

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV ENERGETIKY**



**CARNOTOVY BATERIE (PUMPED  
THERMAL ENERGY STORAGE) –  
SKLADOVÁNÍ ELEKTŘINY POMOCÍ  
TEPELNÝCH OBĚHŮ A SYSTÉMŮ  
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2020**

**VYPRACOVAL: TOMÁŠ SKLÁŘ**

**VEDOUCÍ PRÁCE: ING. VÁCLAV NOVOTNÝ**





# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sklář** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **475058**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Carnotovy baterie (pumped thermal energy storage) - skladování elektřiny pomocí tepelných oběhů a systémů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Carnot batteries (pumped thermal energy storage) - electricity storage by thermal cycles and systems**

Pokyny pro vypracování:

V rámci hledání nových metod pro skladování elektřiny jsou 'Carnotovy baterie' potenciálně vysoce perspektivní koncept. Skladování se provádí ve formě tepla a využívají se poté tepelné oběhy.  
- Tato práce přinese zevrubnou rešerši již existujících systémů i konceptů v rámci výzkumu a vývoje.  
- K vybranému konceptu bude sestaven bilanční model  
- Bude nastíněna možná ekonomika nasazení  
- Nakonec bude provedeno shrnutí a doporučení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Václav Novotný, ústav energetiky FS**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.10.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **23.12.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2022**

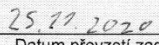
  
Ing. Václav Novotný  
podpis vedoucí(ho) práce

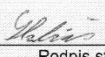
  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## **Prohlášení**

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

V Praze dne 22. 12. 2020

Tomáš Sklár

## **Anotační list**

<b>Jméno autora:</b>	Tomáš Sklár
<b>Název BP:</b>	Carnotovy baterie (pumped thermal energy storage) – skladování elektřiny pomocí tepelných oběhů a systémů
<b>Anglický název:</b>	Carnot batteries (pumped thermal energy storage) – electricity storage by thermal cycles and systems
<b>Akademický rok:</b>	2020/2021
<b>Ústav:</b>	Ústav energetiky 12115
<b>Vedoucí bakalářské práce:</b>	Ing. Václav Novotný
<b>Bibliografické údaje</b>	
<b>Počet stran:</b>	74
<b>Počet obrázků:</b>	26
<b>Počet tabulek:</b>	23
<b>Počet příloh:</b>	0
<b>Klíčová slova:</b>	Carnotovy baterie, PTES, Pumped thermal energy storage, Pumped thermal electricity storage, uložistiště elektřiny, Braytonův oběh, Rankinův oběh, Power-heat-power
<b>Keywords:</b>	Carnot Batteries, PTES, Pumped thermal energy storage, Pumped thermal electricity storage, energy storage, Brayton cycle, Rankine cycle, Power-heat-power

**Abstrakt:**

Tato bakalářská práce se v rešeršní části zabývá seznámením s tématem Carnotových baterií (PTES), porovnáním s typickými i vyvíjenými uložišti elektřiny. Praktická část se pak zabývá návrhem primitivního modelu Carnotovy baterie založené na Braytonově cyklu a také návrhem velikostí rezervoárů a výběrem možných materiálů. Ekonomická část pak porovnává Carnotovy baterie s lithium-iontovými bateriemi na základě prodejní ceny ukládané elektřiny a určuje, kdy je která technologie výhodnější.

**Abstract:**

In the research part this thesis is dealing with the topic of Carnot Batteries, comparing them with typical and in-development energy storage technologies. The practical part is dedicated to proposal of a primitive model of Carnot Battery using Brayton cycle, as well as sizing of the reservoirs and choice of possible materials. The economical part is comparing Carnot Batteries with lithium-ion batteries based on the selling price of the stored electricity and picking the proper situation for each of the two technologies.

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Václavu Novotnému za rady, návody, nápady a hlavně trpělivost. Díky patří také všem, kteří mě při práci podporovali.



# OBSAH

1.	Úvod.....	13
2.	Typické technologie skladování elektřiny .....	15
3.	Technologie Carnotových baterií.....	20
4.	Pracovní a úložná média .....	31
5.	Navrhování systému .....	34
6.	Teoretický návrh Carnotovy baterie .....	38
7.	Ekonomické hodnocení Carnotových baterií.....	60
8.	Závěr .....	63
9.	Reference .....	64
10.	Seznam obrázků.....	72
11.	Seznam tabulek.....	73

## Seznam symbolů, indexů a zkratek

### Symboly

<b><i>T</i></b>	Teplota	[K], [°C]
<b><i>s</i></b>	Měrná entropie	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
<b><i>E</i></b>	Energie	[J]
<b><i>M</i></b>	Hmotnost	[kg/mol]
<b><i>c</i></b>	Měrná tepelná kapacita	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
<b><i>ρ</i></b>	Hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]
<b><i>V</i></b>	Objem	[m <sup>3</sup> ]
<b><i>ṁ</i></b>	Hmotnostní tok	[kg·s <sup>-1</sup> ]
<b><i>h</i></b>	Měrná entalpie	[J·kg <sup>-1</sup> ]
<b><i>Ẇ</i></b>	Výkon	[W]
<b><i>COP</i></b>	Topný faktor	[-]
<b><i>Q</i></b>	Teplo	[J]
<b><i>w</i></b>	Měrná práce	[J·kg <sup>-1</sup> ]
<b><i>η</i></b>	Účinnost	[-], [%]
<b><i>f</i></b>	Poměr	[-]
<b><i>p</i></b>	Tlak	[Pa]
<b><i>l</i></b>	Délka	[m]
<b><i>τ</i></b>	Časové měřítko	[s]
<b><i>t</i></b>	Čas	[s]
<b><i>k</i></b>	Koeficient	[-]
<b><i>C</i></b>	Cena	[Kč/kWh]
<b><i>CAPEX</i></b>	Kapitálové náklady	[Kč/kWh]
<b><i>N</i></b>	Počet cyklů	[-]

## **Indexy**

<b><i>H</i></b>	Horký rezervoár
<b><i>C</i></b>	Studený rezervoár
<b><i>in</i></b>	Vstup
<b><i>out</i></b>	Výstup
<b>č</b>	Čerpadlo
<b><i>max</i></b>	Maximální
<b><i>min</i></b>	Minimální
<b><i>výs</i></b>	Výstupní
<b><i>tm</i></b>	Teplený motor
<b><i>st</i></b>	Uložiště
<b><i>p</i></b>	Tlakové
<b><i>s</i></b>	Pevný
<b><i>g</i></b>	Plynný
<b>0</b>	Okolí
<b><i>comp</i></b>	Komprese
<b><i>exp</i></b>	Expanze
<b><i>ideal</i></b>	Ideální oběh
<b><i>real</i></b>	Reální oběh
<b><i>nab.</i></b>	Nabíjecí oběh
<b><i>vyb.</i></b>	Vybíjecí oběh
<b><i>RT</i></b>	Round-trip
<b><i>atm</i></b>	Atmosférický
<b><i>oběh</i></b>	Oběh
<b><i>obj.</i></b>	Objemový
<b><i>cena</i></b>	cenový

## **Zkratky**

<b><i>PTES</i></b>	Pumped Thermal Energy Storage
<b><i>CAPEX</i></b>	Capital Expense
<b><i>OPEX</i></b>	Operating Expense
<b><i>CAES</i></b>	Compressed Air Energy Storage
<b><i>PVE</i></b>	Přečerpávací vodní elektrárny
<b><i>Li – ion</i></b>	Lithium-iontové baterie
<b><i>ETES</i></b>	Electric Thermal Energy Storage
<b><i>ORC</i></b>	Organický Rankinův cyklus
<b><i>TIPTES</i></b>	Thermally integrated Pumped Thermal Energy Storage
<b><i>CHEST</i></b>	Compressed Heat Energy Storage
<b><i>EU</i></b>	Evropská unie
<b><i>GWP</i></b>	Global Warming Potencial
<b><i>ODP</i></b>	Ozone Depletion Potencial
<b><i>COP</i></b>	Coefficient of Performance

## 1. ÚVOD

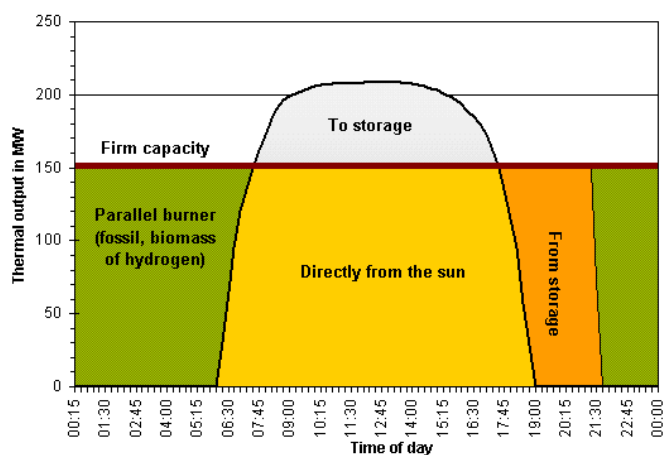
V dnešní době už si život bez elektřiny dokážeme asi těžko představit, používáme ji dennodenně a nové technologie naši závislost na ní stále více prohlubují. Většina lidí se proto bojí doby, kdy nám dojdou zásoby fosilních paliv, a stále více podporují vývoj obnovitelných zdrojů, jako jsou vodní, větrné nebo solární elektrárny. Mimo to se ještě vyzdvihává ekologie, která se výrobou elektřiny samozřejmě velmi dotýká. Různé státy zavírají své uhelné a jaderné elektrárny, a podporují tedy obnovitelné zdroje nejen kvůli šetření fosilních paliv, ale kvůli ekologické výrobě elektřiny.

