	0,80487
171	49,327	116,54	0,77182	5,9164	15,388	0,00312	0,80091
172	48,95	116,85	0,77361	5,945	15,471	0,00316	0,79714
173	48,581	117,15	0,77538	5,9737	15,554	0,0032	0,79355
174	48,218	117,46	0,77713	6,0025	15,637	0,00324	0,79011
175	47,862	117,76	0,77887	6,0313	15,72	0,00328	0,78683
176	47,513	118,06	0,78058	6,0603	15,803	0,00333	0,78369
177	47,169	118,36	0,78228	6,0893	15,886	0,00337	0,78069
178	46,832	118,66	0,78396	6,1185	15,969	0,00341	0,7778
179	46,5	118,96	0,78563	6,1476	16,052	0,00345	0,77504
180	46,174	119,25	0,78728	6,1769	16,136	0,00349	0,77238

\* Fázová změna – kapalná fáze výše, plynná níže

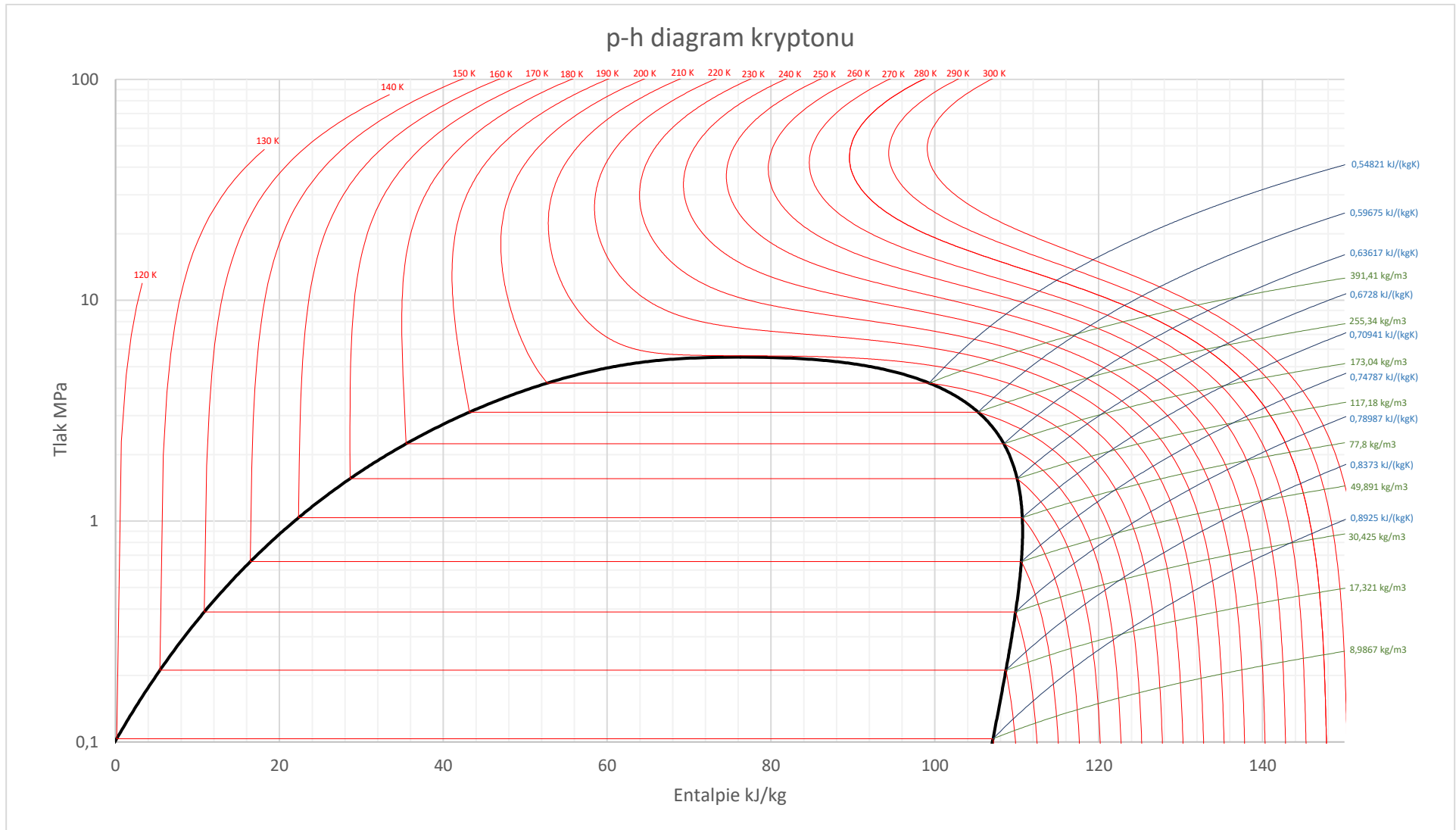
Data vygenerována z programu Refprop 10 [43]





## Příloha 2 – p-h diagram kryptonu





*p-h diagram kryptonu podle dat z Refprop 10 [43] vykresleno v programu Excel*