



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## ANALÝZA PROCESU STLAČOVÁNÍ VZDUCHU JAKO ÚLOŽIŠTĚ ENERGIE V SYSTÉMU ANSYS FLUENT

ANALYSES OF THE COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE PROCES IN ANSYS FLUENT SYSTEM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Věra Hájková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

BRNO 2022



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Studentka:** Věra Hájková

**ID:** 220803

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Analýza procesu stlačování vzduchu jako úložiště energie v systému Ansys Fluent**

**POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Nastudujte problematiku v oblasti Compressed Air Energy Storage (CAES). Seznamte se se systémem Ansys Fluent. Nastudujte problematiku termodynamiky v oblasti stlačování plynu. Připravte matematicko-fyzikální model úložiště stlačeného vzduchu včetně okrajových podmínek v oblasti kompresoru, výkonu a jeho teplotní závislosti.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 2.6.2022

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce v úvodu pojednává o různých typech akumulace energie. Popisuje jednotlivé technologie, jejich funkce, výhody a nevýhody. Srovnává je na základě poměru ESOI, což je poměr skladované energie a energie investované do výroby. Hlavním typem akumulace energie, kterým se semestrální práce zabývá, je skladování energie pomocí stlačeného vzduchu. V práci je popsán princip tohoto způsobu ukládání energie a také společnosti a projekty, které se touto technologií zabývají nebo ji využívají. Dále je nastíněna problematika ztráty tepelné energie během stačování vzduchu, což vede k výraznému snížení účinnosti. Poslední částí práce je praktická část, která na modelovém příkladu ukazuje průběh teploty a tlaku při čerpání vzduchu do zásobníku.

## **Klíčová slova**

Akumulace energie, stlačený vzduch, CAES, ztráta energie, teplo, ANSYS

## **Abstract**

This bachelor thesis discusses different types of energy storage in the introduction. It describes the different technologies, their functions, advantages and disadvantages. It compares them on the basis of the ESOI ratio, which is the ratio of energy stored on invested. The main type of energy storage covered in the term paper is compressed air energy storage. The thesis describes the principle of a method of energy storage as well the companies and projects that are working on or using this technology. Furthermore, the issue of heat energy loss during air compression is outlined, which leads to a significant reduction in efficiency. The last part of the thesis is a practical part, which uses a model example to show the temperature and pressure evolution during the pumping of air into the storage tank.

## **Keywords**

Energy storage, compressed air, CAES, energy loss, heat, ANSYS

## **Bibliografická citace**

HÁJKOVÁ, Věra. *Analýza procesu stlačování vzduchu jako úložiště energie v systému Ansys Fluent* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142748>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce.doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.



# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Věra Hájková*

**VUT ID studenta:** *220803*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2021/22*

**Téma závěrečné práce:** *Analýza procesu stlačování vzduchu jako úložiště energie v systému Ansys Fluent*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 30. května 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 30. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1. AKUMULACE ENERGIE</b> .....	<b>10</b>
1.1 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE .....	10
1.1.1 Superkapacitory .....	10
1.1.2 Supravodivé magnetické akumulátory .....	10
1.2 AKUMULACE ELEKTROCHEMICKÉ ENERGIE .....	11
1.2.1 Olověné akumulátory .....	11
1.2.2 Ni-Cd akumulátory .....	11
1.2.3 Li-Ion akumulátory .....	11
1.2.4 Průtokové baterie .....	11
1.3 AKUMULACE MECHANICKÉ ENERGIE .....	12
1.3.1 Setrvačníky .....	12
1.3.2 Přečerpávací vodní elektrárny .....	13
1.3.3 Ukládání energie do vodíku .....	13
1.3.4 Stlačený vzduch .....	13
1.4 SROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ AKUMULACE ENERGIE .....	14
<b>2. SKLADOVÁNÍ ENERGIE VE STLAČENÉM VZDUCHU (CAES)</b> .....	<b>16</b>
2.1 PRINCIP .....	16
2.1.1 Advanced Adiabatic-CAES .....	17
2.2 ELEKTRÁRNY A PROJEKTY VYUŽÍVAJÍCÍ CAES .....	17
2.2.1 CAES elektrárny Huntorf a McIntosh .....	17
2.2.2 Projekt ADELE .....	18
2.2.3 Ukládání stlačeného vzduchu pod mořem .....	19
2.2.4 Projekt Hydrostor .....	19
2.2.5 Úložiště pod pískem .....	20
2.3 ZTRÁTA TEPLA .....	20
<b>3. KOMPRESIE IDEÁLNÍHO PLYNU</b> .....	<b>21</b>
3.1 KOMPRESOR .....	21
<b>4. PRINCIPY VYUŽITÉ K ŘEŠENÍ (MĚŘENÍ) ZTRÁTY TEPLA BĚHEM ČERPÁNÍ</b> .....	<b>24</b>
4.1 TERMOČLÁNKY .....	24
4.1.1 Seebeckův jev .....	24
4.1.2 Využití termočlánků .....	25
4.1.3 Použití v simulaci .....	25
4.2 CHLADÍCÍ OKRUH .....	25
<b>5. MODELOVÝ VÝPOČET</b> .....	<b>28</b>
5.1 POUŽITÝ SOFTWARE – ANSYS FLUENT .....	28
5.2 MODELOVÝ PŘÍKLAD .....	29
5.2.1 Nastavení okrajových podmínek .....	29
5.2.2 Nastavení výpočtu .....	30
5.2.3 Výpočet a výsledky .....	30

<b>6. ŘEŠENÍ.....</b>	<b>32</b>
6.1 JEN PRSTENCE .....	34
6.2 VYUŽITÍ TERMOČLÁNKŮ .....	35
6.3 CHLAZENÍ NA – 10 °C.....	36
6.4 PŘEDCHLAZENÍ NA 10 °C .....	37
6.5 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	38
6.5.1 Srovnání průběhů teploty ze simulace v nejteplejším okamžiku.....	39
6.5.2 Srovnání průběhů teploty ze simulace v čase ukončení čerpání .....	41
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>44</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>48</b>

# ÚVOD

Odběr elektrické energie ze sítě není v průběhu dne ani roku konstantní. Energetická soustava je nucena vyrovnávat tyto výkyvy pomocí regulace výroby elektřiny, která z pravidla nedokáže reagovat na změny dostatečně rychle. Z tohoto důvodu se zvyšuje poptávka po akumulaci energie, a to po jak krátkodobé, tak i dlouhodobé.

Základní funkcí akumulace je tedy uložit levnou přebytkovou elektrickou energii do formy elektrické, elektrochemické nebo mechanické energie, tak aby ji bylo možné později znovu využít.

Na základě rešerše o různých typech skladování energie lze porovnat jejich účinnosti v závislosti na životnosti. Jiným, v případě dlouhodobého uchovávání energie vhodnějším, ukazatelem je porovnání uskladněné energie ku energii vložené do vybudování a provozu skladovací technologie. Nejlepšího hodnocení podle tohoto kritéria dosahuje technologie skladování energie pomocí stlačeného vzduchu. Nevýhodou tohoto způsobu ukládání energie je však ztrátové teplo vznikající v průběhu stlačování plynu, které se následně v průběhu procesu skladování uvolňuje a značně tak snižuje účinnost celého cyklu.

Jako modelový příklad k popsání tepelných ztrát může sloužit zásobní tlaková láhev na plynné médium. K simulaci procesu komprese vzduchu do nádoby a následného ochlazení je použit simulační software ANSYS Fluent. Program využívá k výpočtu metodu konečných objemů.

Byly využity čtyři způsoby snižování poklesu tlaku vlivem ochlazení ohřátého vzduchu v průběhu stlačování. A to varianta přidání hmoty do objemu láhve (soustředné prstence), varianta s technologií termočlánků, díky které lze energii ve formě ztrátového tepla převést na elektrickou, a nakonec dvě řešení využívající princip chladicího okruhu. Pro každou tuto variantu byla provedena samostatná simulace.

Práce je rozdělena na teoretickou část, která ve třech kapitolách shrnuje problematiku akumulace energie. V první kapitole jsou popsány různé typy skladování energie a jejich srovnání. Druhá kapitola se zabývá technologií ukládání energie pomocí stlačeného vzduchu a přehledem výzkumných projektů využívající tento princip. Třetí kapitola stručně uvádí fyzikální podstatu stlačování plynu a popisuje funkci kompresoru, který. Poslední kapitola teoretické části popisuje principy (prstence, termočlánky, chladicí okruh) využití k řešení problematiky.

Další částí práce je praktická část zahrnující kapitolu pojednávající o programu ANSYS Fluent a výsledky simulace. Ta byla provedena prvně na modelovém příkladu pro ukázání chování plynu během stlačování a zjištění ovlivnění natlakování zásobníku ztrátou tepla během čerpání. Následně byly provedeny simulace pro čtyři další varianty, které měly omezit ohřev vzduchu během stlačování a jeho následné chladnutí, které zapříčiňuje pokles tlaku v zásobníku. Poslední kapitolou je shrnutí výsledků simulace.

# 1. AKUMULACE ENERGIE

Akumulace energie je proces, při kterém se určitý druh energie ukládá s účelem opětovného využití v budoucnosti. Cílem je uložení energie v době přebytku a jejího následného využití v době, kdy je jí nedostatek a poptávka je vysoká. [1]

Elektrickou energii lze jen velmi složitě uchovat přímo, z toho důvodu se využívají technologie pro vratnou přeměnu elektřiny na jinou formu energie tzv. sekundární formu, která se již dá skladovat. Způsoby skladování sekundární formy energie se dle principu akumulace rozdělují do několika skupin: akumulace elektrické, elektrochemické a mechanické energie. [1]

## 1.1 Akumulace elektrické energie

Ukládání elektrické energie bez přeměny na jinou formu energie, se zdá být nejvýhodnější. Problémem je, že zatím neexistuje princip, pomocí kterého by šlo dlouhodobě skladovat velké výkony s co nejmenšími ztrátami. [1]

### 1.1.1 Superkapacitory

Superkapacitory fungují na principu ukládání energie do elektrického pole nabitého kondenzátoru. Od klasických kondenzátorů se liší svou velmi vysokou elektrickou kapacitou.

Místo dielektrika používají roztok elektrolytu, který je umístěný mezi dvěma uhlíkovými elektrodami. Ionty nacházející se v elektrolytu se při nabíjení kondenzátoru přesouvají k elektrodám. Kladné ionty se ukládají na povrch záporné elektrody a záporné ionty se ukládají na kladnou elektrodu. Během vybíjení se ionty uvolňují zpět do elektrolytu. Energie je uchovávána ve formě náboje elektrostaticky vázaného na elektrodě. Je tak zaručena možnost rychlého nabíjení a vybíjení superkapacitoru a delší životnost elektrod. [2]

### 1.1.2 Supravodivé magnetické akumulátory

Jedná se o způsob uchovávání energie, který je stále spíše ve fázi testování a používá se tak hlavně v laboratořích. Je založen na principu supravodivosti, což je stav, při kterém v podstatě úplně zmizí elektrický odpor v látkách.

Elektrická energie (proud) se akumuluje v supravodivé cívce, která je ponořena v kapalném heliu. Tyto zařízení se označují zkratkou SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). Velikou výhodou akumulace energie pomocí supravodivých cívek je rychlá reakce, velmi krátká doba nabíjení a vybíjení a vysoká účinnost s malými ztrátami v čase. [3]

## 1.2 Akumulace elektrochemické energie

Systémy elektrochemické akumulace energie jsou převážně ve formě baterií a akumulátorů. Princip je založen na střídání nabíjecí a vybíjecí fáze, probíhající mezi elektrodami uloženými v elektrolytu. Různé typy baterií se rozlišují na základě látky elektrolytu a materiálu, z kterého jsou elektrody.

Nevýhodou bateriových článků je, že dávají poměrně malý výstupní výkon a musí tak být poskládány do bloků s větším množstvím článků. [1]

### 1.2.1 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory (PbA) jsou jedny z nejstarších a nejvíce rozšířených akumulátorů.

V jeho nabitém stavu tvoří kladnou elektrodu oxid olovičitý ( $\text{PbO}_2$ ) a zápornou elektrodu olovo (Pb) s vysokým měrným povrchem, díky velké pórovitosti. Elektrolyt je tvořen kyselinou sírovou ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Během vybíjení se kladná i záporná elektroda přemění na síran olovnatý ( $\text{PbSO}_4$ ) a zároveň dojde k ředění elektrolytu. [4]

Výhodou je nízká cena a odolnost vůči nízkým teplotám, nevýhodou je ekologická zátěž z důvodu toxicity olova. [1]

### 1.2.2 Ni-Cd akumulátory

U nikl-kadmiových baterií je v nabitém stavu kladná elektroda tvořena oxidem hydroxidů nikelnatého ( $\text{NiO}(\text{OH})$ ) a záporná elektroda kadmíem (Cd). Jako elektrolyt je zde hydroxid draselný (KOH) rozpuštěný ve vodě a napuštěný do separátoru.

Při vybíjení se záporná elektroda přemění na hydroxid kademnatý ( $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ) a kladná elektroda se přemění na hydroxid nikelnatý ( $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ). [4]

Výhodou je teplotní stálost a nízké samovybíjení, nevýhodou jedovatost kadmia. [3]

### 1.2.3 Li-Ion akumulátory

Lithium-iontové baterie v poslední době nahrazují Ni-Cd baterie hlavně z ekologických důvodů.

Kladná elektroda je tvořena různými oxidy kovů jako  $\text{LiCoO}_2$  nebo  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  a záporná elektroda je z grafitu. Elektrolyt je tekutý a je tvořen lithiovou solí v organickém rozpouštědle. Princip je stejný jako u ostatních baterií, tedy při vybíjení dochází k uvolňování Li z kladné elektrody a k následnému včlenění do materiálu záporné elektrody.

Li-Ion akumulátory mají velmi rychlou dobu náběhu a vysokou účinnost. Velkou nevýhodou je však jejich teplotní nestálost a degradace, což může v krajních případech končit i explozí. [1]

### 1.2.4 Průtokové baterie

Průtokové baterie nebo také průtočné či tekuté, umožňují nabití a vybití pomocí reakce dvou látek rozpuštěných v kapalině systému. Tato kapalina je ve dvou nádržích, v jedné

je pozitivní elektrolyt a ve druhé negativní. Nádrže jsou odděleny membránou, která má krátkou životnost a je tak hlavní nevýhodou tohoto systému. Membrána se však dá docela snadno vyměnit. Průtokových baterií je několik druhů: redoxní, bez membrány a hybridní. [5]

Název redoxní baterie je odvozen od redukční a oxidační reakce, na nichž je založeno nabíjení a vybíjení tohoto typu baterií. Příkladem jsou vanadové baterie. [3]

Hybridní průtokové baterie mají vždy jednu ze složek v pevné podobě. V tomto systému slouží elektrody jako substrát pro reakci. [6]

Výhodou průtokových baterií je vysoká stabilita a možnost ponechání ve vybitém stavu po delší dobu, bez toho, aby došlo ke snížení životnosti baterie. Nevýhodou je složitost skladování a nízká hustota energie, která je až dvacetkrát nižší než u Li-Ion baterií.

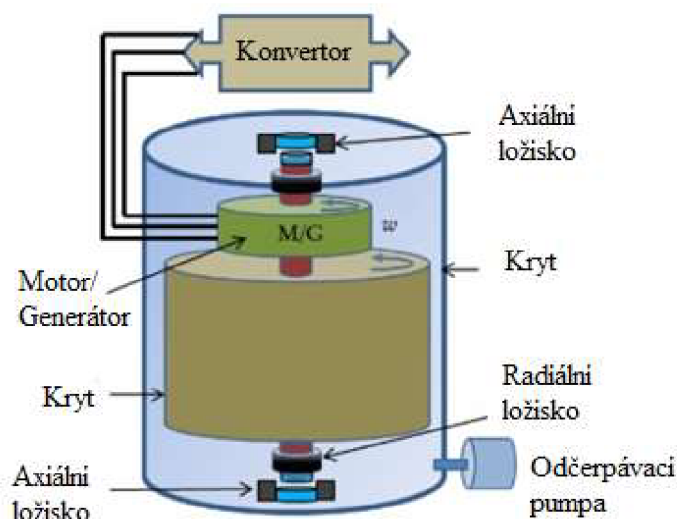
### 1.3 Akumulace mechanické energie

Systémy akumulace mechanické energie přeměňují elektrickou energii na energii kinetickou nebo potenciální.

#### 1.3.1 Setrvačníky

Pomocí setrvačnicků se ukládá energie do kinetické energie prostřednictvím rotoru, který je roztáčen generátorem. Principem je roztáčení těžkého disku elektromotorem, který se chová jako generátor elektrické energie. Celková energie setrvačnicku je závislá na velikosti a rychlosti rotoru a výkonu generátoru. [7]

Setrvačnick se skládá z rotujícího rotoru, motorgenerátoru, ložisek, výkonové elektroniky a krytu viz Obrázek 1.1. [8]



Obrázek 1.1 Setrvačnick



Značnou výhodou vůči bateriím mají setrvačníky v tom, že množství cyklů není omezeno chemickými pochody. [3]

V porovnání s jinými systémy skladování energie je mají dlouhou životnost, protože setrvačníky nevyžadují dlouhé cykly nabíjení a vybíjení. Lze je naopak rychle nabíjet a vybíjet v závislosti na aplikaci a nejsou ovlivněny hloubkou vybití. Životnost se odhaduje na více než 20 let a počty cyklů nabíjení a vybíjení na více než stovky tisíc, přičemž nedochází ke zhoršení jeho výkonu s časem. [8]

### **1.3.2 Přečerpávací vodní elektrárny**

Přečerpávací vodní elektrárny jsou velmi rozšířeným způsobem skladování energie.