Otázkou budoucího vývoje produkce elektřiny ovšem není pouze, jak energii získáme, na jak dlouho nám vystačí jejich zdroje, nebo jak ekologické tyto zdroje jsou, ale také kam a jak energii uskladnit.

Většina dnešních způsobů ukládání elektřiny je finančně nákladná a mají krátkou životnost, nebo je lze použít pouze v určitých příkladech (například přečerpávací vodní elektrárny), proto se v relativně nedávané minulosti začaly vyvíjet a stále zdokonalovat způsoby ukládání energie v podobě tepla. [1] Především nás budou zajímat takzvané Carnotovy baterie aneb ukládání energie pomocí tepelných oběhů (anglicky Pumped thermal electricity storage nebo také power-heat-power). Robert Laughlin, vítěz Nobelovy ceny za fyziku, tvrdí, že Carnotovy baterie jsou budoucností ukládání elektřiny, s ohledem na stále se zvyšující nároky na ekologii. [2]

Proč je tedy pro nás vývoj uložitel energií tak důležitý? Souvisí to právě s vývojem obnovitelných zdrojů. Výroba elektřiny u většiny těchto zdrojů totiž není konstantní. [3] Jako příklad si uvedeme solární elektrárnu, která produkuje elektřinu pouze během dne. Nicméně do sítě je třeba dodávat energii také v noci, proto se část energie získané během dne akumuluje a poté využívá přes noc pro udržení konstantní dodávky. [4]

Tento princip zobrazuje obrázek 1, kde lze vidět, že část celkového výkonu, který dostáváme ze Slunce během dne, se akumuluje v uložisti a po setmění se následně uložisti vybíjí. Zbytek chybějícího výkonu je poté dodáván z externích zdrojů, jako jsou fosilní paliva nebo biomasa. [4] [5]



Obrázek 1: Časová bilance dodávky elektřiny do sítě z fotovoltaické elektrárny [4]

Obecně se při vývoji a užívání uložišť energie hledí na několik faktorů, které určují výhodnost dané technologie oproti technologiím konkurenčním. Mezi tyto faktory patří: [3]

**Vyspělost:** Jako vyspělou lze považovat takovou technologii, jejíž problematika je dostatečně prozkoumána a prošla dostatečným vývojem, při kterém byly odstraněny její závažné nedostatky.

**Životnost:** Velmi důležitá vlastnost, která určuje, jak dlouho vyrobené uložišť vydrží v provozu. S tímto pojmem také souvisí počet cyklů, které technologie zvládne.

**Cena:** Dnes pravděpodobně nejdůležitější vlastnost. Lze zde zohlednit jak investiční náklady (CAPEX), tak náklady na údržbu a provoz (OPEX). Náklady závisí nejen na typu uložišť, ale také na instalovaném výkonu, kapacitě, technologiích, které jsou použity pro zvýšení životnosti, apod. Důležité je zohlednit cenu vztaženou na tyto parametry, především na životnost/počet cyklů a kapacitu. [6]

**Hustota:** Lze chápat jako množství energie, které je možné uložit do daného objemu. V praxi znamená lepší hustota menší náročnost na rozlohu těchto uložišť.

**Účinnost:** Stejně jako při získávání energie je i u jejího ukládání důležitá účinnost. Nabíjení a vybíjení nelze provést bez jakékoli ztráty, tudíž účinnost hraje značnou roli ve výhodnosti technologie.

**Citlivost k životnímu prostředí:** Vlastnost, která sice neovlivňuje přímo náklady na jednotku uložené energie jako předchozí vlastnosti, nicméně je stále více vyzdvihována její podstata nejen u způsobů získávání energie (například v Německu, kde se postupně zbavují uhelných elektráren a přechází na obnovitelné zdroje), ale i u způsobů ukládání energií. [7]

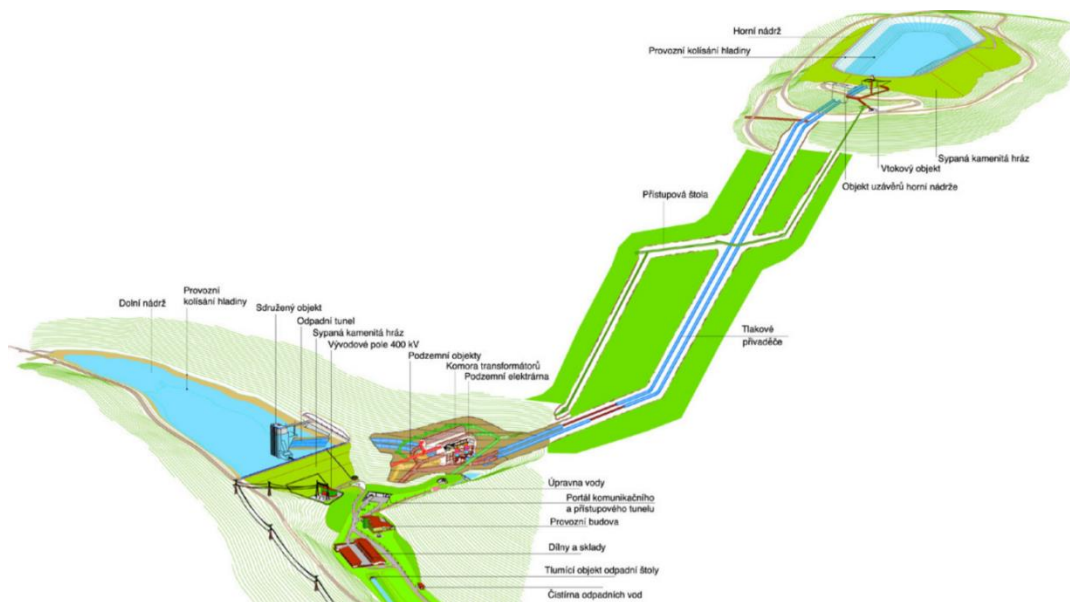
Jednotlivé faktory nemusí být vždy konstantní a podobně jako způsoby získávání energie závisí na podmínkách. Ovšem nejdůležitějším důvodem, proč se nepoužívá pouze jeden nejvýhodnější způsob ukládání energie, je fakt, že jej nelze použít vždy. Důvody jsou většinou technického nebo ekologického charakteru. [8]

## 2. TYPICKÉ TECHNOLOGIE SKLADOVÁNÍ ELEKTŘINY

Jakožto relativně nová technologie musí být Carnotovy baterie schopny konkurovat ostatním způsobům akumulace energie, které už jsou léty ověřené a funkční. V současnosti jsou nejpoužívanějšími způsoby akumulace přečerpávací vodní elektrárny, uložení v podobě stlačeného vzduchu a lithiové baterie. [9] Každý z těchto typů uložení má své výhody a nevýhody. Právě ty jsou pro nás podstatné, abychom s nimi mohli Carnotovy baterie srovnat a pochopili, proč se jedná o jednu z nejslibnějších budoucích technologií pro ukládání elektřiny.

### 2.1. Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny jsou nejrozšířenější technologií ukládání energie, která se používá již od konce 19. století. [10] Fungují na principu gravitace. Schéma lze vidět níže na obrázku 2, systém se skládá ze 2 nádrží, horní a dolní. Přebytečná energie procházející vodní elektrárnou pohání čerpadlo, které přemístí vodu ze spodní nádrže do horní, čímž dochází k nabíjení. Při vybíjení naopak voda proudí z horní nádrže do spodní, přičemž v turbíně přeměňuje svou mechanickou energii na elektrickou. [3] [10]



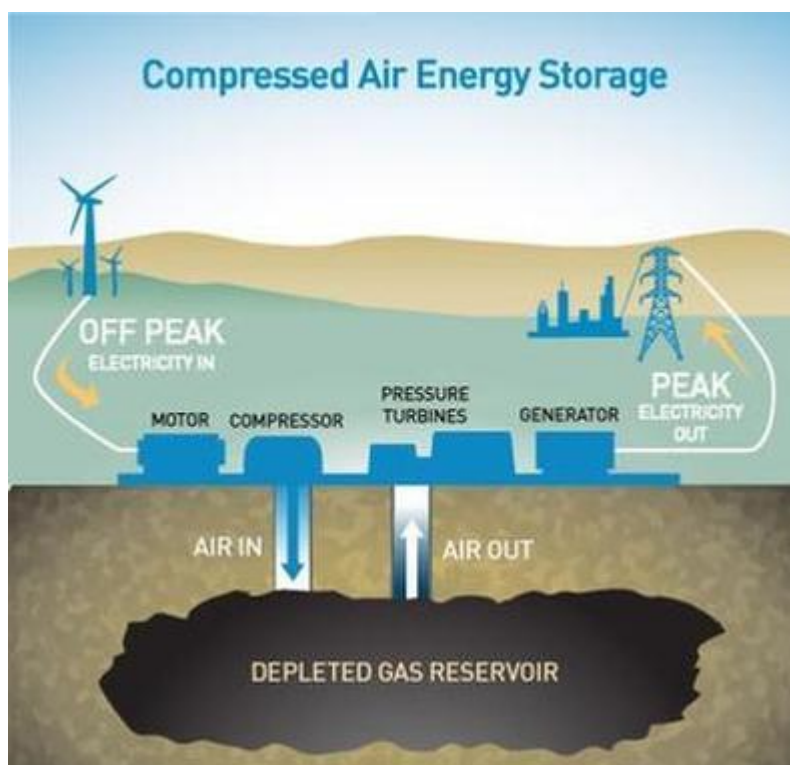
Obrázek 2: Schéma přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně, největší přečerpávací elektrárny v ČR [11]

Přečerpávací vodní elektrárny jsou v řadě hledisek velice výhodným způsobem ukládání energie, proto tvoří naprostou většinu velkokapacitních uložení energie. Charakteristické jsou účinností cyklu (až 85 %), [12] [9] [10] nízkými ztrátami při skladování (0,005–0,02 %), [3] dlouhou životností (30–60 let), [3] [9] ale na druhou stranu také nízkou hustotou energie (různé zdroje se liší v přesných hodnotách, ale obvykle se pohybují mezi 0,2 a 3 Wh/l). [3] [9] [12] Kapacitně může přesáhnout i 1000 MWh a cenově

není příliš nákladný, cena se pohybuje mezi 100–3000 Kč/kWh. [12] Nevýhodou však zůstává, že tato technologie je závislá na přítomnosti vodního zdroje, tudíž se v mnohých případech nedá využít, zatímco námi zkoumané Carnotovy baterie lze použít bez závislosti na umístění. [3]

## 2.2. Ukládání pomocí stlačeného vzduchu

Druhým způsobem ukládání energie je forma stlačeného vzduchu. Při této metodě se přebývající energie využívá ke stlačování vzduchu, který se může nacházet v nádržích k tomuto účelu vyrobených nebo také v solných kavernách, jak je naznačeno na obrázku 3. [3] [13] Pokud tuto energii potřebujeme opět odebrat, stlačený vzduch se zahřívá a následně expanduje v turbíně, která pohání generátor. [3] [13]



Obrázek 3: Schéma ukládání energie ve formě stlačeného vzduchu [14]

V praxi se tato technologie využívá pouze na 2 místech na světě, z nichž jedna se nachází v Německu a druhá v USA v elektrárně McIntosh. [3] [15] Druhá z nich je po instalaci nových generátorů schopná dodávat výkon až 226 MW, předtím byla schopna výkonu 110 MW po dobu 26 hodin. [3] Odhadovaná účinnost tohoto systému se pohybuje mezi 40 a 50 %, což je v porovnání s přečerpávacími elektrárnami výrazně nižší. [16] Při pohledu na ostatní údaje můžeme v porovnání s přečerpávacími elektrárnami zaznamenat vyšší hustotu energie (3–12 Wh/l), [3] nižší náklady na uskladnění (50–800 Kč/kWh), [13] podobnou kapacitu přesahující 1000 MWh a podobnou životnost (přes 30 let). [13] [17]

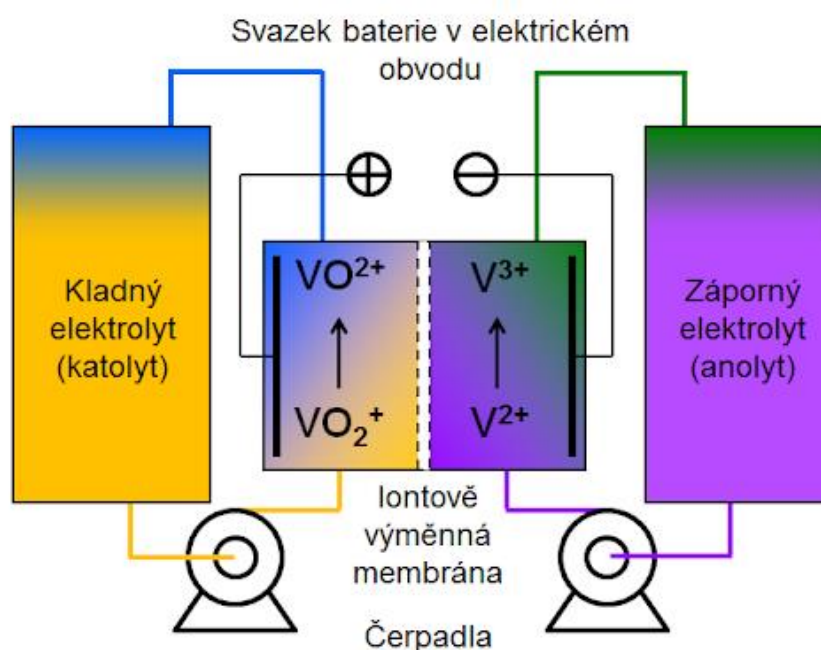


Nevýhodou je opět závislost na umístění, kdy je výhodnější využít k ukládání kaverny než budovat nádrže, které by zvedly náklady a také mohly snížit účinnost. [17]

Vzhledem k tomu, že při vybíjení se k ohřevu využívá zpravidla zemní plyn, musíme brát v potaz také ekologický dopad. Z tohoto důvodu se tato technologie stále vyvíjí a je snaha snížit spotřebu paliv, čímž by se zároveň zvýšila účinnost. Toto by mělo za následek zvýšení nákladů, ovšem účinnosti by mohly dosahovat hodnot okolo 75–95 %, což by je řadilo na podobnou úroveň jako přečerpávací elektrárny. Zatímco současný způsob je takzvaný „diabatický“, nově vyvíjené technologie fungují na principu adiabatickém nebo izotermickém. Experimentuje se také s podvodními uložišti. [3] [17]

### 2.3. Průtočné baterie

Dalším typem jsou takzvané průtočné baterie (flow batteries), které ukládají energii ve formě chemické energie. V průtočné baterii se nachází 2 elektrody (pozitivní a negativní) a 2 typy elektrolytů, které jsou odděleny membránou. Schéma je naznačeno na obrázku 4. [3] [18]



Obrázek 4: Schéma průtočné baterie [19]

V porovnání s předchozími dvěma způsoby ukládání energie ukládají průtočné baterie elektřinu v soustavě více modulů, což vede k možnosti vysokých kapacit a výkonů. [20] V dnešní době už se i cena dá srovnat s předchozími technologiemi (cca 1500 Kč/kWh). [21] Životnost baterií je vzhledem k počtu cyklů poměrně vysoká (některé zdroje uvádí 15 000–20 000 cyklů. [18]) Účinnost bývá o něco nižší než pro přečerpávací elektrárny a