Skládají se z horní a spodní nádrže. V době nedostatku elektrické energie se nashromážděná voda z horní nádrže přepouští do spodní. Dochází tak k přeměně potenciální energie vody z horní nádrže na kinetickou energii, která roztáčí turbínu pohánějící generátor.

Naopak v době, kdy je energie přebytek, se voda ze spodní nádrže přečerpá zpět do horní, aby se snížily ztráty z nevyužité energie.

Výhodou je možnost ukládat velké množství energie, nevýhodou jsou velké investiční náklady a omezené množství vhodných lokalit pro budování přečerpávacích elektráren. [1; 3]

### **1.3.3 Ukládání energie do vodíku**

Velice dynamicky rozvíjejícím se oborem je technologie ukládání přebytečné energie do vodíku. V případě že je na výrobu vodíku využita energie z obnovitelných zdrojů hovoří se o „zeleném vodíku“.

Nejčastější technologií výroby vodíku je elektrolýza vody. Tato metoda i když energeticky náročná dokáže vyrobit v krátkém čase velké množství vodíku.

Takto vyrobený vodík je možné přimíchávat do zemního plynu nebo přímo spalovat ve speciálně upravených spalovacích turbínách.

Další možností je využití vodíku ve palivových článcích. V současné době se již připravují palivové články ke komerčnímu použití ve automobilovém průmyslu

Výhodou je možnost dlouhodobě uchovávat takto vyrobenou energii ve formě vodíku v tlakových nádržích. Nevýhodou je nízká účinnost celého cyklu.

V zásadě lze považovat ukládání energie do vodíku za výjimečnou technologii která dokáže uložit více než 100 GW-h a může být současně použita jak pro velmi krátkodobé, tak i dlouhodobé zásobování energií. Je považována za nový typ technologie velkokapacitního skladování energie s velkým potenciálem. [9]

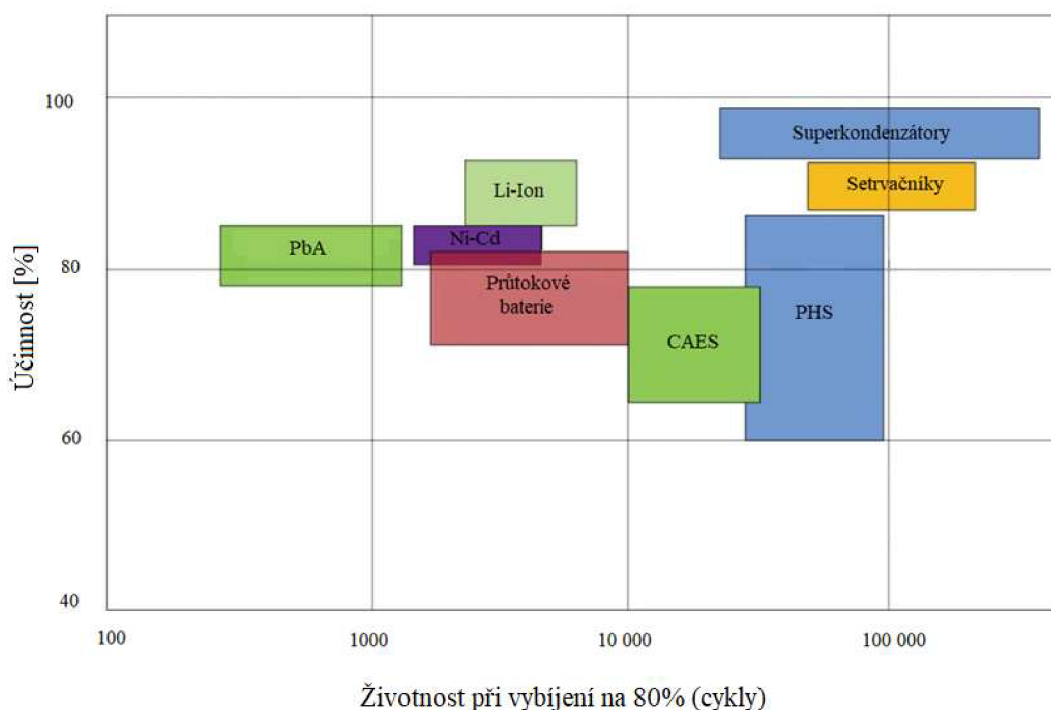
### **1.3.4 Stlačený vzduch**

Tento způsob ukládání energie nazývaný CAES (Compressed Air Energy Storage) funguje na podobném principu jako přečerpávací vodní elektrárny. V době nadbytku

elektriny a nízké poptávky, se elektrina využije na stlačení vzduchu do podzemních zásobníků. V době vysoké poptávky se vzduch čerpá zpět, aby roztáčil plynové turbíny. [10] Více v kapitole 2.

## 1.4 Srovnání způsobů akumulace energie

Způsoby skladování energie se dají srovnávat mnoha způsoby. Nejběžnějším je porovnání dle účinnosti systému. Na Obrázku 1.2 [2] je znázorněna závislost účinnosti na životnosti technologií akumulace energie.



Obrázek 1.2 Závislost účinnosti na životnosti pro různé druhy akumulace energie

Kde:

- PbA ..... Olověné akumulátory
- Ni-Cd ..... Ni-Cd akumulátory
- Li-Ion ..... Li-Ion akumulátory
- CAES ..... Skladování stlačeného vzduchu (Compressed Air Energy Storage)
- PHS ..... Přečerpávací vodní elektrárny (Pumped Hydro Storage)

Nevýhodou však je, že popisované systémy energii pouze akumulují ale nevyrábějí. Jejich cena tak musí být pokryta rozdílem ceny ze sítě odebírané a do sítě dodávané. Neboli rozdílem ceny investované do uskladnění energie a ceny investované do výroby. [11]

Proto Charles Barnhart a Sally Bensonová ze Stanfordovy univerzity vytvořily srovnání jednotlivých technologií na základě tzv. ESOI, což je zkratka pro Energy Stored on Invested, tedy poměr skladované energie a energie investované do výroby. Hodnota ESOI se vypočítá z poměru počtu cyklů dané technologie, její účinnosti a hloubky vybití vůči tzv. šedé energii, což je energie potřebná pro výrobu viz rovnice (1.1). Porovnání je znázorněné na Obrázku 1.3. [12] Čím vyšší hodnota ESOI tím lepší, protože to znamená, že uskladněná energie značně převyšuje energii potřebnou pro výrobu.

$$ESOI = \frac{\text{Uložená energie}}{\text{Šedá energie}} = \frac{\lambda \eta D}{\varepsilon_g} \quad (1.1)$$

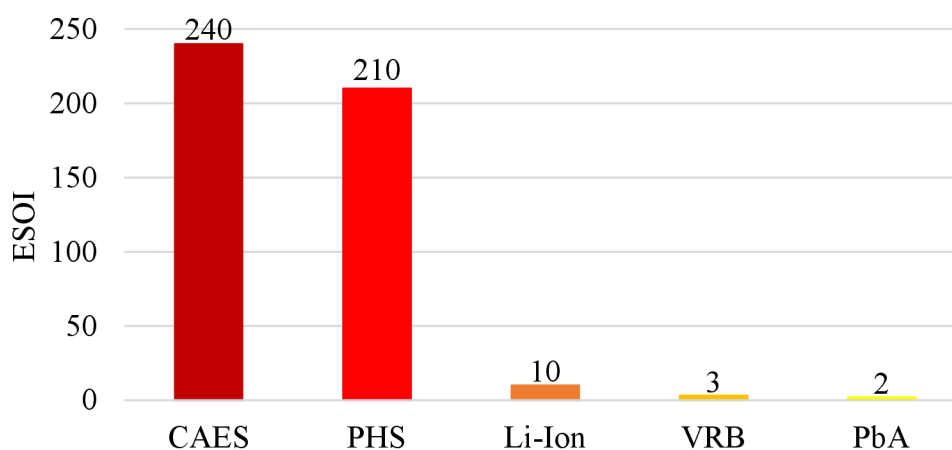
Kde:

$\lambda$  ..... počet cyklů

$\eta$  ..... účinnost

$D$  ..... hloubka vybití (vybití na 80 %)

$\varepsilon_g$  ..... energie investovaná do výroby (šedá energie)



Obrázek 1.3 ESOI – poměr skladované energie a energie investované do výroby

Kde:

VRB ..... Vanadové redoxní průtokové baterie

## 2. SKLADOVÁNÍ ENERGIE VE STLAČENÉM VZDUCHU (CAES)

Ukládání energie ve stlačeném vzduchu není příliš rozšířeným způsobem akumulace energie, přestože první prototyp CAES vznikl již v 70. letech 20. století v Německu.

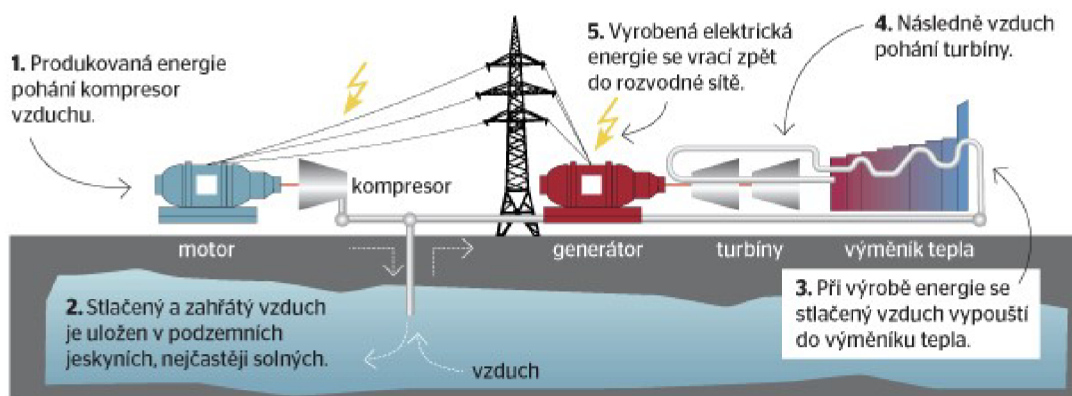
Jedná se o elektrárnu Huntorf Kraftwerke postavenou v roce 1978. Je to jedna ze dvou elektráren na světě, které jsou v provozu a využívají princip CAES. Druhá je elektrárna společnosti AEC (Alabama Electric Corporation) v McIntoshi, Alabama, USA. Elektrárna byla uvedena do provozu v roce 1991.

Příčinou malého využití tohoto principu ukládání energie je nízká účinnost elektráren, která je zhruba kolem 50 %, z důvodu ztrát tepelné energie během komprese vzduchu. Velkou výhodou ovšem je, že spolu s přečerpávací vodní elektrárnou, systém CAES zvládne uložit tak velké množství energie, aby dokázal dodávat elektrický výkon v řádech stovek megawatt po dobu až desítek hodin. [13]

### 2.1 Princip

Jak již bylo zmíněno, tato technologie spočívá v tom, že v době nízké poptávky po elektřině se přebytečná energie využije k pohonu kompresoru, který vzduch načerpá do podzemních zásobníků. Tyto zásobníky jsou většinou geologického původu, jako jsou jeskyně a solné doly. V době vysoké poptávky po elektřině je vzduch z úložiště opět odebírán a ohříván spalováním zemního plynu ve spalovací komoře. Energie z tohoto vysokotlakého vzduchu spolu s určitým tepelným příkonem pohání turbíny. Tato energie je pak přeměněna elektrickým generátorem a znovu dodána do sítě. [10; 14]

Tento způsob skladování stlačeného vzduchu se nazývá diabatický a jeho princip je na Obrázku 2.1. [15]

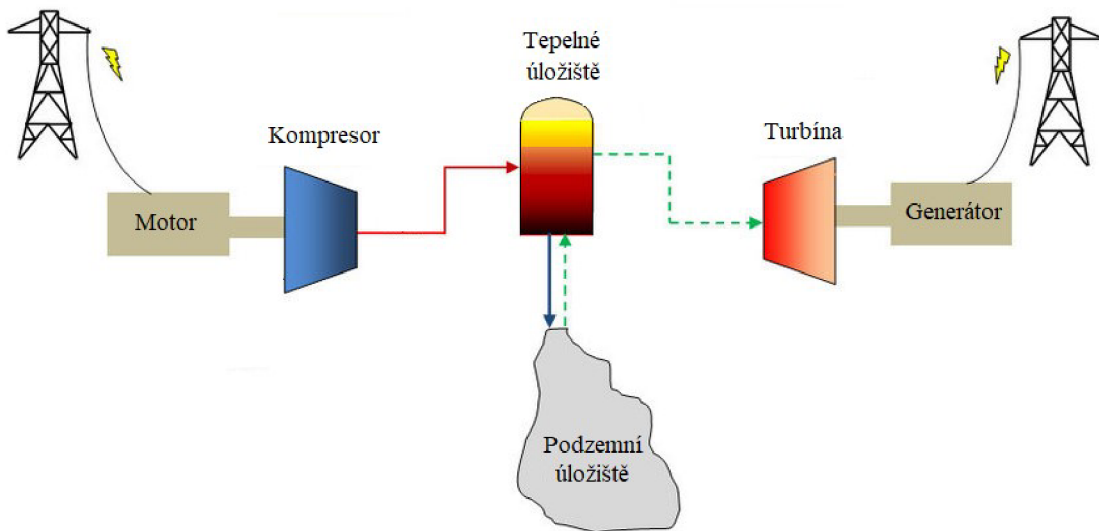


Obrázek 2.1 Schéma principu skladování energie CAES

### 2.1.1 Advanced Adiabatic-CAES

Pro zvýšení účinnosti CAES existuje možnost zachycovat teplo vznikající při chodu kompresorů, ukládat je a následně recyklovat v momentě, kdy je třeba chladný vzduch znovu ohřát.

V pokročilém adiabatickém skladování energie ve stlačeném vzduchu (AA-CAES) se teplo vznikající při kompresi ukládá do tepelného úložiště energie (TES) pomocí materiálu s fázovou změnou a uvolňuje se pro opětovné ohřátí vzduchu, čímž se proces stává adiabatickým. [16]



Obrázek 2.2 Schéma principu skladování energie AA-CAES [17]

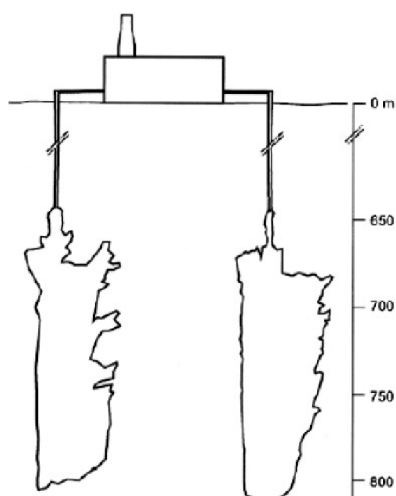
## 2.2 Elektrárny a projekty využívající CAES

### 2.2.1 CAES elektrárny Huntorf a McIntosh

Obě tyto elektrárny využívají diabatické procesy.

Ke skladování stlačeného vzduchu jsou potřeba velmi objemná úložiště, využívá se velkých podzemních solných jeskyních. Kromě objemu jsou podstatnými faktory také těsnost zásobníku, jeho pevnost a stabilita. Mezi největší výhody solných jeskyní patří vysoká flexibilita, absence tlakových ztrát a to, že nedochází k žádné reakci mezi kyslíkem a solnou horninou. Jeskyně jsou přirozeně vzduchotěsné a nepotřebují mnoho dodatečných úprav. Zásobník pro stlačený vzduch v jeskyni (kaverna) se vytvoří tak, že se do solného dómu napustí voda, která rozpustí sůl a směs se následně odčerpá. [18]

Elektrárna v Huntorfu využívá kavernu o objemu 310 000 m<sup>3</sup> v hloubce 600 m, která byla upravena z roztokového solného dómu viz Obrázek 2.3 [19]. Pracuje v denním nabíjecím cyklu 8 hodin a poskytuje špičkový výkon 290 MW po dobu 2 hodin a na výrobu 1 kWh spotřebuje 0,8 kWh elektrické energie a 1,6 kWh tepelné energie [20].



Obrázek 2.3 Ukázka tvaru a velikosti jeskyní využitých v elektrárně Huntorf

Elektrárna McIntosh má solnou jeskyni o objemu 538 000 m<sup>3</sup> v hloubce 450 m. Původně poskytovala výkon 110 MW po dobu 26 hodin, ale v roce 1998 byly přidány další dva generátory a její celkový výkon nyní činí 226 MW. Elektrárna obsahuje rekuperátor pro využití části zbytkového tepla a k výrobě 1 kWh spotřebuje 0,69 kWh elektrické energie a 1,17 kWh tepelné energie. [20]

V Tabulce 2.1 je srovnání různých parametrů elektráren Huntorf a McIntosh. [21]

Tabulka 2.1 Srovnání elektráren Huntorf a McIntosh

	<b>Huntorf</b>	<b>McIntosh</b>
<b>Výkonová kapacita turbíny [MW]</b>	321	110
<b>Výkonová kapacita kompresoru [MW]</b>	62	53
<b>Objem jeskyně [m<sup>3</sup>]</b>	310 000	560 000
<b>Hmotnostní průtok turbíny [kg/s]</b>	455	157
<b>Hmotnostní průtok kompresoru [kg/s]</b>	108	94
<b>Účinnost [%]</b>	42	54

### 2.2.2 Projekt ADELE

Projekt ADELE, který probíhá v Německu od roku 2012, je založen na principu AA-CAES. Při stlačování vzduchu se teplo neuvolňuje do okolí, ale většina z něj se zachytí v zásobníku tepla. Stlačený vzduch je skladován ve dvou solných jeskyních. Při zpětném procesu, kdy dochází k vypouštění vzduchu, uložené teplo uvolňuje svou energii do stlačeného vzduchu, takže k ohřevu není nutné spalování plynu. Jejich cílem je dosáhnout účinnosti kolem 70 %.