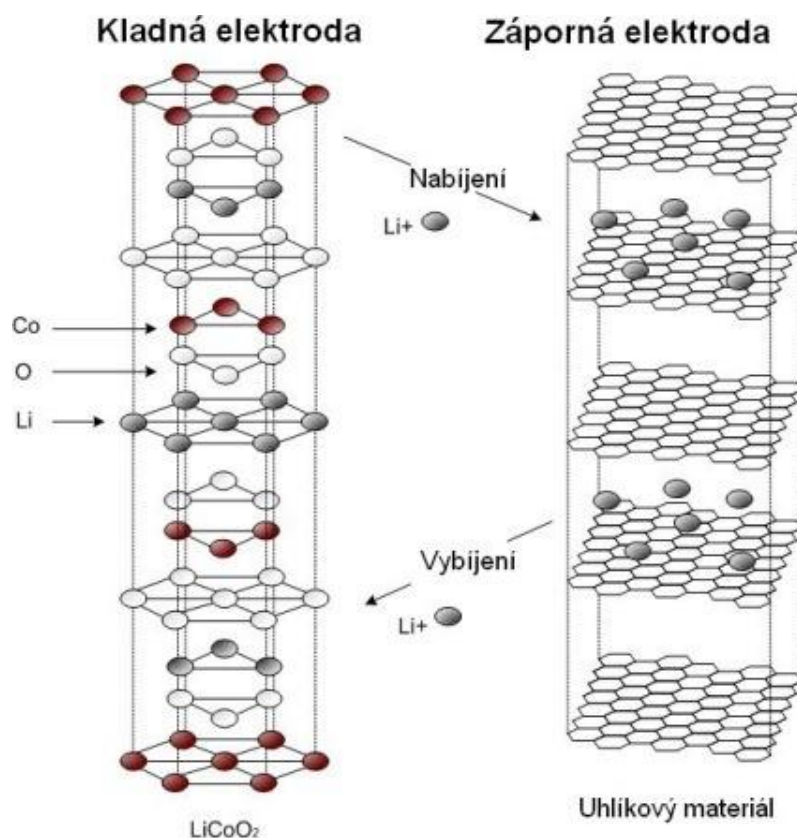
lithiové baterie (60–75 %). [22] Samozřejmě největší výhodou oproti předchozím dvěma je fakt, že průtočné baterie nejsou omezeny umístěním a lze je stavět takřka kdekoliv. [3]

Existuje několik typů průtočných baterií, které se dělí podle materiálu, ze kterého jsou elektrody vyrobeny, ovšem nejpoužívanějším jsou takzvané vanadové průtočné baterie. [18]

## 2.4. Lithiové baterie

Lithium-iontové baterie se používají ve všech možných měřítkách od nejmenších pro kapesní elektroniku po velkokapacitní, na které se tato kapitola zaměřuje. [23] První návrhy lithium-iontových baterií se objevily počátkem 20. století, nicméně až v 70. letech se začaly používat v komerčním měřítku, ovšem pouze na jedno použití (nenabíjecí). [24] Až v roce 1991 vyvinula společnost Sony první nabíjecí lithiovou baterii. [24] [25]

Fungují na známém principu 2 elektrod (katoda/anoda) a elektrolytu. Jako katoda se používá například lithium-kobalt oxid, lithium-mangan oxid, lithium-nikl dioxid, anoda je vyrobena z uhlíkového materiálu a jako elektrolyt se využívá nejčastěji lithium hexafluorofosfát. [26] Princip nabíjení a vybíjení pomocí transportu lithného kationtu je zobrazen na obrázku 5.



Obrázek 5: Princip lithiové baterie [26]

V porovnání s průtočnými bateriemi jsou lithiové v mnoha ohledech srovnatelné, nebo dokonce lepší, jako v případě velmi vysoké hustoty energie nebo účinnosti, která dosahuje minimálně 70 %, ale může sahat až k 88 %. [27] [28] Disponují ale nižšími počty cyklů (mezi 1 000 a 10 000). [9] V roce 2020 začala výstavba zatím největšího uložště s lithion-iontovými bateriemi, které se skládá ze 4 projektů, jež dohromady tvoří kapacitu až 1200 MWh. [29] Nevýhodou však je vysoká cena uložště, která byla v roce 2019 cca 3400 Kč/kWh. [30]

## 2.5. Porovnání zavedených technologií

V tabulce 1 lze vidět porovnání výše uvedených technologií ukládání energie. Každá technologie má své výhody i nevýhody.

Tabulka 1: Porovnání typických uložšť elektřiny

<b>Technologie</b>	<b>Hustota [Wh/l]</b>	<b>Účinnost [%]</b>	<b>Geografická omezení</b>	<b>Životnost [rok]</b>	<b>Cena [Kč/kWh]</b>
<b>PVE</b>	0.2–3	85	ANO	30–60	100–3000
<b>CAES</b>	3–12	40–50	ANO	>30	50–800
<b>Průtočné baterie</b>	15–25	60–75	NE	2–20	1500
<b>Li-ion baterie</b>	100– 200	70–88	NE	2–20	3400

### 3. TECHNOLOGIE CARNOTOVÝCH BATERIÍ

Nyní přejdeme k hlavnímu tématu této práce, Carnotovým bateriím. Jak bylo již uvedeno v úvodu, Carnotovy baterie jsou jen jedním z mnoha označení, nejčastěji se v anglických textech používá termín Pumped Thermal Energy Storage nebo Pumped Thermal Electricity Storage, případně také power-heat-power nebo ETES (Electric Thermal Energy Storage). [31] Jelikož je zkratka PTES běžně používána v dostupné literatuře, bude používána i ve zbytku tohoto textu.

Z termínu power-heat-power vyplývá způsob, jak se v tomto systému energie ukládá. Přebytečná energie, která je třeba uložit, se přeměňuje na teplo a při vybíjení je toto teplo zpětně přeměňováno na elektřinu. Základ většiny systémů se skládá ze 2 zásobníků tepla, takzvaného horkého a studeného, kompresoru, expandéru a tepelných výměníků. [1] Kompresor se využívá ke stlačení pracovního média, čímž zvyšuje vnitřní energii plynu, tu poté předává do horkého rezervoáru. Následně plyn expanduje, čímž se ochlazuje a předává „chlad“ do druhého (studeného) rezervoáru. Jakmile dosáhne teplota všeho materiálu uvnitř horkého rezervoáru maximální teploty daného oběhu a studeného minimální teploty, je systém považován za nabitý. Při vybíjení probíhá proces obráceně a horký rezervoár předává teplo pracovnímu médiu, které následně expanduje, čímž vrací energii do sítě. Jakmile dosáhne teplota horkého rezervoáru své minimální teploty a studený rezervoár své maximální teploty, je systém považován za vybitý. [1] [32]

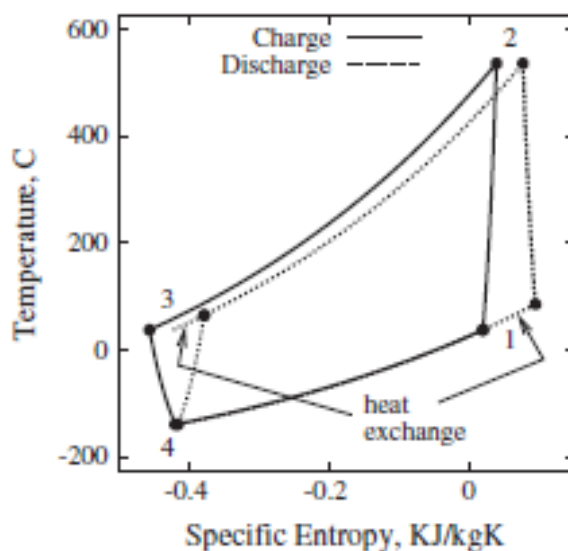
První patent vznikl už v roce 1924, [33] nicméně větší rozvoj u PTES byl zaznamenán až v 21. století, především v posledních 10 letech se pracuje na vývoji velkokapacitních PTES.

Existuje více rozdělení PTES. Prvním je rozdělení na základě formy ukládání tepla, zda se využívá takzvané latentní nebo citelné teplo. Latentní teplo dodávané do systému znamená, že se mění vnitřní energie systému, ale nemění se jeho teplota. Dá se také nazvat jako skupenské teplo, kdy se energie využívá ke změně skupenství. Citelné teplo naopak mění teplotu systému, zatímco nemění jeho ostatní vlastnosti jako objem nebo tlak a hlavně skupenství. [34]

Druhým způsobem, jakým můžeme PTES dělit a kterým se budeme nadále zabývat, je rozdělení na základě tepelného oběhu. Existují 2 oběhy, které se pro PTES používají: Braytonův a Rankinův cyklus (ve většině případů buď organický/podkritický nebo transkritický). [3] [34]

### 3.1. Carnotovy baterie založené na Braytonově cyklu

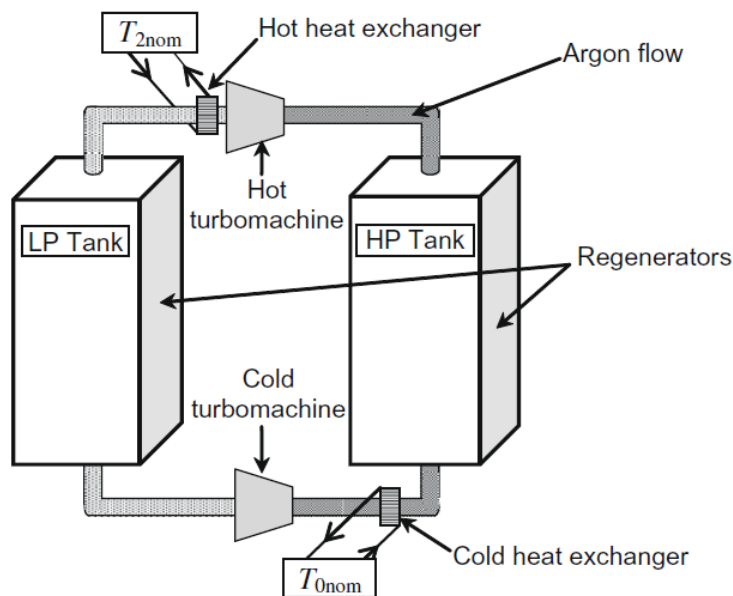
První typ PTES je založen na Braytonově cyklu. Braytonův ideální cyklus v praxi funguje tak, že je plyn nasáván do kompresoru, kde probíhá izoentropická komprese, při které se zvyšuje teplota a tlak plynu. Následně plyn odvádí své teplo do nádrže, čímž se ochlazuje. Při druhé části plyn izoentropicky expanduje a tím se ještě více chladí, následuje pak ohřev plynu přijímáním tepla z druhé nádrže, kterou tím ochlazuje. Tím je oběh pro nabíjení uzavřený a může se opakovat. [35] T-s diagram tohoto cyklu je zobrazen na obrázku 6.



Obrázek 6: T-s diagram Joule-Braytonova cyklu [1]

První návrh velkokapacitních PTES vytvořil Tristan Desrues a kolektiv v roce 2010 (obrázek 7). Ten se dle jeho popisu skládal z vysokotlaké nádrže, nízkotlaké nádrže, 2 párů kompresor/turbína (jeden pro nabíjení a druhý pro vybíjení) a 2 tepelných výměníků. [36]

Desrues použil jako pracovní médium argon, ten pomocí kompresoru a turbíny protéká systémem. Kompresor stlačuje a tím ohřívá plyn na cestě z nízkotlaké do vysokotlaké nádrže a turbína naopak ochlazuje plyn na cestě z vysokotlaké do nízkotlaké. Tím vznikají v části každé nádrže výrazně odlišné teploty, které se postupně začnou vyrovnávat. Díky tepelným výměníkům se poté udržuje tepelný rozdíl mezi nádržemi a proces nabíjení končí po dosažení dané hranice. Při vybíjení se proces obrátí, přičemž je používán druhý pár kompresor/turbína. [36]



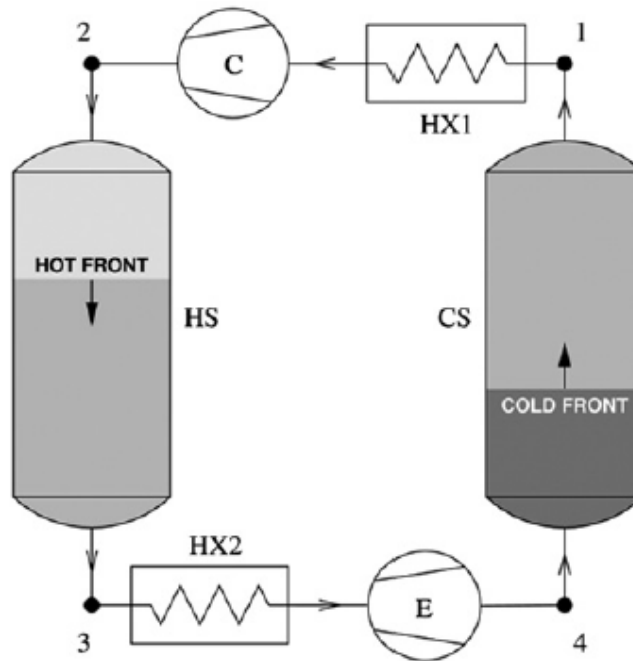
Obrázek 7: Návrh PTES systému, který předvedl Desrués [36]

Samozřejmě se musí počítat s nevrátností systému, jelikož dochází různými vlivy ke ztrátám. Dle návrhu, který předložil Desrués, má tento systém účinnost přibližně 66 %, jedná se ovšem pouze o teoretický výpočet. [36]

V roce 2012 vytvořil svůj model Jonathan Howes, který nevycházel z předchozího modelu, ale založil ho na poznacích Johna Ericssona z první poloviny 19. století. V principu funguje podobně jako předchozí model, nicméně využívá pístový kompresor a expandér a teploty jsou nižší jak v horké, tak ve studené nádrži (u modelu Desrua nazývané vysokotlaká a nízkotlaká). I přes neúspěch 1. prototypu se mu nakonec podařilo vytvořit model, který dosáhl teoretické účinnosti 72 %. [3] [36]

Další návrhy ovšem vycházely většinou z modelu, který navrhl Desrués, jeden z těchto návrhů předložil Alexander J. White se svým týmem z univerzity v Cambridge.

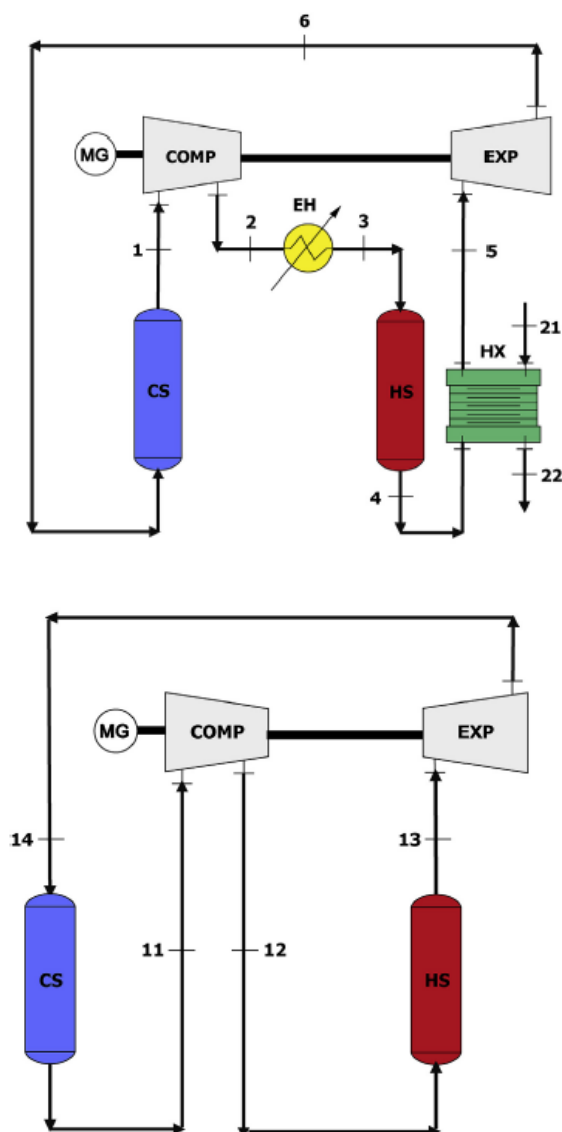
White se pokusil původní model, který je naznačen na obrázku 8, vylepšit snížením ztrát na minimum. Z matematického modelu zjistil, že při vyšších poměrech teplot na kompresoru/turbíně se zvýší účinnost oběhu, k tomu by ovšem bylo zapotřebí dražších materiálů rezervoárů. Nicméně pokud se zvýší i poměr mezi horkým a studeným rezervoárem, pak se může účinnost snížit. Nakonec také zjistil, že použití pístového kompresoru a expandéru účinnost zvýší. [37] [1]



Obrázek 8

Obrázek 8: Model, který předvedl White [1]