### 2.2.3 Ukládání stlačeného vzduchu pod mořem

Profesor z univerzity v Nottinghamu Seamus Garvey pracuje na technologii, která umožňuje skladovat stlačený vzduch v pružných textilních vacích ukotvených na mořském dně v hloubkách kolem 500 m. Vzhledem k výšce vodního sloupce je v těchto hloubkách možné dosáhnout vysokých hustot energie, protože voda funguje jako tlaková nádoba. Nezáleží tedy na tom, zda je zásobník plný nebo prázdný, protože tlak působící na zásobník zůstává stejný. [22; 14]

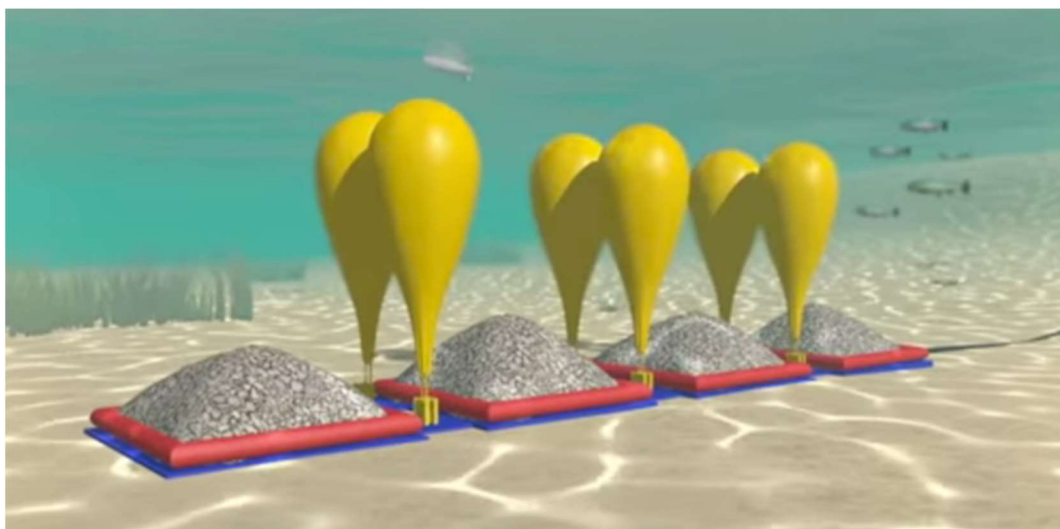


Obrázek 2.4 Vaky pro skladování stlačeného vzduchu pod vodou

### 2.2.4 Projekt Hydrostor

V Kanadě se společnost Hydrostor snaží využít flexibilní vzduchové kontejnery hluboko pod vodou, v rámci výzkumu pod hladinou jezera Ontario. Hydrostor plánuje přečerpávat energii vyrobenou z větrných turbín do vaků ukotvených na dně oceánu. [14]

Stlačený vzduch je natlakován tak, aby odpovídal tlaku na dně oceánu, kde jsou balóny umístěny a následně se do nich natlakovaný vzduch načerpá. Když je potřeba elektřina, systém přejde do opačného režimu a váha vody vytlačí vzduch zpět na pevninu, kde se přemění zpět na energii. [23]



Obrázek 2.5 Skladovací podvodní vaky společnosti Hydrostor

### 2.2.5 Úložiště pod pískem

Dr. Ole Hededal z Dánské technické univerzity zkoumá používání vaků, které by bylo možné nafouknout hluboko pod pískem. Pokud by se písek choval podobně jako kapalina, byl by tlak v těchto úložištích také poměrně konstantní. [14]

## 2.3 Ztráta tepla

Ve fázi komprese vzduchu v zásobníku se část energie ztrácí jako teplo. Toto teplo musí být obnoveno předtím, než je stlačený vzduch expandován v upravené plynové turbíně. To znamená, že oba děje (stlačení a expanze) jsou ztrátové a zařízení pracují s nižší účinností. [14]



### 3. KOMPRESSE IDEÁLNÍHO PLYNU

Ideální plyn je dokonale stlačitelný, což znamená, že se dá stlačit až na nulový objem, je bez vnitřního tření a je dokonale tekutý.

Děje probíhající v ideálním plynu se rozlišují na izobarický, izotermický a izochorický. U těchto dějů je vždy jedna veličina (tlak, teplota, objem) konstantní a zbylé se mění. Dále v plynu může probíhat adiabatický děj, u kterého nedochází k výměně tepla s okolím.

V případě stlačování plynu se jedná právě o adiabatický děj, během kterého se při kompresi plynu do zásobníku teplota plynu spolu s jeho vnitřní energií zvětšuje.

Plyn, který je v rovnovážném stavu se dá charakterizovat stavovými veličinami, což jsou: termodynamická teplota, objem, tlak a hmotnost plynu. Rovnice popisující vztah mezi těmito veličinami se nazývá stavová viz rovnice (3.1).

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (3.1)$$

Kde:

V ..... objem plynu [m<sup>3</sup>]

m ..... hmotnost plynu [g]

M ..... molární hmotnost plynu [g/mol]

R ..... molární plynová konstanta [J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>]

T ..... Teplota [K]

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3 během komprese dochází k velké ztrátě energie ve formě tepla. Vzduch se během stlačování zahřívá a po plném načerpání zásobníku opět chladne. Množství nevyužitě energie viz rovnice (3.2) se dá určit pomocí hmotnosti plynu, jejíž hodnota se získá z rovnice (3.1), změny teploty a měrné tepelné kapacity.

$$Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

Kde:

Q ..... teplo (změna vnitřní energie) [J]

c<sub>v</sub> ..... měrná tepelná kapacita [J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]

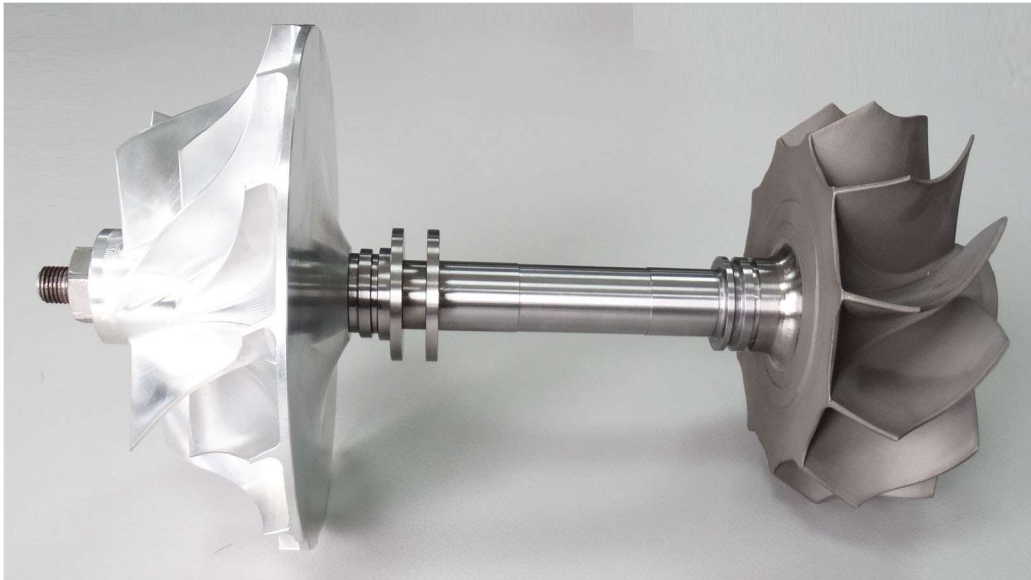
ΔT ..... změna teploty [K]

#### 3.1 Kompresor

Kompresory jsou tepelné stroje pro stlačování plynů a par, dělí se podle principu činnosti na objemové a rychlostní. Objemové nasávaný vzduch uzavřou do prostoru a ten následně zmenšují, kdežto rychlostní vzduch urychlují a transformují jeho kinetickou energii na tlakovou. Objemové kompresory se dále dělí na kompresory pístové (přímočaré nebo rotační) a membránové. Rotační kompresory se konstruují jako šroubové, lamelové,

zubové, s valivým pístem anebo spirálové. Kompresory rychlostní neboli dynamické se rozdělují na lopátkové (tzv. turbokompresory a to buď radiální nebo axiální) a proudové. Podle hodnoty konečného tlaku se kompresory dělí na nízkotlaké (do tlaku 2,5 MPa), středotlaké (do 10 MPa) a vysokotlaké (nad 10 MPa). Pokud kompresor stlačuje jiný plyn než vzduch, zvláště pokud se jedná o plyn jedovatý nebo výbušný, vznikají zde vyšší požadavky na těsnost zařízení. Kompresory lze chladit vodou nebo vzduchem, případně pracovním plynem. Další dělení může být podle počtu stupňů na jednostupňové a vícestupňové. Pohon může být přímý anebo nepřímý pomocí řemenového, ozubeného anebo hydraulického převodu. [24]

Pro stlačování vzduchu během metody CAES se běžně využívá axiální turbokompresor, který může být spojený pomocí hřídele s turbínou, která ho zároveň pohání. Této konfigurace se také využívá v proudových motorech nebo spalovacích turbínách. Axiální turbokompresor je znázorněn na Obrázku 3.1. [25]



Obrázek 3.1 Axiální turbokompresor

Jelikož již v kompresoru dochází ke stlačení vzduchu, teplota plynu se zvyšuje ještě před samotným čerpáním. Do zásobníku tedy není vháněn vzduch o teplotě okolí, ale o zvýšené teplotě, kterou popisují rovnice (3.3) a (3.4).

$$T_2 \approx T_1 \left[ 1 + \frac{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right)} - 1}{\eta} \right] \quad (3.3)$$

Kde:

- $\eta$  ..... účinnost [%]
- $p_1$ ..... tlak na sání [Pa]
- $p_2$ ..... výstupní tlak [Pa]
- $T_1$ ..... teplota na sání [K]
- $T_2$ ..... výstupní teplota [K]
- $\kappa$  ..... Poissonova konstanta [-]

$$T_2 \approx T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\left(\frac{n-1}{n}\right)} \quad (3.4)$$

Kde:

- $n$ ..... adiabatický exponent [-]

## 4. PRINCIPY VYUŽITÉ K ŘEŠENÍ (MĚŘENÍ) ZTRÁTY TEPLA BĚHEM ČERPÁNÍ

V kapitolách 5 a 6 je popsán experiment zahrnující simulaci tlakování vzduchu do modelového zásobníku. Hlavní částí budou následné modifikace procesu za účelem dosažení lepší účinnosti a snížení nevyužité energie ve formě tepla. K realizaci experimentu byly využity technologie termočlánků a chladícího okruhu.

### 4.1 Termočlánky

Termočlánek (termoelektrický generátor – TEG) je zařízení pro měření teploty. Při spojení dvou kovových vodičů z různých materiálů, dojde ohřátím jednoho konce k vzniku termoelektrického napětí.

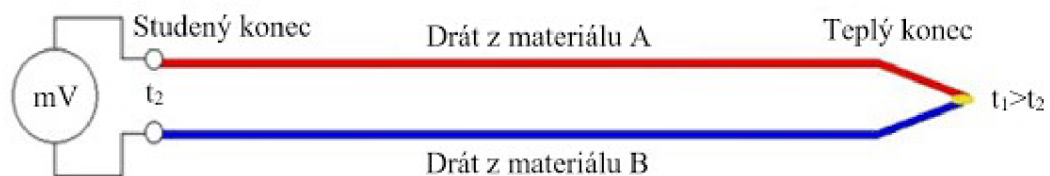
Skládají se z mnoha prvků typu N a P, které jsou zapojeny elektricky sériově, ale tepelně paralelně. Termočlánky fungují na principu Seebeckova jevu a k němu opačnému termoelektrickému jevu. [26]

#### 4.1.1 Seebeckův jev

Když se na jeden ze dvou vodičů nebo polovodičů přivede teplo, kov se zahřeje. V důsledku toho proudí valenční elektrony přítomné v tomto kovu směrem k chladnějšímu kovu. K tomu dochází proto, že elektrony se přesouvají tam, kde je energie (v tomto případě teplo) nižší. Pokud jsou kovy propojeny elektrickým obvodem, protéká jím stejnosměrný proud.

Toto napětí je však jen několik mikrovoltů na kelvin rozdílu teplot. Tepelná energie se neustále přenáší z teplejšího kovu na chladnější kov, až nakonec dojde k dosažení teplotní rovnováhy.

Seebeckův jev, a z něj vyplývající termoelektrický jev, je vratný proces. Pokud se teplý a studený konec vymění, valenční elektrony budou proudit opačným směrem a změní se také směr stejnosměrného proudu.



Obrázek 4.1 Termočlánek

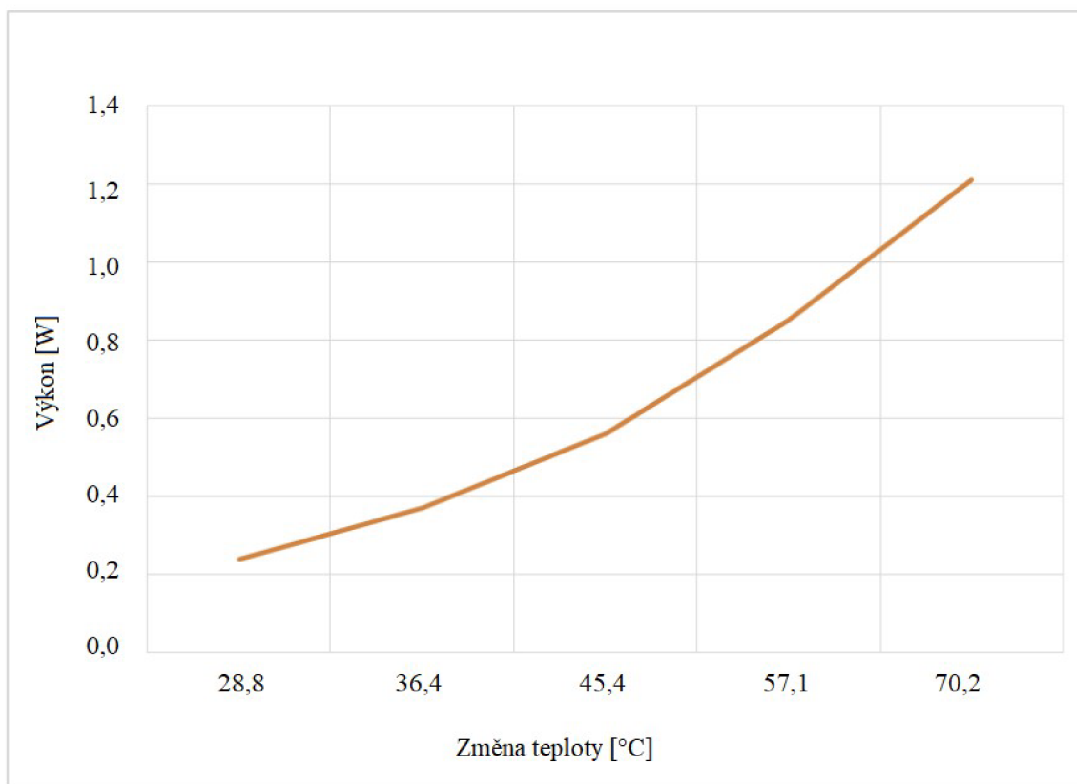
#### 4.1.2 Využití termočlánků

V leteckém průmyslu se využívají senzory a sítě senzorů napájené termoelektrickými generátory. Ty monitorují plášť letadla, zda nedošlo k poškození, které může způsobit prnutí a oslabení konstrukce.

Termoelektrické generátory by mohly být potenciálně použity pro účely rekuperace tepla z výfukových plynů automobilů.

#### 4.1.3 Použití v simulaci

V kapitole 6.1 zabývající se simulací experimentu byl využit následující graf [26] pro stanovení výkonu dle rozdílu teploty (teplého a studeného konce).



Obrázek 4.2 Hodnota výkonu termočlánku v závislosti na rozdílu teplot

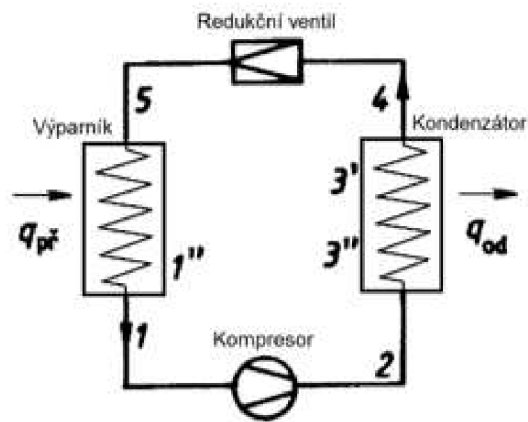
## 4.2 Chladicí okruh

Chladicí okruh slouží k odnímání tepla pracovnímu mediu tak aby byla teplota media snížena a udržena v požadovaných teplotních limitech. Typicky jsou chladicí okruhy používány v chladničkách nebo automobilech.

Chladivo je v oběhu podrobena celé řadě termodynamických dějů, po kterých se opět vrací do výchozího stavu. Jedná se zejména o kompresi, sdílení tepla, expanzi a škrčení. Chladicí účinek dosažený vypařováním chladiva a potřebný tlak pro vypařování se

dosahuje pomocí mechanicky poháněného kompresoru. Chladivo musí být stlačené na takový tlak, aby bylo schopné při kondenzaci odvádět teplo mimo okruh. To je důvod proč chladnička zezadu topí, jelikož při kondenzaci paliva se uvolňuje teplo, které se do něj dostalo v předchozí části cyklu v místě, které se má chladit. [27]

Principiální schéma a termodynamické děje idealizovaného chladicího oběhu jsou názorně uvedeny na Obrázku 4.3. Chladivo v plynném skupenství o stavu 1 je v kompresoru adiabaticky stlačováno do stavu 2. Chladivo pak protéká kondenzátorem, kde se nejprve ochlazuje na teplotu varu, pak postupně kondenzuje mezi stavy 3' a 3'', až se nakonec dostává do kapalného stavu 4.



Obrázek 4.3 Principiální schéma chladicího obvodu

Odváděné teplo v kondenzátoru lze určit z rozdílu entalpií jako:

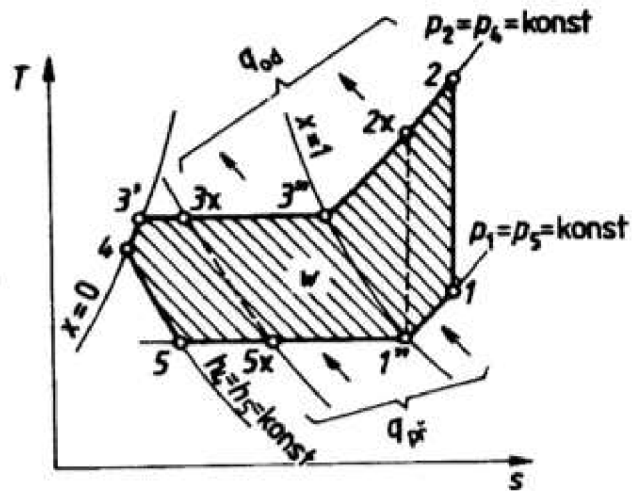
$$|q_{od}| = h_2 - h_4 \quad (4.1)$$

Následně se v redukčním ventilu chladivo škrtí do stavu 5 mokré páry při konstantní entalpii  $h_4 = h_5$ . Chladivo se pak odpařuje ve výparníku.

Přiváděné teplo do oběhu ve výparníku lze podobně určit z rozdílu entalpií:

$$q_{př} = h_1 - h_5 \quad (4.2)$$

Pomocí Mollierova diagramu (schematicky znázorněno na Obrázku 4.4) lze určit hodnoty měrných entalpií  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_4 = h_5$  v uvedených stavech oběhu.



Obrázek 4.4 Mollierův diagram

Měrná práce potřebná pro realizaci tepelného oběhu je:

$$w = q_{př} - |q_{od}| = h_1 - h_5 - (h_2 - h_4) = h_1 - h_2 \quad (4.3)$$

Chladicí výkon je tepelný tok přiváděný do oběhu, tj. tepelný tok odváděný při nízké teplotě z prostoru výparníku:

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{ch} q_{př} \quad (4.4)$$

Kde:  $\dot{m}_{ch}$  je hmotnostní tok chladiva.

Topný výkon je tepelný tok odváděný z oběhu v kondenzátoru při vysoké teplotě:

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_{ch} |q_{od}| \quad (4.5)$$

Mechanický výkon předávaný v kompresoru je:

$$\dot{W} = \dot{m}_{ch} |w| \quad (4.6)$$

Účinnost chlazení kvantifikuje chladicí faktor:

$$\varepsilon_{ch} = \frac{\dot{Q}_{ch}}{P} = \frac{q_{př}}{|w|} = \frac{h_1 - h_5}{h_2 - h_1} \quad (4.7)$$

## 5. MODELOVÝ VÝPOČET

Akumulace stlačeného vzduchu metodou CAES byla v této práci simulována pomocí modelového výpočtu v programu ANSYS Fluent.

### 5.1 Použitý software – ANSYS Fluent

Základem početního systému programu ANSYS je metoda konečných objemů, která spočívá v rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí. Tento konečný počet objemů je následně možno popsat pomocí matematických rovnic. V simulačním programu je tedy třeba zadat okrajové podmínky, z kterých program automaticky sestaví rovnice a vyřeší je. Čas potřebný pro výpočet dané simulace záleží na podstatě úlohy, která může být lineární či nelineární a dále také na počtu vytvořených uzlů. Uzly jsou body, v nichž jsou neznámé parametry hledány a řešeny. Čím vyšší počet uzlů, tím větší je přesnost řešení, ale také je třeba delší čas potřebný pro výpočet.

Obecný postup pro vytvoření simulace je vytvoření geometrie modelu, následné přiřazení materiálových vlastností, definice okrajových podmínek, vytvoření sítě konečných objemů, výpočet hledaných neznámých parametrů a zpracování s následným vyhodnocením výsledků. [28; 29]

Software ANSYS nabízí spoustu typů analýz, které tvoří ucelený celek, lze je využívat zvlášť nebo jednotlivé analýzy propojit. V této práci byla využita analýza ANSYS Fluent. [30]

Program ANSYS Fluent je nástroj pro provádění 2D nebo 3D počítačových simulací proudění. Jeho charakteristickým rysem je všestranné použití od základních po fyzikálně komplikované aplikace. Tento software nabízí fyzikální modely zaměřené na modelování proudění, turbulence, přenosu tepla a chemických reakcí pro průmyslové aplikace. ANSYS Fluent umožňuje využití v širokém rozsahu zaměření jako je simulace proudění vzduchu přes křídla letadla nebo simulace krevního řečiště. Nabízí také specializované modely s možnostmi modelování aero-akustiky, spalování v motorových komorách, lopatkových strojů a vícefázových systémů. [31]

Příklady použití:

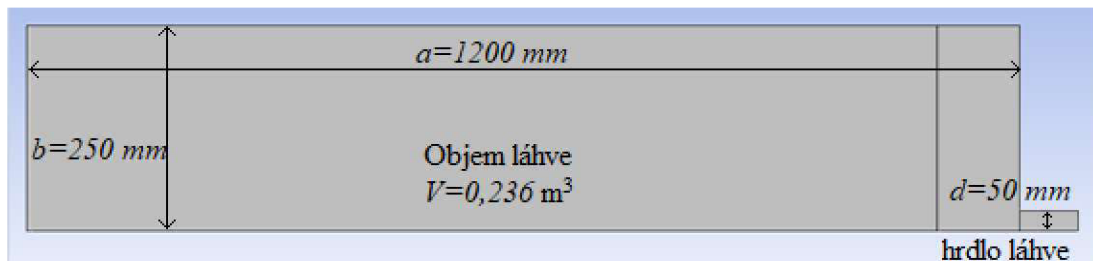
- Analýza proudění v potrubním systému
- Topologická optimalizace zadní části karoserie osobního automobilu
- Výkonové charakteristiky Peltonovy turbíny
- Parametrická optimalizace zpětné klapky
- Simulace spalování v koksárenské věži
- Simulace chlazení elektromotoru
- Analýza proudění ve výrobní hale
- Numerická simulace zamlžování/odmlžování světel osobního automobilu
- Predikce hluku od proudění v kabině automobilu
- Optimalizace lopatek vícestupňové turbíny
- Simulace procesu chlazení vysokoteplotního média v potrubním systému



- Simulace zhášení v koksárenském provozu
- Predikce emisní zátěže vysoko výkonového spalovacího zařízení
- Optimalizace chlazení turbogenerátoru [31]

## 5.2 Modelový příklad

Simulace čerpání vzduchu v programu ANSYS bylo v této části práce provedeno na modelovém příkladu, ve kterém místo podzemního úložiště byla jako zásobník použita láhev o rozměrech viz Obrázek 5.1. Jedná se o 2D model láhve, kde rozměr  $b$  je poloměrem podstavy.



Obrázek 5.1 Rozměry láhve

### 5.2.1 Nastavení okrajových podmínek

Do hrdla láhve o průměru  $d$  byl čerpán vzduch z kompresoru o určitém hmotnostním průtoku (mass flow rate inlet). Dále byl na stěny láhve nastaven součinitel přestupu tepla (heat transfer coefficient). [32] Hodnota součinitele přestupu tepla byla stanovena pro stojící vzduch z tabulky 5.1. a teplota ve volném proudu (free stream temperature) viz Tabulka 5.2.

Tabulka 5.1 Hodnoty součinitele přestupu tepla pro různé typy proudění

Typ proudění	Součinitel přestupu tepla
	$h$ [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ]
Vzduch	2,5 – 25
Vzduch, nucený	10–500
Kapalina, nucená	100 – 15 000
Vařící voda	2 500 – 25 000
Kondenzace vodní páry	5 000 – 100 000

Teplota vzduchu čerpaného do láhve, je výstupní teplotou kompresoru a byla stanovena na 40 °C podle rovnic (3.3) a (3.4). [33]

Tabulka 5.2 Okrajové podmínky

Hmotnostní průtok	$Q_m$ [kg/s]	0,007
Součinitel přestupu tepla	$h$ [W/m <sup>2</sup> ·K]	25
Teplota ve volném proudu	$T$ [°C]	26,85
Vstupní teplota	$T$ [°C]	40

### 5.2.2 Nastavení výpočtu

První fáze výpočtu byla nastavena jako časově proměnná s parametry viz Tabulka 5.3.

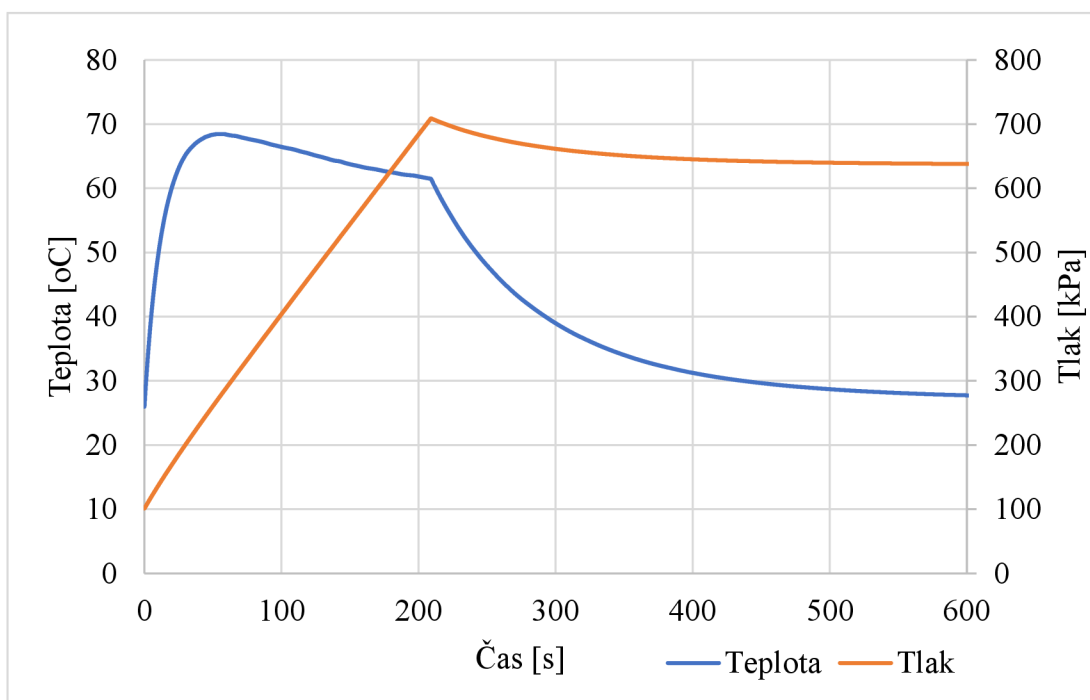
Tabulka 5.3 Nastavení parametrů výpočtu

Metoda řešení	Tlaková korekce rychlosti (Pressure velocity coupling)
Diskretizace	2. řád
Časový krok	0,01 s
Počet kroků	100 000
Max počet iterací	300

### 5.2.3 Výpočet a výsledky

Čerpání probíhalo do času 209 s, do té doby došlo ke zvýšení tlaku na 709 kPa a na teplotu 61,49 °C, poté bylo čerpání zastaveno a láhev volně chladla do času 600 s, za tu dobu vychladla na teplotu 27,75 °C a tlak se snížil na 638 kPa viz Tabulka 5.4.

Časový průběh pro teplotu a tlak během čerpání a chladnutí láhve je v následujícím grafu, kde oranžový průběh je tlak a modrý teplota.



Obrázek 5.2 Průběh teploty a tlaku v čase

V Tabulce 5.4 jsou vypsány hodnoty teplot a tlaků ve vybraných časech pro konkrétní znázornění časového průběhu.

Tabulka 5.4 Hodnoty teploty a tlaku ve vybraných časech

Čas	Teplota	Tlak
t [s]	T [°C]	p [Pa]
<b>50</b>	68,37	261 102,6
<b>75</b>	67,73	333 227,5
<b>100</b>	66,46	404 328,7
<b>209</b>	61,49	709 160,4
<b>300</b>	38,98	661 601,2
<b>400</b>	31,25	645 312,2
<b>500</b>	28,71	640 023,2
<b>600</b>	27,75	638 143,2

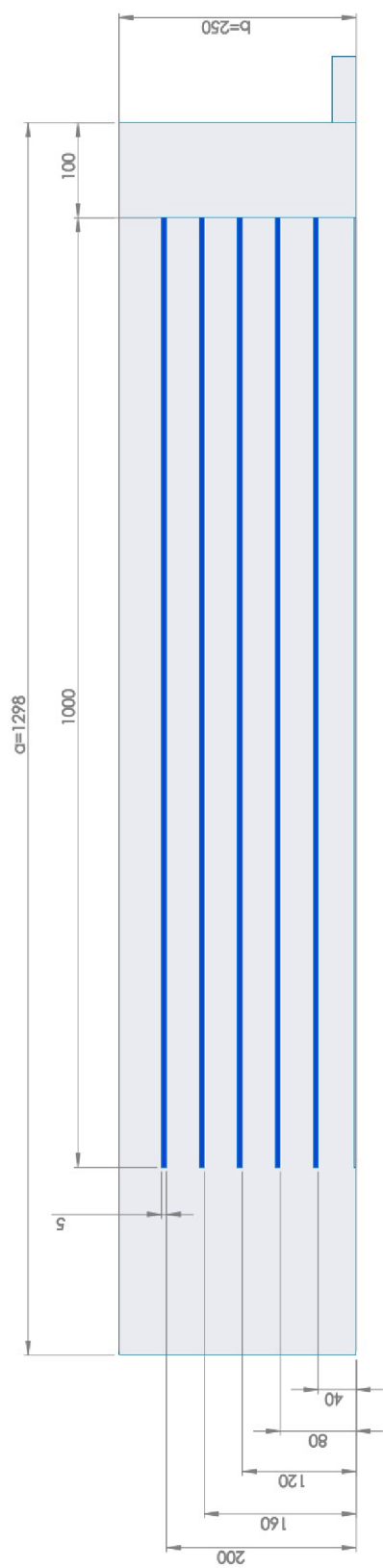
## 6. ŘEŠENÍ

Na modelovém příkladu bylo zjišťováno chování vzduchu při čerpání do úložiště, ohřívání vzduchu v průběhu čerpání a pokles tlaku při následném chladnutí.

Bylo tedy navrženo a simulováno několik případů, ve kterých je různým způsobem redukováno ohřátí vzduchu při čerpání. Využity byly technologie popsány v kapitole 4.

Model láhve byl upraven přidáním prstenců, pět soustředných dutých válců o tloušťce 5 mm s rozestupy 40 mm). Prstence na základě použité technologie plnily různé účely (různými způsoby omezovaly ohřátí vzduchu). Rozměry láhve byly zvětšeny o objem prstenců, tak aby objem vzduchu v láhvi zůstal stejný jako v modelovém příkladu viz Obrázek 6.1.

Nastavení okrajových podmínek pro simulaci zůstalo stejné jako u modelového příkladu viz Tabulka 5.2.

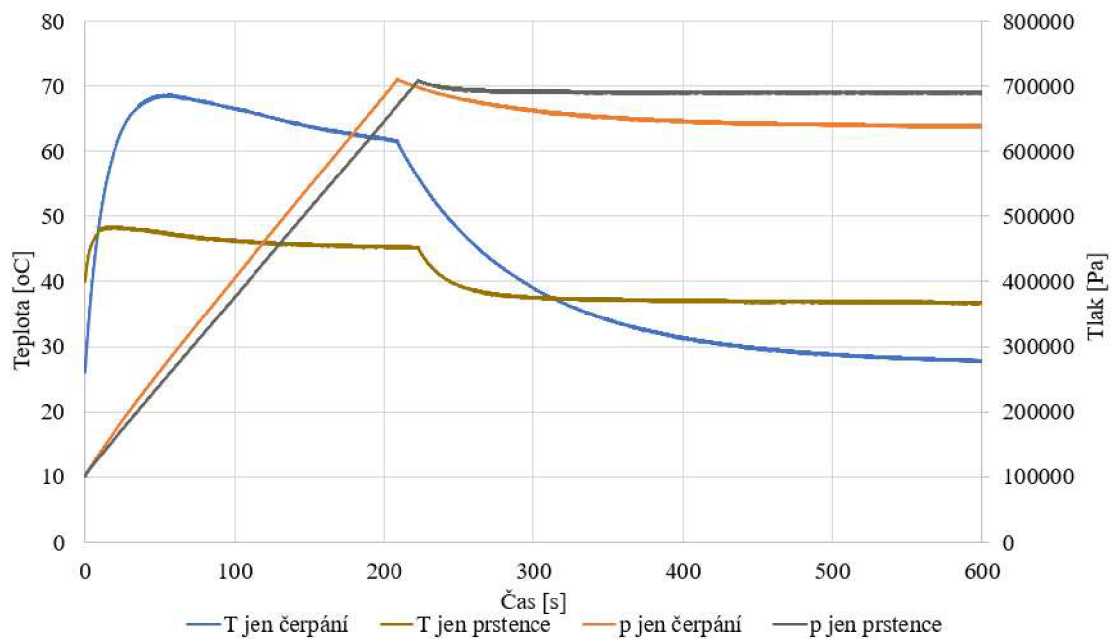


Obrázek 6.1 Upravený model láhve

## 6.1 Jen prstence

V prvním případě sloužily prstence pouze jako vložka bez toho, aby plnily funkci jedné z technologií. Šlo tedy o to zjistit, zda pouze přidání materiálu v objemu může omezit ohřívání vzduchu při stlačování.