Benato a Stoppato se pokusili o návrh systému, který využíval komerčně dostupné kompresory a turbíny, a jako pracovní médium použili vzduch (obrázek 9). Tento systém dosahoval nižší účinnosti, nicméně pokles byl pouze mírný, a vezmou-li se v úvahu výsledné náklady na uloženou energii, které se díky použití snížily, dostáváme nejvýhodnější model, co týče poměru účinnosti a nákladů. Proto je také Benatův model v současnosti nejvíce zmiňovaným v souvislosti s PTES na bázi Braytonova cyklu. [38] [34]



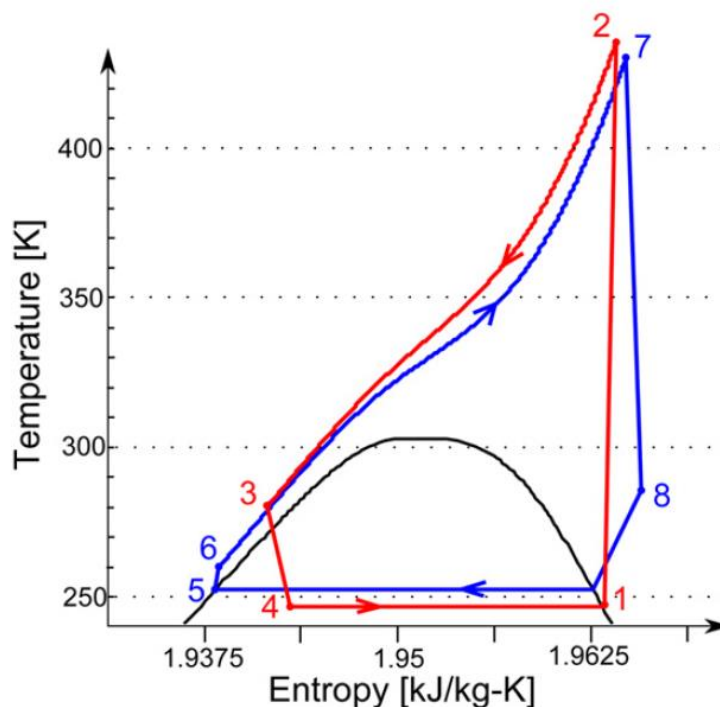
Obrázek 9: Schéma systému, který navrhl Benato. Vlevo schéma při nabíjení, vpravo při vybíjení [34]

Další týmy přišly se svými modely, ze kterých zjistily, jak zvýšit účinnost PTES. McTigue se svým týmem došel k závěru, že většina ovlivnitelných ztrát závisí na kvalitě kompresoru a turbíny. [39] Thess ze svého modelu zjistil, že výsledná účinnost je také funkcí výstupního výkonu systému. [3]

### 3.2. Carnotovy baterie založené na Rankinově cyklu

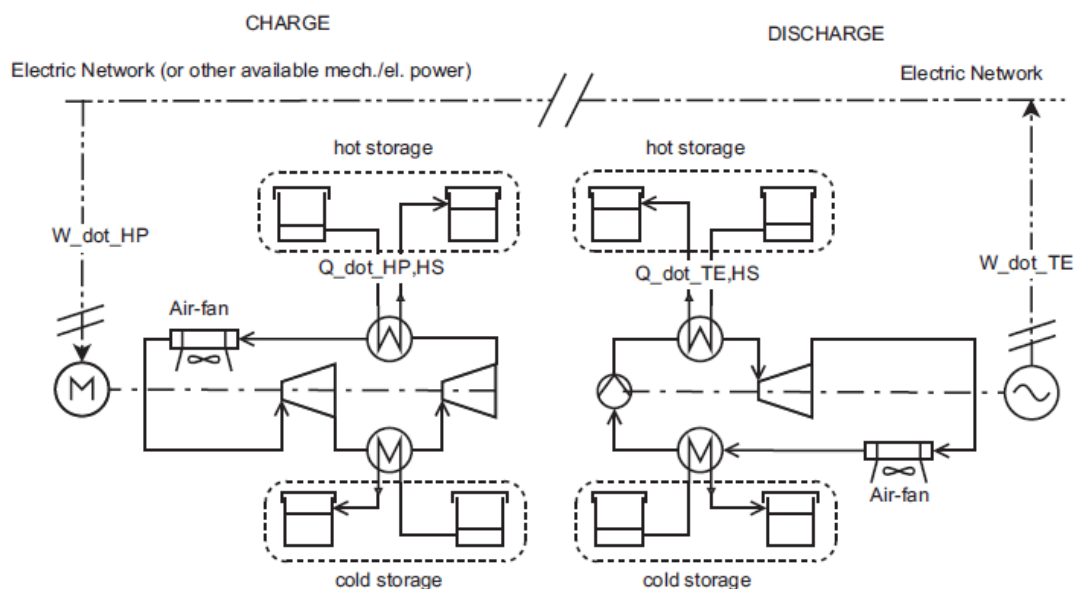
Druhý typ PTES je založený na principu transkritického Rankinova cyklu, který je zobrazen na obrázku 10 (obrázek 10:). Ten vznikl jako alternativa běžně používaného organického Rankinova cyklu (ORC). Pro tento oběh bylo v průběhu let vyzkoušeno mnoho různých látek jako pracovní médium. Ty nejběžnější budou uvedeny v pozdějších částech této práce. [40]





Obrázek 10: T-s diagram Rankinova cyklu, červená barva značí proces nabíjení a modrá barva značí vybíjení [41]

Rankinův cyklus se začal využívat jako alternativa pro PTES s Braytonovým cyklem, protože Braytonův cyklus používá velké rezervoáry, což vede k větším ztrátám. [3] První takový návrh předložil Mercangöz, jehož model upravil Morandin (obrázek 11). Ten nejprve zkoumal ukládání tepla ve vodě, respektive v roztoku soli NaCl ve vodě. Důvodem, proč byl použit roztok, bylo umožnění ukládání v nižších teplotách, než je 0 °C, v případě Morandinova modelu byla teplota ve studeném rezervoáru -21 °C. [42] Pro tento model bylo použito více rezervoárů, z nichž jeden pár měl výrazně větší kapacitu. Tento pár představoval horký a studený rezervoár, zatímco menší rezervoáry sloužily jako přechody pro vyhlazení teplotních rozdílů při přestupu tepla. Počet těchto rezervoárů se poté odvíjel od operačního tlaku a změn teplot. Jako pracovní médium zde byl použit CO<sub>2</sub>, který měl pro daný cyklus vhodné vlastnosti. Morandinův model dosahoval účinnosti okolo 60 %. [3] [41]

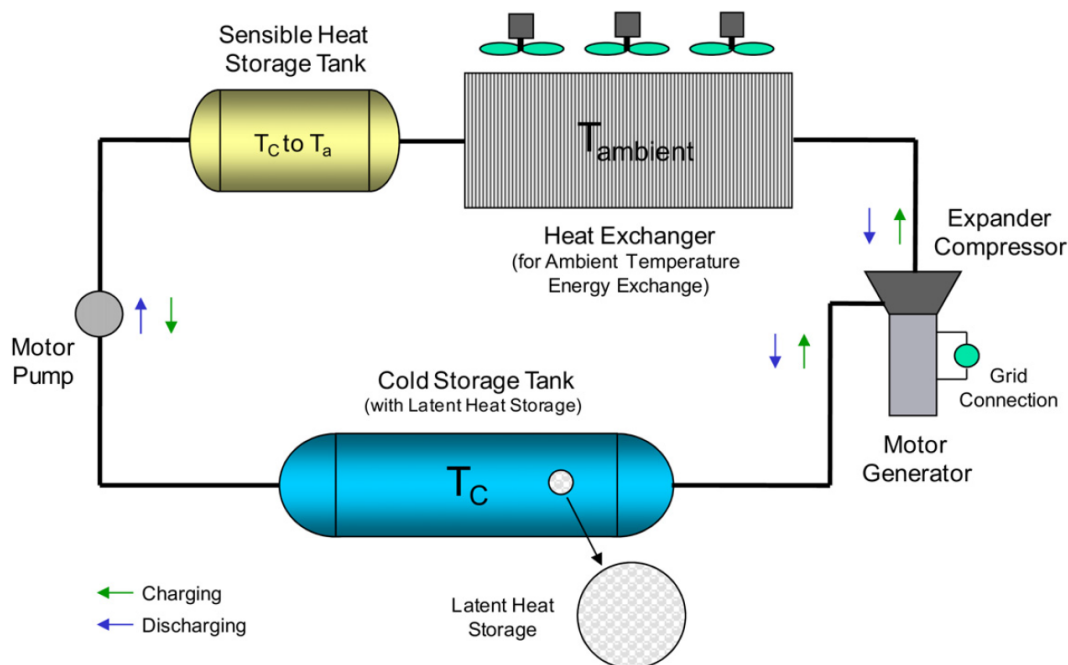


Obrázek 11: Základní schéma navržené Morandinem [41]