Čerpání bylo ukončeno v čase 223 s, po dosažení srovnatelné maximální hodnoty tlaku jako u modelového příkladu a to 707 382 Pa. Srovnání průběhu teploty a tlaku během čerpání vzhledem k modelovému příkladu (jen čerpání) je na Obrázku 6.2 a porovnání hodnot v konkrétních časech v Tabulce 6.1.



Obrázek 6.2 Závislost teploty a tlaku na čase v porovnání s modelovým příkladem

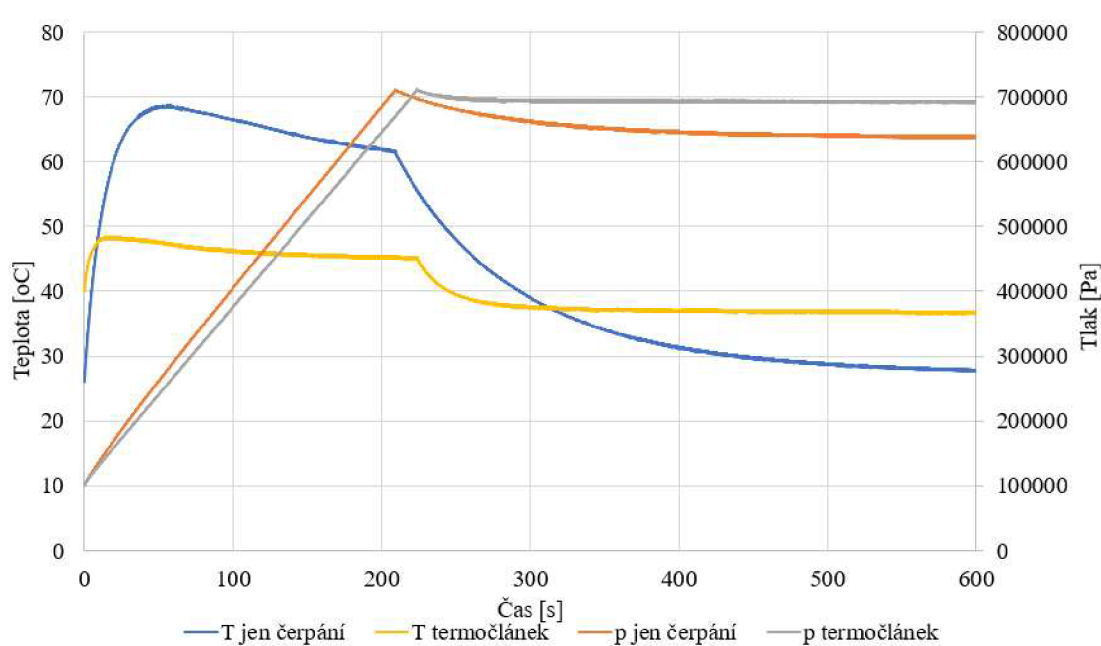
Tabulka 6.1 Srovnání hodnot teploty a tlaku ve vybraných časech

Čas	Teplota model	Teplota prstence	Tlak model	Tlak prstence
t [s]	T [°C]		p [Pa]	
50	68,37	47,47	261 102,6	240 238,4
75	67,73	46,67	333 227,5	307 733,7
100	66,46	46,16	404 328,7	375 218,5
209	61,49	45,14	709 160,4	707 382,6
300	38,98	37,50	661 601,2	690 713,8
400	31,25	36,98	645 312,2	689 750,2
500	28,71	36,84	640 023,2	689 583,0
600	27,75	36,70	638 143,2	689 421,6

## 6.2 Využití termočlánků

V dalším případě byly prstence použity jako teplý konec termočlánku. Chladným koncem byl okolní vzduch mimo láhev. Prstencům byl nastaven záporný výkon na základě rozdílu teploty. Údaj pro výkon byl vzat z grafu viz Obrázek 4.2.

Čerpání bylo ukončeno v čase 224 s, po dosažení srovnatelné maximální hodnoty tlaku jako u modelového příkladu a to 710 041 Pa. Srovnání průběhu teploty a tlaku během čerpání vzhledem k modelovému příkladu je na Obrázku 6.3 a porovnání hodnot v konkrétních časech v Tabulce 6.2.



Obrázek 6.3 Závislost teploty a tlaku na čase v porovnání s modelovým příkladem

Tabulka 6.2 Srovnání hodnot teploty a tlaku ve vybraných časech

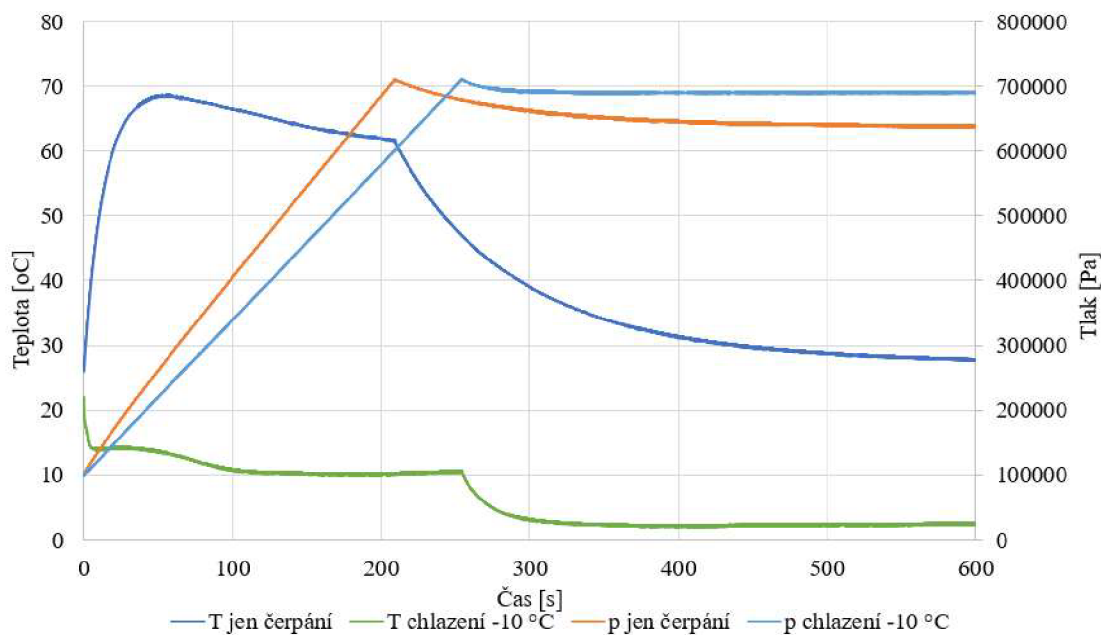
Čas	Teplota model	Teplota termočlánek	Tlak model	Tlak termočlánek
t [s]	T [°C]		p [Pa]	
50	68,37	47,47	261 102,6	240 236
75	67,73	46,68	333 227,5	307 745
100	66,46	46,19	404 328,7	375 255
209	61,49	45,11	709 160,4	710 041
300	38,98	37,5	661 601,2	693 377
400	31,25	36,95	645 312,2	692 351
500	28,71	36,82	640 023,2	692 200
600	27,75	36,69	638 143,2	692 051

### 6.3 Chlazení na $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

V tomto principu byly prstence použity jako chladicí okruh.

Byly chlazeny na  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 72 s. Čerpání bylo ukončeno v čase 254 s, po dosažení srovnatelné maximální hodnoty tlaku jako u modelového příkladu a to 709 540 Pa.

Srovnání průběhu teploty a tlaku během čerpání vzhledem k modelovému příkladu je na Obrázku 6.4 a porovnání hodnot v konkrétních časech v Tabulce 6.3.



Obrázek 6.4 Závislost teploty a tlaku na čase v porovnání s modelovým příkladem

Tabulka 6.3 Srovnání hodnot teploty a tlaku ve vybraných časech

Čas	Teplota model	Teplota chlazení	Tlak model	Tlak chlazení
<b>t [s]</b>	<b>T [°C]</b>		<b>p [Pa]</b>	
<b>50</b>	68,37	13,57	261 102,6	219 973
<b>75</b>	67,73	12,08	333 227,5	279 559
<b>100</b>	66,46	10,74	404 328,7	338 659
<b>209</b>	61,49	10,46	709 160,4	709 540
<b>300</b>	38,98	3,05	661 601,2	691 224
<b>400</b>	31,25	2,11	645 312,2	689 497
<b>500</b>	28,71	2,23	640 023,2	689 596
<b>600</b>	27,75	2,39	638 143,2	689 674

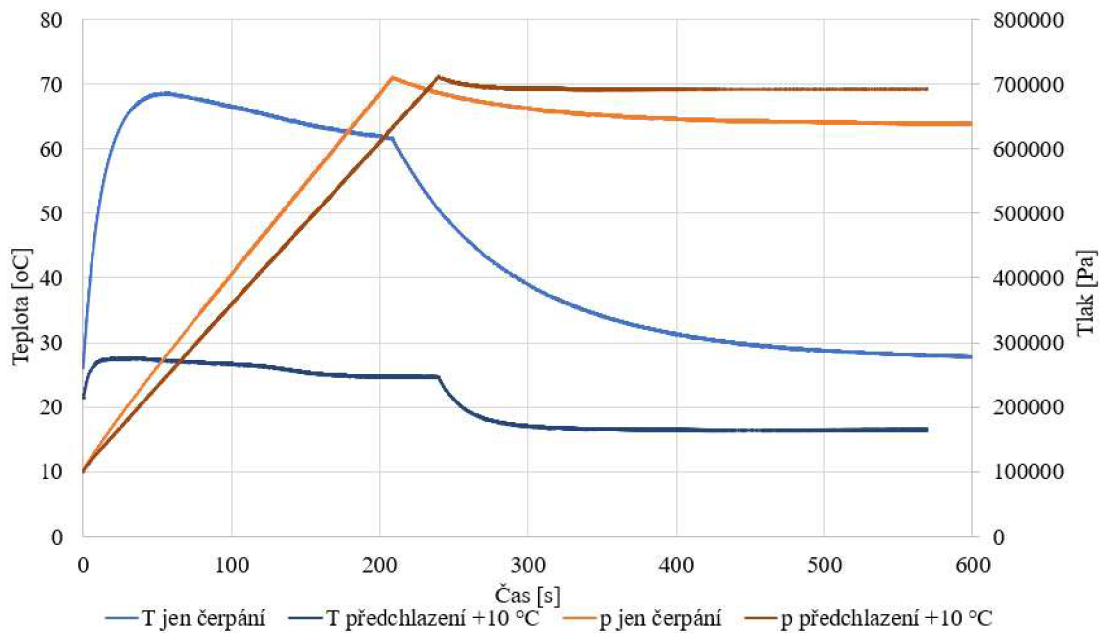


## 6.4 Předchlazení na 10 °C

V posledním řešení byly prstence také použity jako chladicí okruh, ale byly předchlazeny na 10 °C ještě před začátkem čerpání. Během čerpání už chlazeny nebyly.

Čerpání bylo ukončeno v čase 240 s, po dosažení srovnatelné maximální hodnoty tlaku jako u modelového příkladu a to 710 560 Pa.

Srovnání průběhu teploty a tlaku během čerpání vzhledem k modelovému příkladu je na Obrázku 6.5 a porovnání hodnot v konkrétních časech v Tabulce 6.4.



Obrázek 6.5 Závislost teploty a tlaku na čase v porovnání s modelovým příkladem

Tabulka 6.4 Srovnání hodnot teploty a tlaku ve vybraných časech

Čas	Teplota model	Teplota chlazení	Tlak model	Tlak chlazení
t [s]	T [°C]		p [Pa]	
50	68,37	27,24	261 102,6	230 854,3
75	67,73	26,91	333 227,5	294 443,2
100	66,46	26,61	404 328,7	357 943,2
209	61,49	24,63	709 160,4	710 560,0
300	38,98	17,00	661 601,2	692 783,1
400	31,25	16,43	645 312,2	691 963,5
500	28,71	16,41	640 023,2	691 956,6
600	27,75	16,44	638 143,2	691 964,6

## 6.5 Srovnání výsledků

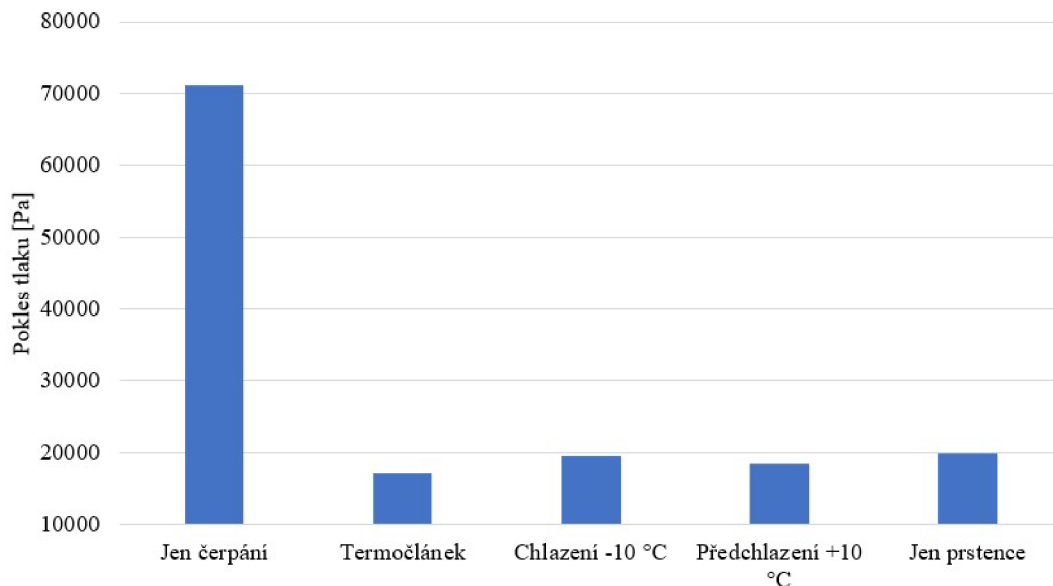
Výsledky z grafů 6.2 - 6.5 a grafu viz Obrázek 6.6, ve kterém je srovnání poklesu tlaku po ukončení čerpání ukazují, že odvedení tepla jakoukoliv zkoušenou variantou má vliv na snížení tlaku v lahvi až o 50 kPa.

Samotné prstence zabrání prudkému ohřevu plynu v lahvi svoji velkou plochou a hmotou, která konvekci odebírá teplo z natlakovaného plynu a nevyžaduje žádný externí výkon například chladícího kompresoru.

Varianta s termočlánkem prokazuje, že dojde ke spojení vlivu prstenců (přidané hmoty), a k odběru energie pomocí termočlánků. Tato varianta má podobný účinek jako následující metoda s chlazenými prstenci na  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ale nepotřebuje další vnější výkon, naopak umožní malý výkon získat.

Varianta s chlazenými prstenci na  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ve které chlazení probíhá i během části čerpání není tolik výhodná. Z důvodů větší vynaložené energie na odvedení tepla a snížení teploty způsobuje také pokles tlaku. Trend výpočtu sice ukazuje pomalé ohřívání od stěn lahve a tím mírný vzrůst tlaku, jedná se však o zbytečně nákladnější variantu.

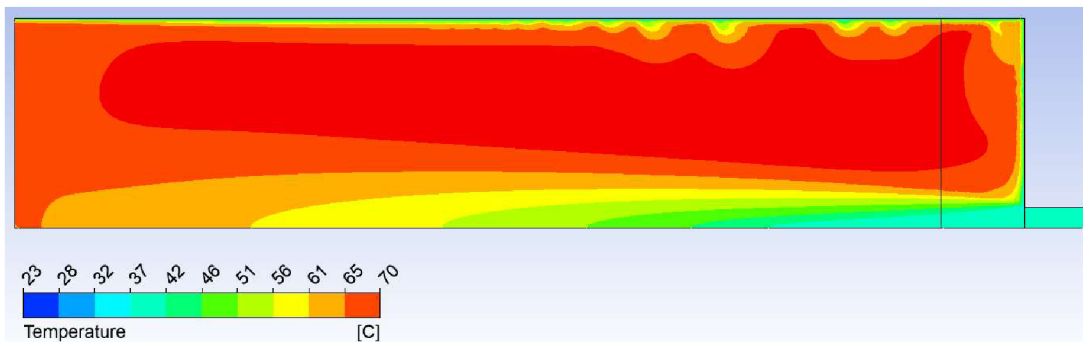
Varianta předchlazení na  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , která již během čerpání nevyžaduje dodání externího výkonu, prokazuje lepší výsledky než předchozí varianty, a to z důvodu, že dokáže udržet stlačovaný plyn na přibližně pokojové teplotě. Stav tlaku u stlačovaného plynu není ovlivňován změnou teploty, která způsobuje jeho další rozepnutí a v konečné fázi jeho smrštění.



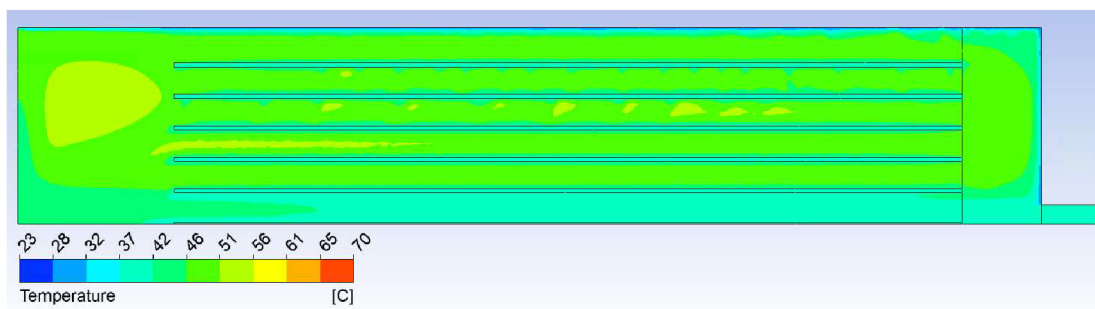
Obrázek 6.6 Pokles tlaku po ukončení čerpání pro jednotlivé řešení

### 6.5.1 Srovnání průběhů teploty ze simulace v nejteplejším okamžiku

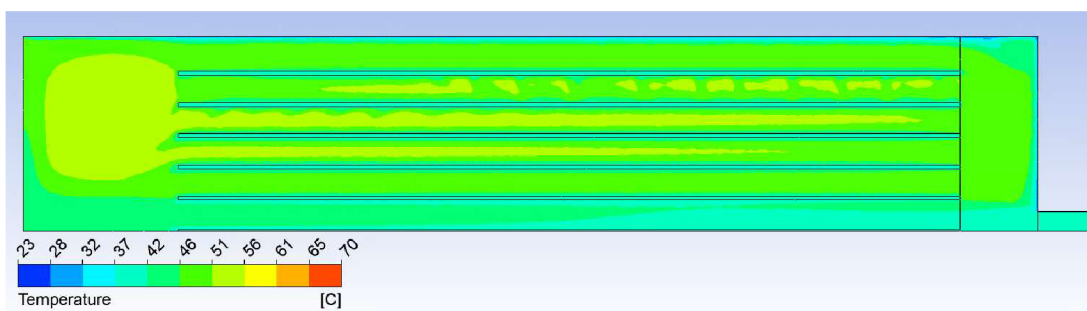
Na následujících obrázcích je průběh teploty v lahvi pro jednotlivé varianty v čase maximální teploty, tedy v čase 50 s. Průběh u modelového příkladu je na první pohled nejteplejší, pohybuje se o desítky stupňů výš než ostatní varianty. Dalším výsledkem, který se liší je varianta chlazení na  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , který je naopak výrazně chladnější než zbylé tři principy, u nichž se průběh již tolik neliší.



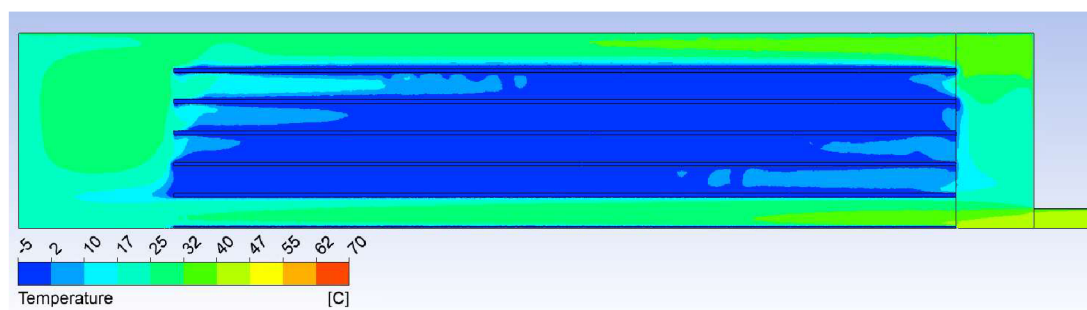
Obrázek 6.7 Modelový příklad



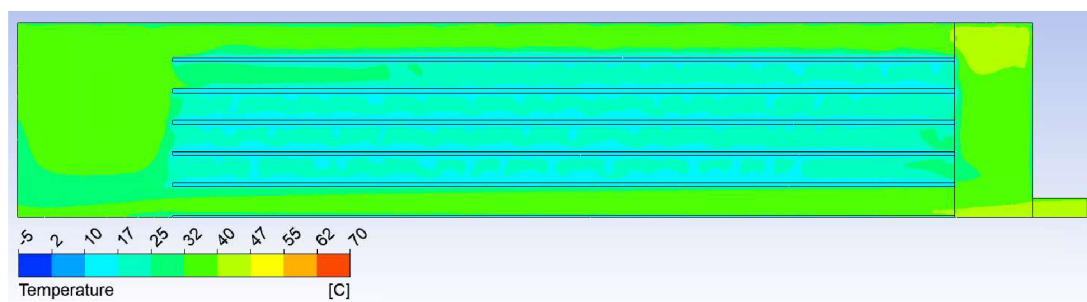
Obrázek 6.8 Pouze prstence



Obrázek 6.9 Termočlánky



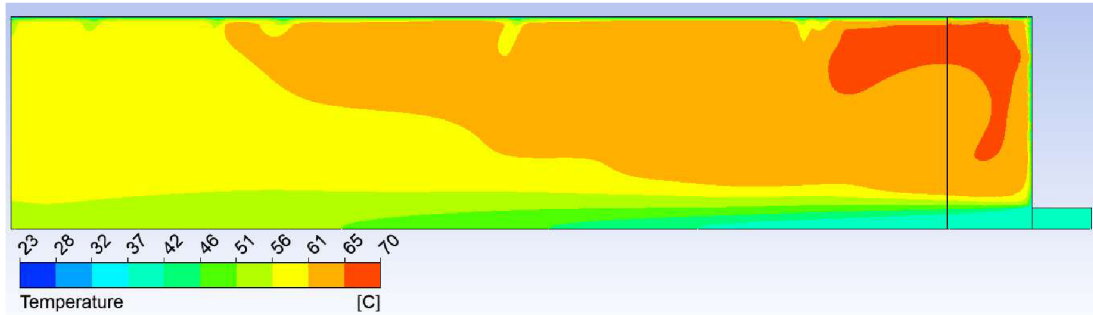
Obrázek 6.10 Chlazení na -10 °C



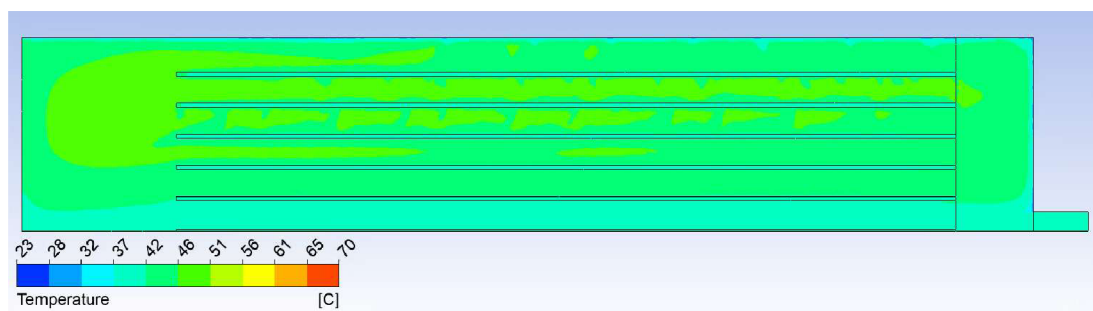
Obrázek 6.11 Předchlazení na 10 °C

### 6.5.2 Srovnání průběhů teploty ze simulace v čase ukončení čerpání

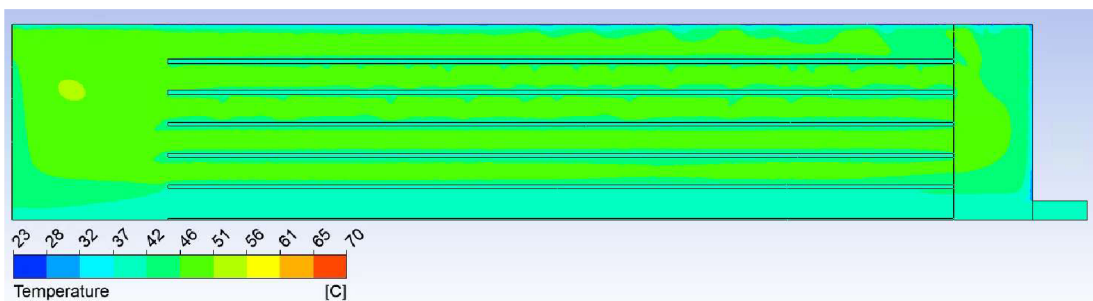
Na následujících obrázcích 6.12 - 6.16 jsou průběhy teploty v láhvi v čase vypnutí čerpání, tedy v čase 209–250 s. Ve všech případech došlo v čase vypnutí čerpání neboli v čase maximálního natlakování, k poklesu teploty oproti počátku čerpání viz předchozí srovnání.



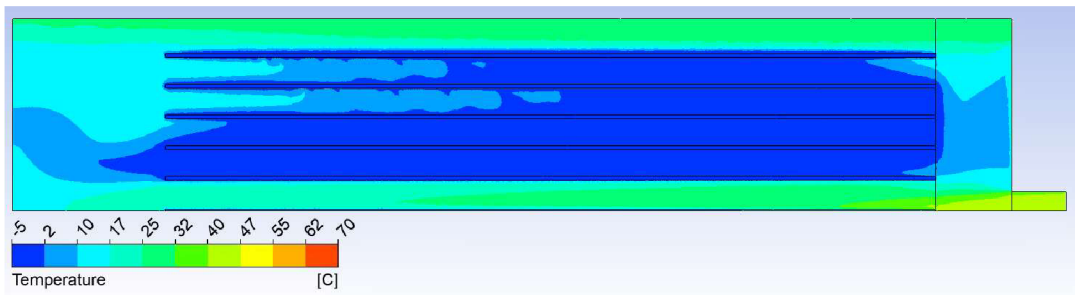
Obrázek 6.12 Modelový příklad



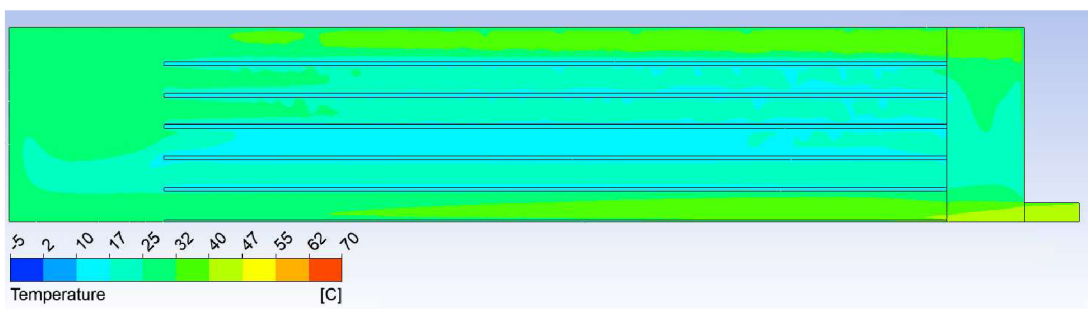
Obrázek 6.13 Termočlánky



Obrázek 6.14 Pouze prstence



Obrázek 6.15 Chlazení na  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 6.16 Předchlazení na  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 7. ZÁVĚR

Na základě rešerše o různých typech akumulace energie je zjevné, že CAES je efektivním způsobem skladování elektrické energie. Výhodou je možnost dlouhodobého uskladnění a to, že během skladování nedochází ke snížení množství uložené energie. Nevýhodou jsou tepelné ztráty, které vznikají při stlačování vzduchu.

Tato práce se tedy zaměřila na způsoby snížení energetické ztráty, ve formě ztrátového tepla a snížení poklesu tlaku způsobenému ochlazením stlačeného vzduchu.

Prvním krokem byla simulace modelového příkladu láhve (zásobníku), pro zjištění chování vzduchu během stlačování, nárůst a pokles teploty, a jak velký vliv to má na pokles tlaku. Poté byly simulovány čtyři řešení, jejichž technologie různými způsoby řeší ohřev vzduchu během stlačování vzduchu.

Všechny čtyři testované metody vedly jak k výraznému snížení ztrátového tepla, a tak i snížení poklesu tlaku, přičemž rozdíly v poklesu tlaku byly u všech testovaných metod srovnatelné.

Dvě z metod používají aktivní chlazení, a tedy vyžadují dodání dodatečné energie na ochlazení, což zhoršuje celkovou energetickou bilanci ukládání energie formou stlačeného vzduchu. Na druhou stranu odváděné teplo by se dalo uchovat například v izolovaném boxu a použít k následnému ohřátí vzduchu během odčerpávání z nádoby. Tím by se energie, která byla potřeba dodat na chlazení využila a odstranila by se nevýhoda nutnosti dodání energie do systému.

Podle výsledků simulačních výpočtů bylo nejvýhodnější metodou použití termočlánků, které přímo přeměňovaly ztrátové teplo v elektrickou energii a snižovaly nárůst teploty vzduchu při stlačování a tím snížily i pokles tlaku po vychladnutí.

## LITERATURA

- [1] *Svět energie* [online]. In: . [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>
- [2] *Tzb info* [online]. 2020 [cit. 2021-10-29]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21462-superkondenzator-vs-baterie-parametry-a-pouziti>
- [3] *O energetice: Akumulace energie* [online]. 2018 [cit. 2021-10-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>
- [4] KAZDA, Tomáš. *Elektrochemické zdroje* [online]. 2019 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: [https://moodle-archiv-2019-2020.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/332804/mod\\_folder/content/0/Elektrochemick%C3%A9%20zdroje%20pro%20RAPS\\_dle%20%C5%A0ablony.pdf?forcedownload=1](https://moodle-archiv-2019-2020.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/332804/mod_folder/content/0/Elektrochemick%C3%A9%20zdroje%20pro%20RAPS_dle%20%C5%A0ablony.pdf?forcedownload=1). VUT.
- [5] *O energetice: Průtokové baterie* [online]. 2015 [cit. 2021-11-6]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/prutokova-baterie>
- [6] *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online]. Praha, 2011 [cit. 2021-11-5]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>. ČVUT.
- [7] *Akademie věd* [online]. 2017 [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <http://upase.it.cas.cz/skladovani-energie-setrvacniky/>
- [8] AMIRYAR, Mustafa a Keith PULLEN. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences* [online]. 2017, 7(3) [cit. 2022-05-30]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7030286
- [9] WAN, LiXin, Wei ZHANG a ZhiPeng XU. Overview of Key Technologies and Applications of Hydrogen Energy Storage in Integrated Energy Systems. In: *2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)* [online]. IEEE, 2020, s. 1-5 [cit. 2022-05-30]. ISBN 978-1-7281-5748-1. Dostupné z: doi:10.1109/APPEEC48164.2020.9220454



- [10] *Man Energy Solutions* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.man-es.com/energy-storage/solutions/energy-storage/compressed-air-energy-storage>
- [11] In: *Idnes: technet* [online]. 2013 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/technet/veda/skladovani-energie-pro-sitove-sluzby.A130822\\_141253\\_veda\\_mla](https://www.idnes.cz/technet/veda/skladovani-energie-pro-sitove-sluzby.A130822_141253_veda_mla)
- [12] BARNHART, Charles a Sally BENSON. *Energy & Environmental Science: On the importance of reducing the energetic and material demands of electrical energy storage* [online]. 10 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/ee/c3ee24040a>
- [13] CROTOGINO, Fritz, Klaus-Uwe MOHMEYER a Dr. SCHARF. *Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation* [online]. USA, Florida, Orlando, 2001 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: [http://www.fze.uni-saarland.de/AKE\\_Archiv/AKE2003H/AKE2003H\\_Vortraege/AKE2003H03c\\_Crotogino\\_ea\\_HuntorfCAES\\_CompressedAirEnergyStorage.pdf](http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03c_Crotogino_ea_HuntorfCAES_CompressedAirEnergyStorage.pdf)
- [14] *TheEngineer: Compressed air energy storage has bags of potential* [online]. 2011 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/compressed-air-energy-storage-has-bags-of-potential/>
- [15] *Ihned* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: [https://img.ihned.cz/attachment.php/690/37774690/iouv4DE7GHJKLMNjPQWcefhqz02ARVmn/EK12\\_52.gif](https://img.ihned.cz/attachment.php/690/37774690/iouv4DE7GHJKLMNjPQWcefhqz02ARVmn/EK12_52.gif)
- [16] CHAARAN, A, R NARENDHAR a D KARTHIKEYAN. Advanced Adiabatic Compressed air Energy Storage Energy in Air. In: *2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)* [online]. IEEE, 2018, s. 737-741 [cit. 2021-12-01]. ISBN 978-1-5386-3695-4. Dostupné z: doi:10.1109/ICEES.2018.8442374
- [17] KERE, A., V. GOETZ, X. PY, R. OLIVES, N SADIKI a E. MERCIER. Dynamic Behavior of a Sensible-heat based Thermal Energy Storage. *Energy Procedia* [online]. 2014, **49**, 830-839 [cit. 2021-12-12]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.03.090
- [18] *Cnbc* [online]. [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://www.cnbc.com/2020/11/01/how-salt-caverns-may-trigger-11-trillion-hydrogen-energy-boom-.html>
- [19] POLAŃSKI, Krzysztof. *Numerical calculations of main stress in the rock massif around salt cavern for compressed air storage* [online]. 2019, 10 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z:

- [https://www.researchgate.net/publication/330570464\\_Numerical\\_calculations\\_of\\_main\\_stress\\_in\\_the\\_rock\\_massif\\_around\\_salt\\_cavern\\_for\\_compressed\\_air\\_storage/download](https://www.researchgate.net/publication/330570464_Numerical_calculations_of_main_stress_in_the_rock_massif_around_salt_cavern_for_compressed_air_storage/download)
- [20] *Eseslab: Compressed Air Energy Storage* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/CAES-page>
- [21] SANIEL DONG LIM. *Ocean Compressed Air Energy Storage (OCAES) Integrated with Offshore Renewable Energy Sources* [online]. North Carolina, 2013 [cit. 2021-12-1]. Dostupné z: <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/8878/etd.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [22] PIMM, A a S GARVEY. Analysis of flexible fabric structures for large-scale subsea compressed air energy storage. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2009, **181** [cit. 2021-11-29]. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/181/1/012049
- [23] *GreenTechMedia* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/toronto-hydro-pilots-worlds-first-offshore-compressed-air-energy-storage>
- [24] *Chladicí oběhy a tepelná čerpadla* [online]. 2020 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: [https://cdn.fbsbx.com/v/t59.2708-21/285122342\\_338660968350831\\_4900170460988280365\\_n.pdf/Chladic%C3%AD-ob%C4%9Bhy-a-tepeln%C3%A1-%C4%8Derpadla\\_skripta.pdf?\\_nc\\_cat=111&ccb=1-7&\\_nc\\_sid=0cab14&\\_nc\\_ohc=hNG\\_IUp67t0AX\\_GqfLY&\\_nc\\_ht=cdn.fbsbx.com&oh=03\\_AVLSXY0xHh4GnKpFpCzfs\\_BOMUIa\\_qrBmbOVN1Hexwb-3A&oe=6296696A&dl=1](https://cdn.fbsbx.com/v/t59.2708-21/285122342_338660968350831_4900170460988280365_n.pdf/Chladic%C3%AD-ob%C4%9Bhy-a-tepeln%C3%A1-%C4%8Derpadla_skripta.pdf?_nc_cat=111&ccb=1-7&_nc_sid=0cab14&_nc_ohc=hNG_IUp67t0AX_GqfLY&_nc_ht=cdn.fbsbx.com&oh=03_AVLSXY0xHh4GnKpFpCzfs_BOMUIa_qrBmbOVN1Hexwb-3A&oe=6296696A&dl=1). VUT.
- [25] *Turbomed* [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <https://turbomed.gr/authorized-service-agent-for-kbb-turbochargers/>
- [26] ORR, Bradley a Aliakbar AKBARZADEH. Prospects of Waste Heat Recovery and Power Generation Using Thermoelectric Generators. *Energy Procedia* [online]. 2017, **110**, 250-255 [cit. 2022-05-29]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.03.135
- [27] *Schiessl* [online]. [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.schiessl.cz/stranka-chladici-okruh-princip-funkce-118>
- [28] SZENDIUCH, Ivan a Edita HEJÁTKOVÁ. *Mikroelektronika a technologie součástek – úvod do elektronického hardware* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/178739/mod\\_resource/content/1/BMT\\_S\\_skripta.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/178739/mod_resource/content/1/BMT_S_skripta.pdf). VUT.