Morandin zároveň uvedl, že pro dosažení maximální účinnosti je třeba zavést k původnímu schématu ještě amoniakový okruh při nabíjení. Zároveň je možné zvýšit účinnost zhruba o dva procentní body, pokud pracovní médium na výstupu z kompresoru ještě ohřejeme na vyšší teplotu. [41]

Morandin provedl výpočty ještě dalších modelů, které se ovšem neosvědčily a účinnost u nich buď poklesla, nebo zůstala takřka nezměněná za cenu složitější a nákladnější konstrukce, proto nemá význam se jimi v této práci zabývat. [41] [41]

Inovativní modifikaci systému předvedl na svém modelu Peterson. Ten vytvořil takzvaný Thermally Integrated PTES (TIPTES) (obrázek 12). Tento model využíval při nabíjení kromě elektrické energie také energii tepelnou, čímž zvýšil účinnost využití elektrické energie. [43] Více o tomto systému v následující kapitole. [43]



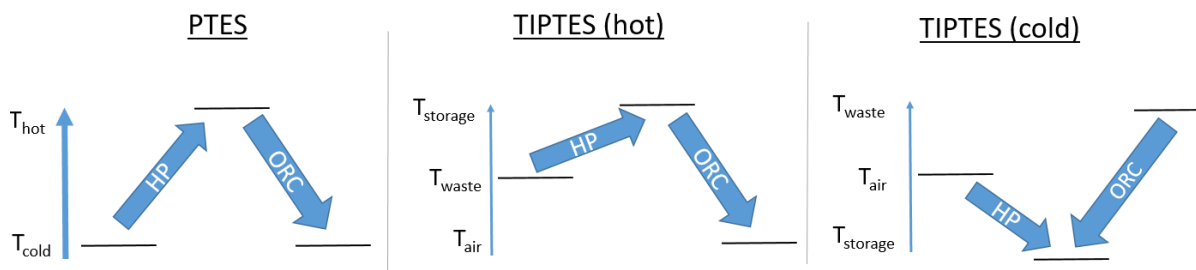
Obrázek 12: Schéma Petersonova modelu [43]

V jeho modelu je horký rezervoár stále naplněn materiálem skladujícím citelné teplo jako u většiny ostatních systémů, ale studený je tentokrát naplněn materiálem skladujícím latentní teplo, v tomto případě se jedná o ethylen glykol. Jako pracovní médium byl v tomto systému využit propan, ten je na začátku cyklu v tekutém stavu, načež se pomocí tepla vypařuje a stává se z něj plyn, který následně přechází do kompresoru a dále pokračuje cyklus obdobným způsobem, jaký byl popsán již u předchozích systémů. [43]

Co se týče studeného rezervoáru, je zde latentní materiál oddělen od pracovního média, aby nedocházelo k mísení. Jeho systém by teoreticky dosahoval výsledné účinnosti okolo 50–60 % při zahrnutí všech ztrát. [3] [43]

### 3.2.1. Technologie TIPTES

Thermally Integrated Pumped Thermal energy storage (zkráceně TIPTES) označuje PTES systém, který jako vstupní energii nevyužívá pouze elektřinu, ale také teplo (zpravidla odpadní teplo). Účinnost systému se totiž vyjadřuje jako podíl elektřiny získané při vybití uložiště vůči elektřině využitě k nabití, proto je hlavním faktorem rozdíl teplot mezi vybitým a nabitým uložištěm. Odpadní teplo se proto využívá dvěma způsoby. Prvním způsobem je zvýšení teploty tohoto odpadního tepla, což způsobí práci s větším teplotním rozdílem a tím zvýší elektřinu získanou při vybití. Druhým způsobem je ukládání energie v teplotě nižší, než je teplota okolí. Pro názornost je uveden obrázek 13, který ukazuje porovnání obou způsobů s normálním PTES bez využití odpadního tepla. [40] [43]



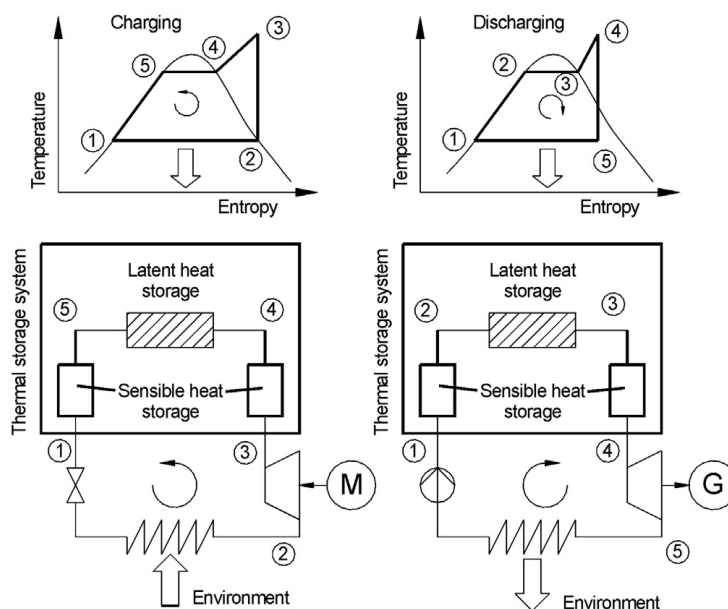
Obrázek 13: Porovnání klasického PTES systému s oběma typy PTES využívajícími odpadní tepla [40]

Oba způsoby využití odpadního tepla lze zužitkovat v jednom systému a výsledná účinnost pak může teoreticky dosahovat i hodnot vyšších než 100 %. To je samozřejmě způsobeno faktem, že odpadní teplo se nepočítá do energie potřebné k nabití, hodnota pouze značí, že při vybití se získalo více elektřiny, než kolik se využilo k pohonu kompresoru při nabíjení. [40] I přesto, že teoreticky lze takové účinnosti dosáhnout, výsledná účinnost se vlivem různých ztrát sníží, to lze vidět v systému CHEST, kterému je věnována následující část práce.

### 3.2.2. Technologie CHEST

CHEST je anglická zkratka pro „Compressed Heat Energy Storage“ aneb ukládání energie ve stlačeném teple. Tento model vytvořil W. D. Steinmann a jedná se o obdobu PTES založené na Rankinově cyklu. Steinmann tvrdil, že modely založené na Rankinově cyklu nepočítají s dostupností potřebných strojů. Například pro dosažení vyšších teplot v horkém rezervoáru jsou potřeba dostatečně silné kompresory, které ale nejsou snadno dostupné. Steinmann se tedy rozhodl vytvořit model, který ukládá teplo v nižších teplotách a jako pracovní médium používá vodu. [44] [44]

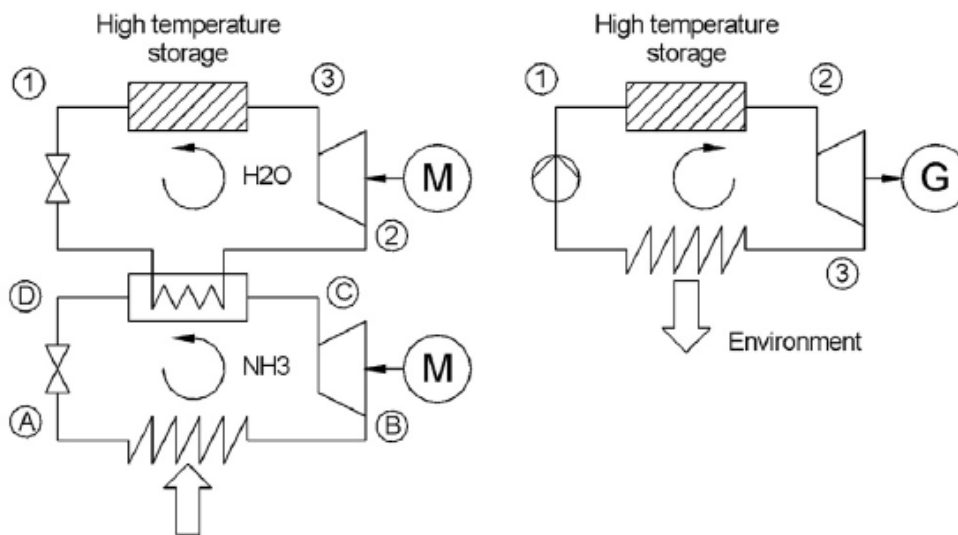
Během nabíjení se voda o nízkém tlaku vypařuje díky odběru tepla ze studeného zdroje tepla, následně se pára stlačuje v kompresoru a poté svou energii přenáší do horkého rezervoáru. Tam pára kondenzuje a kondenzát se ochlazuje pod svou saturační teplotu. Při vybíjení vytváří teplo z rezervoáru páru, která pohání turbínu, a po expanzi pára opět kondenzuje. Schéma modelu a T-s diagram tohoto procesu jsou znázorněny na obrázku 14. [44] [44]