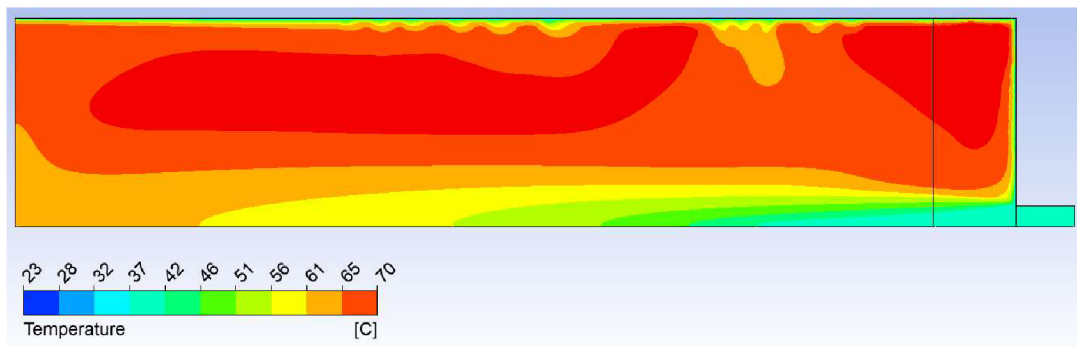
- [29] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. *Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: [http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1\\_mkp.pdf](http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf)
- [30] *TECHSOFT* [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/software/#scroll-down>
- [31] *Svsfem* [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/produkty/proudeni/ansys-fluent>
- [32] *Science direct* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/convection-heat-transfer-coefficient>
- [33] MOSHFEGHIAN, Mahmood. *PetroSkills: Compressor Calculations: Rigorous Using Equation of State vs Shortcut Method* [online]. [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2011/11/compressor-calculations-rigorous-using-equation-of-state-vs-shortcut-method/>

# **SEZNAM PŘÍLOH**

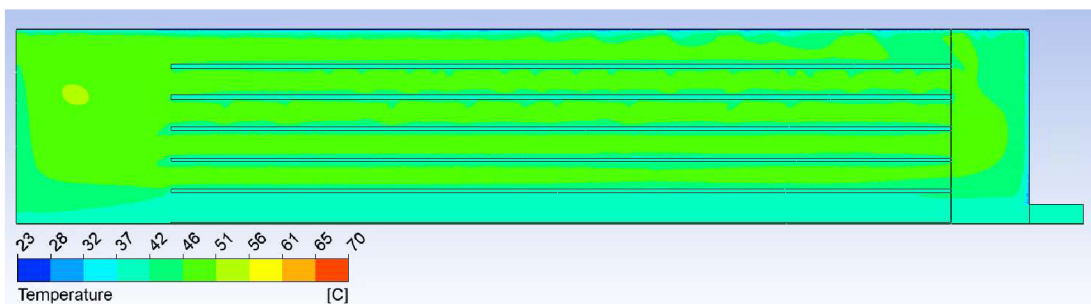
<b>PŘÍLOHA A - TEPLOTA V LÁHVI BĚHEM SIMULACE V RŮZNÝCH ČASECH .....</b>	<b>49</b>
--	-----------

# Příloha A - Teplota v láhvi během simulace v různých časech

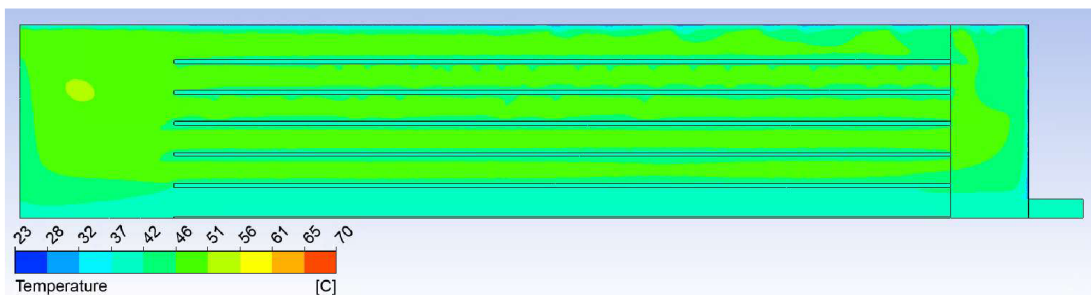
## A.1 V čase 75 s



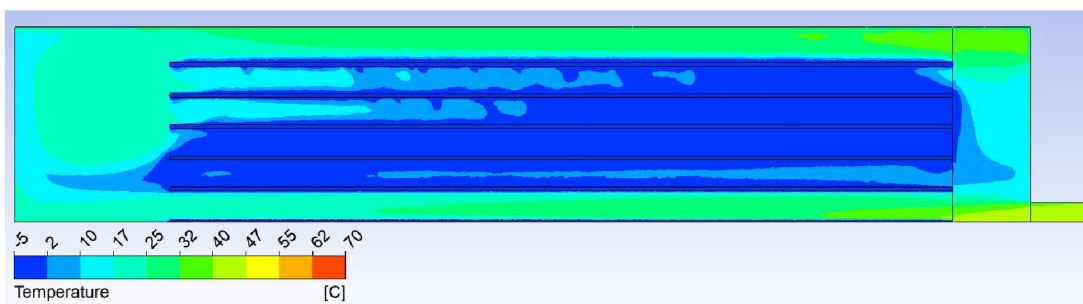
Obrázek 0.1 Modelový příklad



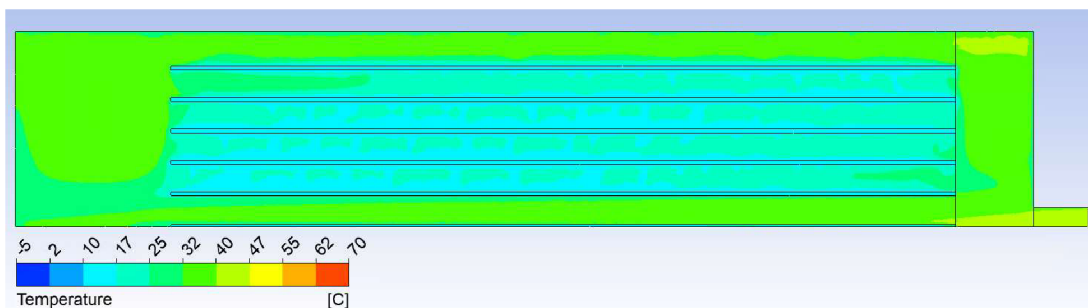
Obrázek 0.2 Pouze prstence



Obrázek 0.3 Termočlánky

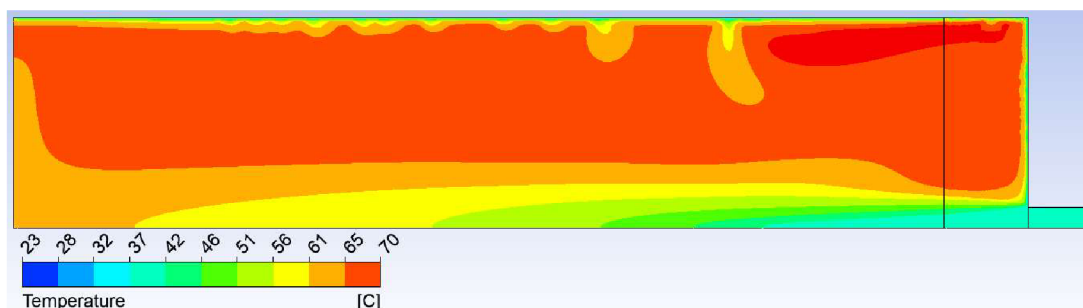


Obrázek 0.4 Chlazení na -10 °C

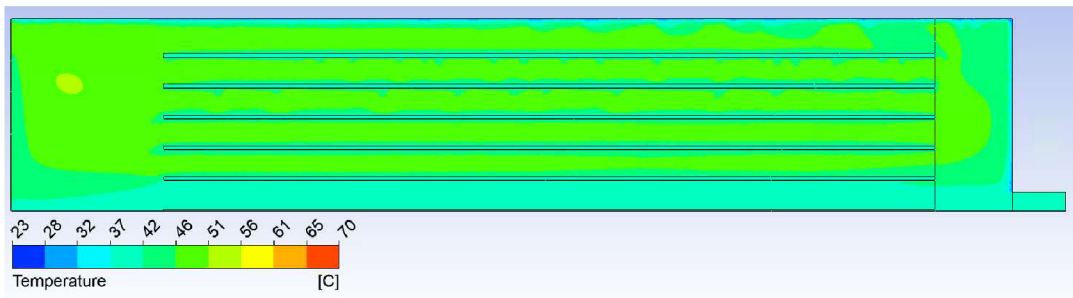


Obrázek 0.5 Předchlazení na 10 °C

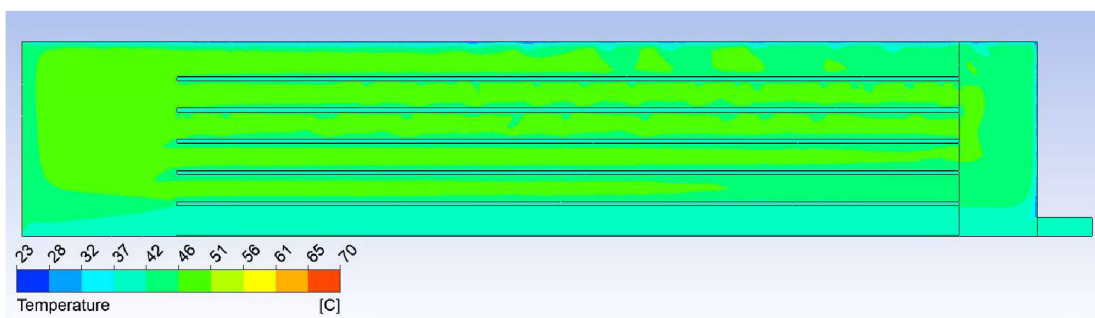
## A.2 V čase 100 s



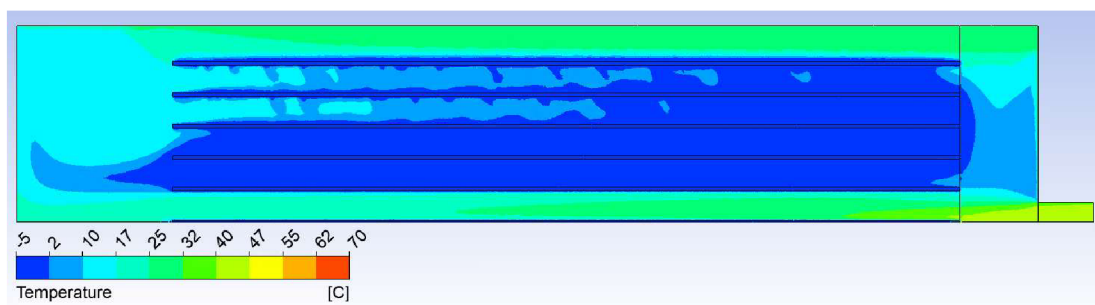
Obrázek 0.6 Modelový příklad



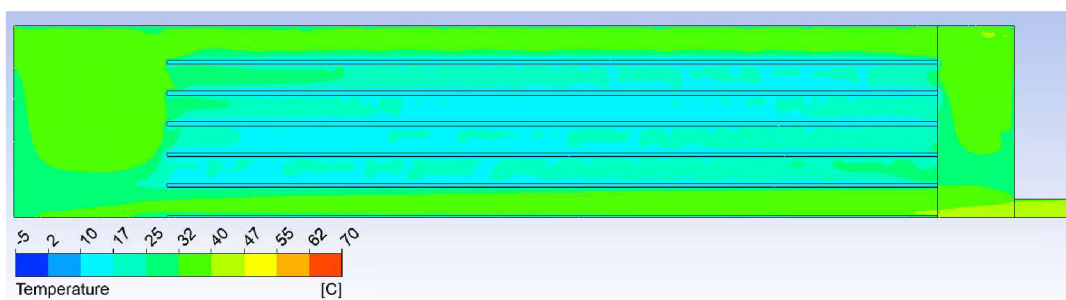
Obrázek 0.7 Pouze prstence



Obrázek 0.8 Termočlánky

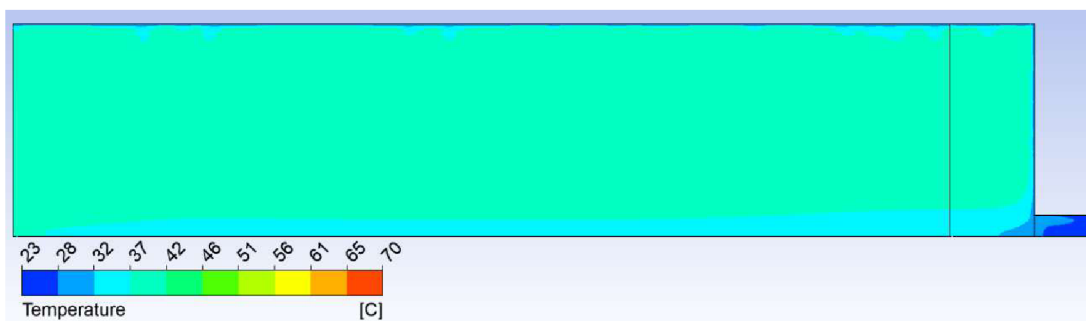


Obrázek 0.9 Chlazení na -10 °C



Obrázek 0.10 Předchlazení na 10 °C

### A.3 V čase 300 s

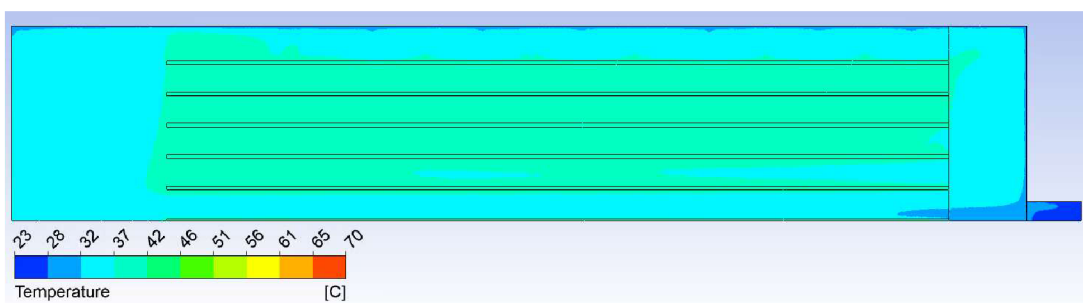


Obrázek 0.11 Modelový příklad

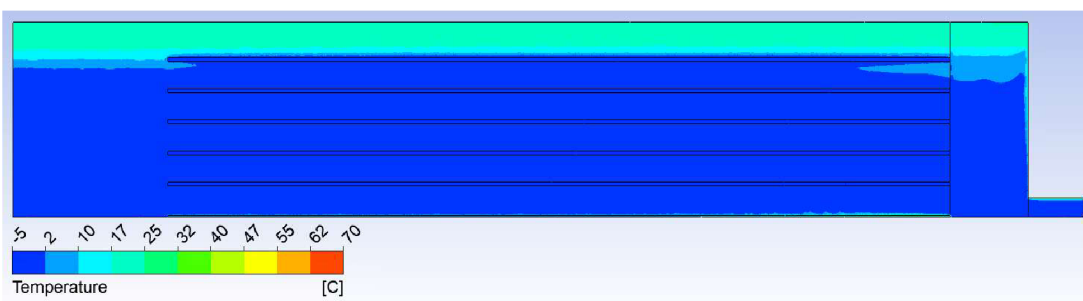


Obrázek 0.12 Pouze prstence

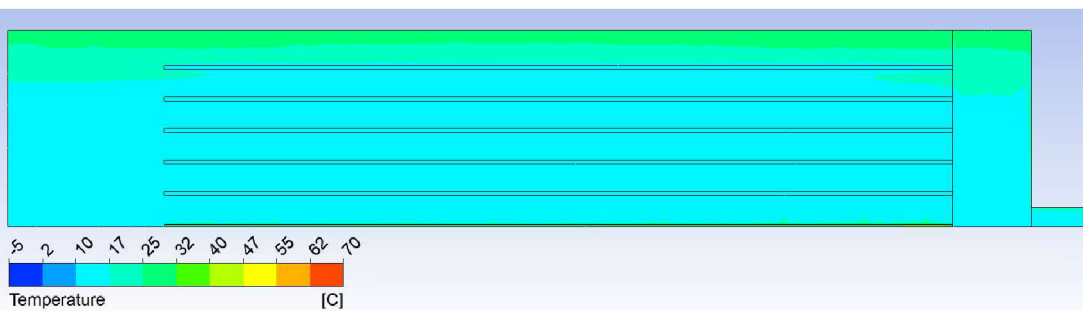




Obrázek 0.13 Termočlánky

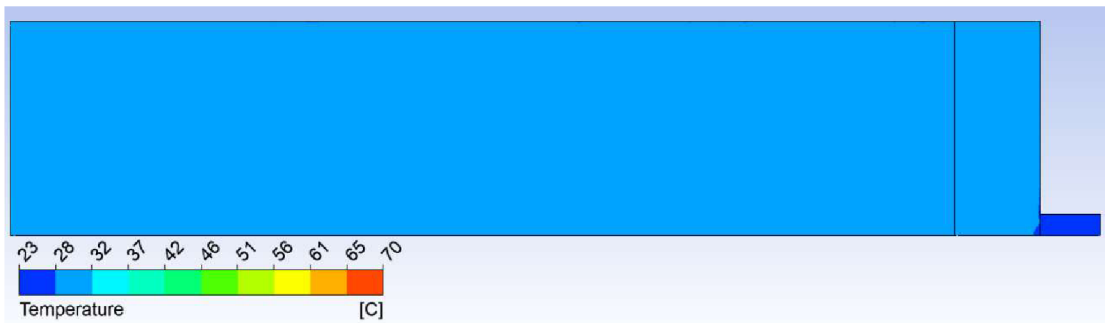


Obrázek 0.14 Chlazení na -10 °C

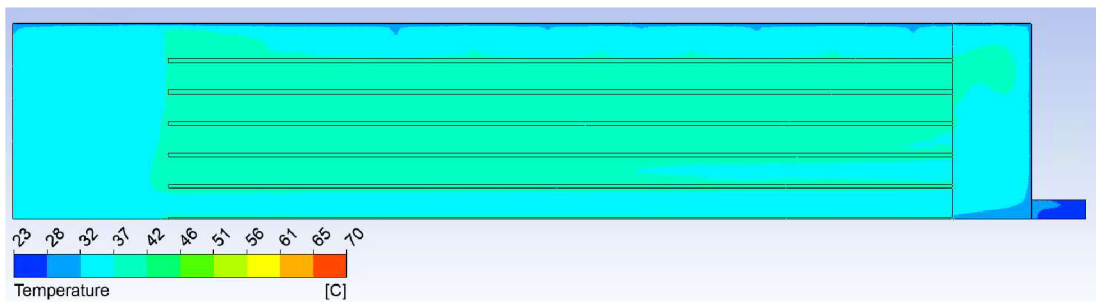


Obrázek 0.15 Předchlazení na 10 °C

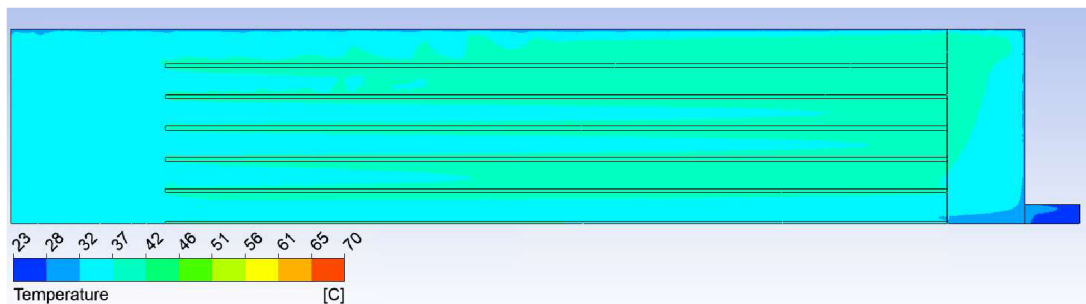
## A.4 V čase 400 s



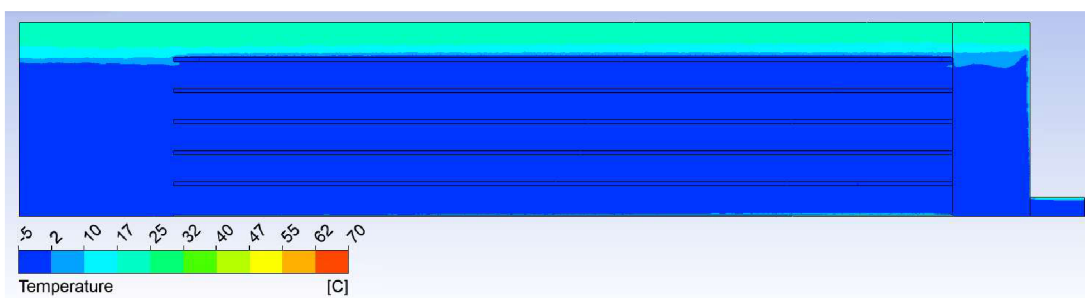
Obrázek 0.16 Modelový příklad



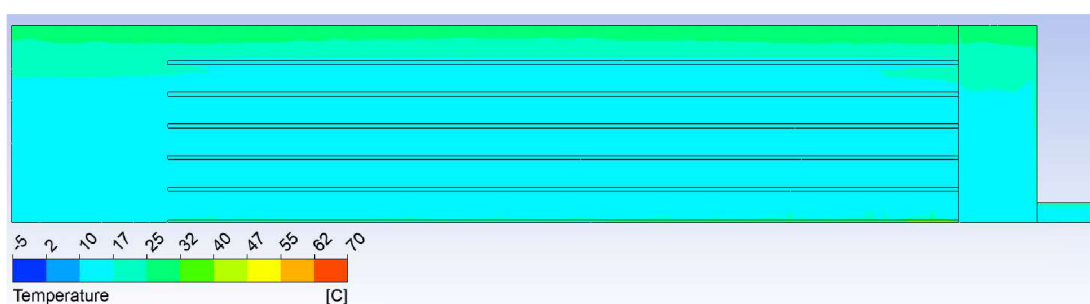
Obrázek 0.17 Pouze prstence



Obrázek 0.18 Termočlánky

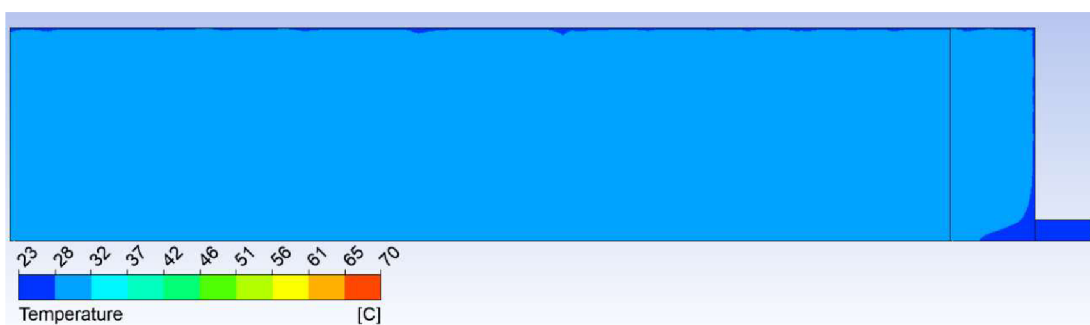


Obrázek 0.19 Chlazení na  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

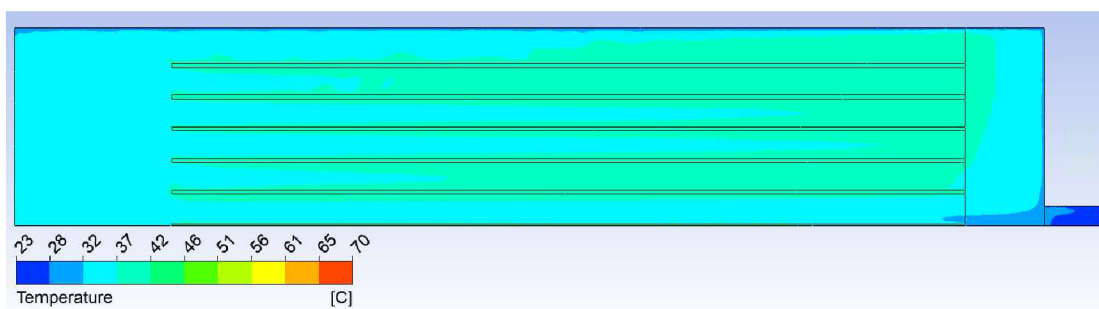


Obrázek 0.20 Předchlazení na  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

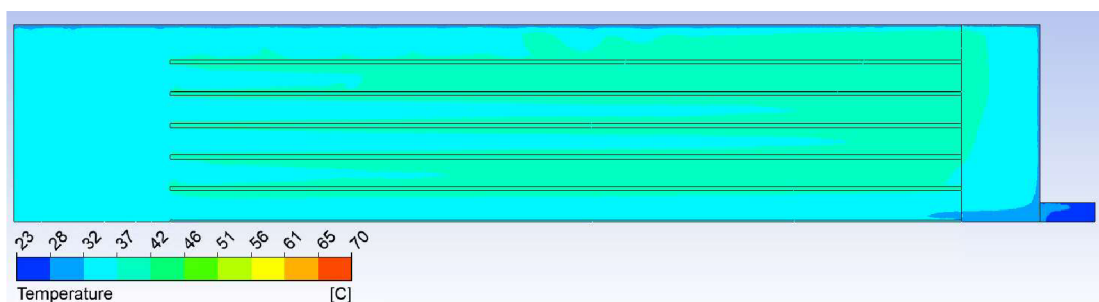
## A.5 V čase 500 s



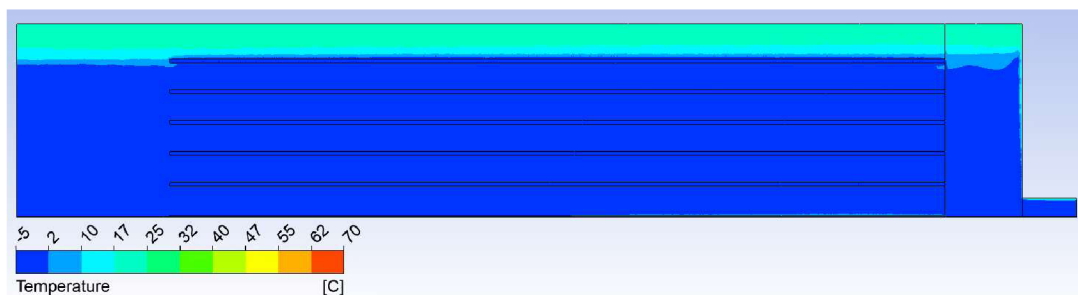
Obrázek 0.21 Modelový příklad



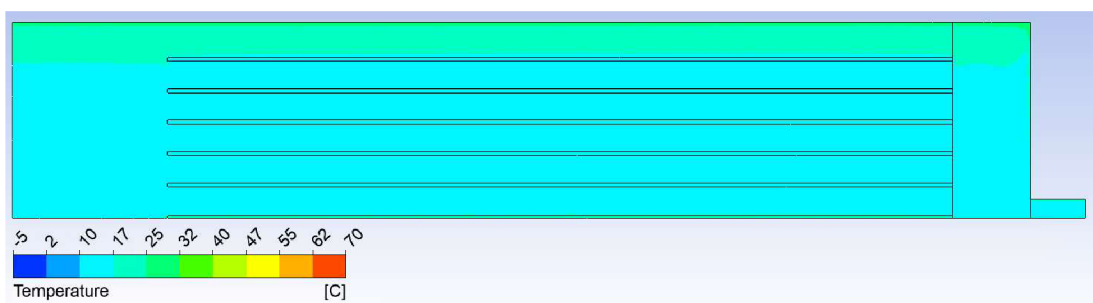
Obrázek 0.22 Pouze prstence



Obrázek 0.23 Termočlánky

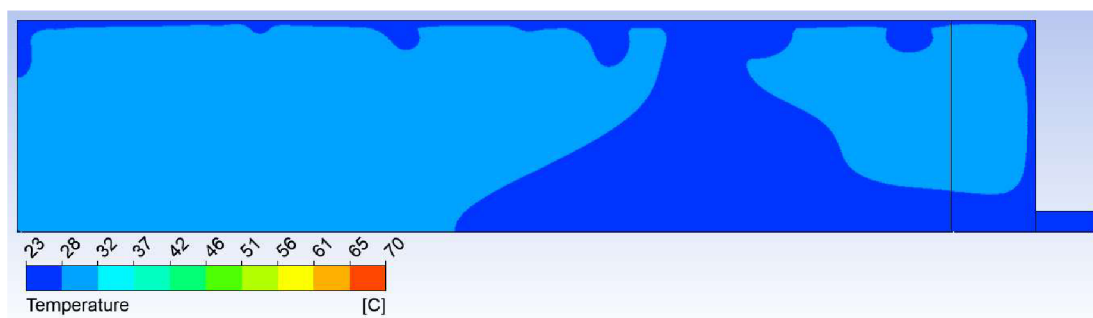


Obrázek 0.24 Chlazení na -10 °C

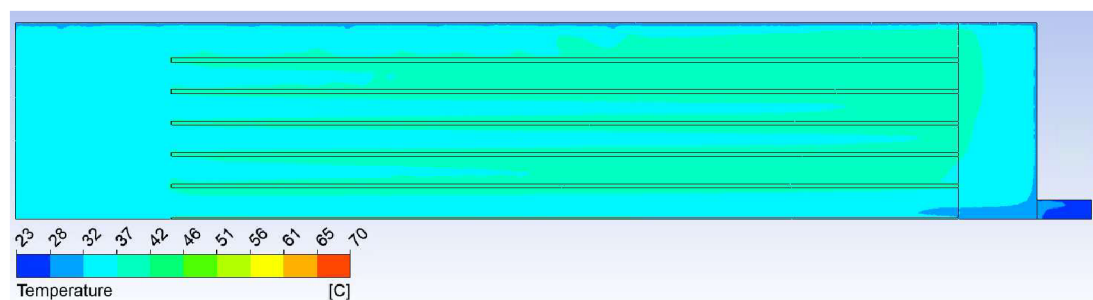


Obrázek 0.25 Předchlazení na 10 °C

## A.6 V čase 600 s



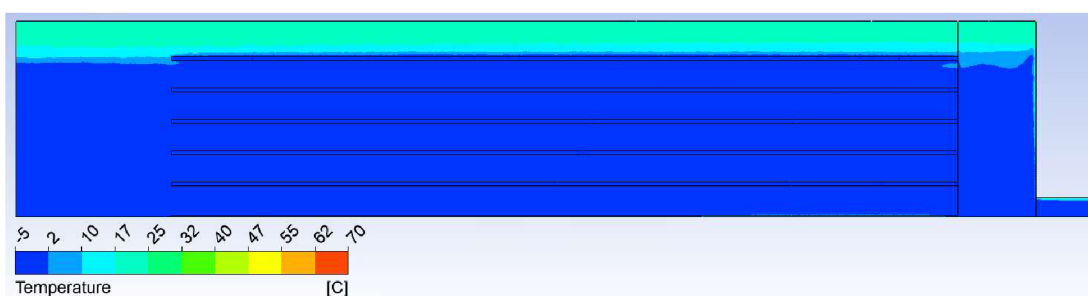
Obrázek 0.26 Modelový příklad



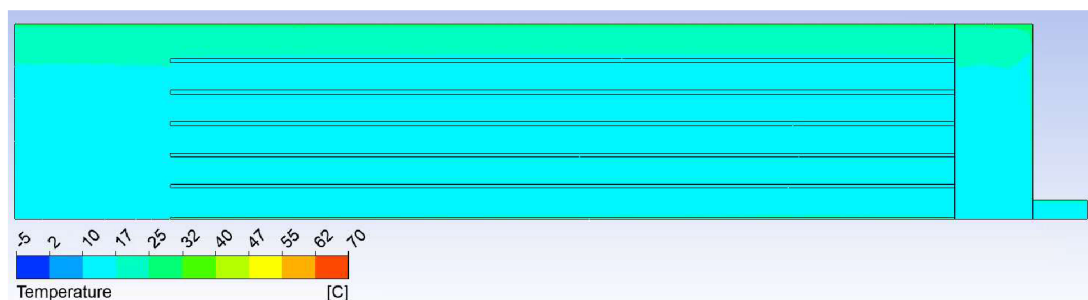
Obrázek 0.27 Pouze prstence



Obrázek 0.28 Termočlánky



Obrázek 0.29 Chlazení na -10 °C



Obrázek 0.30 Předchlazení na 10 °C