Obrázek 14: Schéma a T-s diagram modelu CHEST [44]

Použití Rankinova cyklu přineslo možnou alternativu pro studený rezervoár. Pokud je kondenzační teplota nad teplotou okolí, pak lze teplo vzniklé kondenzací uvolnit do okolí a při nabíjení se zase teplo z okolí využije k výrobě nízkotlaké páry. [44]

Steinmann ke svému modelu (obrázek 15) také přidal, podobně jako Morandin, čpavkový/amoniakový cyklus. Ten byl použit pouze při nabíjení, a jak název napovídá, používá jako pracovní médium amoniak. Důvodem použití byla kompenzace za nevýhodu vody jako pracovního média a (jejího vysokého objemu v nízkoteplotní části oběhu). Proto se pro tuto část použil amoniakový cyklus, který následně předává své teplo do vysokoteplotní části a vytváří vodní páru, která pokračuje v oběhu vysvětleném výše. Důvodem, proč se používá amoniakový cyklus pouze jako přídatný, a ne jako hlavní, je nízká teplota, které amoniak v tomto cyklu dosahuje. Na výstupu z kompresoru má amoniak teplotu necelých 100 °C a při předávání svého tepla vytváří nasycenou páru o teplotě 75 °C. [44]



Obrázek 15: Schéma připojení amoniakového cyklu při nabíjení (vlevo). Při vybíjení (vpravo) se amoniakový cyklus nevyužívá. [44]

Steinmannův model pak dosahoval účinnosti téměř 73 %, nicméně v této hodnotě nejsou zahrnuty ztráty v potrubí, rezervoárech a únik do okolí. [44]

Druhou možností, která byla navržena, je použití odpadního tepla jako zdroje pro vytvoření nízkoteplotní nasycené páry. Tímto způsobem opadne potřeba použití amoniakového cyklu, čímž se sníží složitost systému a také náklady. Účinnost by pak mohla dosahovat teoretické hodnoty až 94 %. [44]

## 4. PRACOVNÍ A ÚLOŽNÁ MÉDIA

Důležitým tématem, kterým je třeba se zabývat při návrhu PTES, jsou také pracovní média, která slouží k přenosu tepla a dodávají/odebírají energii do/z rezervoárů. Pro různé tepelné oběhy jsou vhodná jiná pracovní média a během vývoje zkoumali vědci vlivy jednotlivých médií na účinnost a ekonomiku oběhu. Vznikly také práce se zaměřením na porovnání různých médií, které splňují směrnice EU, hlavně co se týče dopadů na životní prostředí. K posouzení se používá GWP, což je anglické označení pro potenciál globálního oteplování. Některá média tak byla rovnou vyloučena a ze zbylých byla vybrána ta nejvýhodnější. [45]

### 4.1. Pracovní média pro Braytonův cyklus

#### 4.1.1. Argon

Prvním zmíněným plynem, který se používá jako pracovní médium, je argon. Ten se používá v PTES založených na Braytonově cyklu. Jeho výhodami jsou nereaktivnost a fakt, že se jedná o jednoatomový plyn. Má tudíž vyšší hodnotu Poissonovy konstanty, což podle teorie vede k vyšší účinnosti. [25]

#### 4.1.2. Vzduch

Obyčejný vzduch použil ve svém modelu PTES Alberto Benato, který usoudil, že argon je příliš nákladný a že vzduch bude sloužit jako vhodná, a hlavně velice levná náhrada. Dle jeho výpočtů, které pro svůj model provedl, je možné dosáhnout takřka stejné účinnosti jako u předchozích modelů, které navrhli Desrués nebo McTigue. Hodnota se liší zhruba o pouhých 1–1.5 %. [34]

### 4.2. Pracovní média pro Rankinův cyklus

Přestože je nejčastějším médiem pro Rankinův cyklus v PTES oxid uhličitý, objevily se i modely, které používají jiná pracovní média. Koen, Antuez a White zkoumali různá média pro použití v PTES a následně publikovali své výsledky, z nichž budou v následující kapitole představeny ty nejslibnější. [46]

#### 4.2.1. Oxid uhličitý

CO<sub>2</sub>, který má kódové označení R744, má dobré termodynamické vlastnosti, které jsou pro použití v PTES nejpodstatnější. Dále se také jedná o přírodní, netoxický a nehořlavý materiál, má nízký potenciál globálního oteplování (GWP = 1) a potenciál poškozování ozonové vrstvy (ODP = 0), to z něj činí velice ekologický a bezpečný plyn, který je pro konstrukce výhodný. Zároveň je snadno dostupný a levný, proto jeho použití sníží náklady.

Oxid uhličitý je také nekorozivní, tudíž nemá z dlouhodobého hlediska takový vliv na systém, ovšem je nutné použití plynu s vysokou čistotou, protože i malý nárůst vlhkosti by mohl mít negativní až destruktivní účinky na systém. [47]

#### **4.2.2. R1311**

Označení R1311 reprezentuje trifluorjodmethan ( $\text{CF}_3\text{I}$ ). Při porovnávání s jinými plyny bylo zjištěno, že právě tento plyn dosahuje nejvyšší účinnosti, je-li jeho maximální teplota v oběhu  $212\text{ }^\circ\text{C}$ . Zároveň má dobrý poměr práce a tepla, průměrnou energetickou hustotu a oproti oxidu uhličitému není tolik ovlivňován teplotou prostředí (resp. teplotou na vstupu do kompresoru). [46]

#### **4.2.3. R161**

Značení reprezentuje fluorethan ( $\text{C}_2\text{FH}_5$ ). Ten při testování dosáhl podobné účinnosti jako R1311 při maximální teplotě  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Nicméně pro použití je méně vhodný, protože na rozdíl od R1311 je tento plyn hořlavý. [46]

#### **4.2.4. Propan**

Jako další médium, které bylo vyzkoušeno pro konstrukci transkritických PTES, je propan. Propan byl využit v modelu, který předložil Peterson. [43]

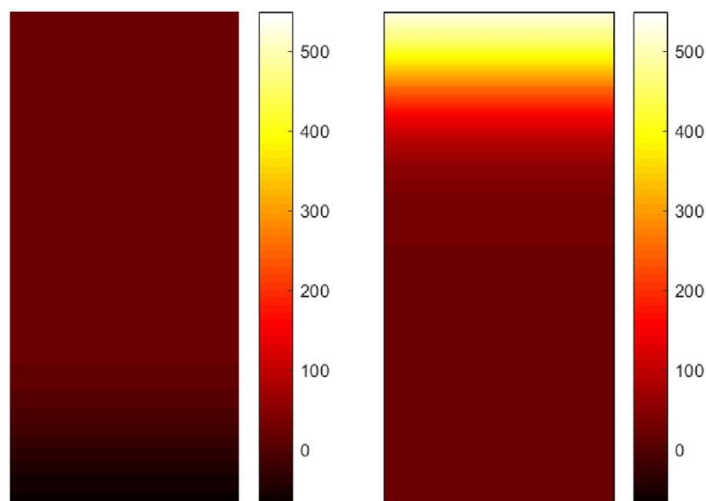
### **4.3. Materiál náplně rezervoáru**

Pojmem materiál rezervoáru je myšlen materiál, který se používá uvnitř rezervoáru a pracovní médium mu při nabíjení předává teplo. Existují 2 skupiny materiálů. Materiály, které ukládají energii ve formě citelného tepla, a materiály, které ukládají energii ve formě latentního tepla. Toto rozdělení bylo již nastíněno v předchozích kapitolách, nicméně pouze okrajově.

#### **4.3.1. Materiály využívající citelné teplo**

Citelné materiály zůstávají v pevném skupenství a s teplem, které přebírají od pracovního média, roste pouze jejich teplota. Toto je nejčastěji používaný způsob ukládání v PTES. Anglicky se metoda ukládání citelného materiálu nazývá „packed bed“, jedná se o homogenní vrstvu materiálu, mezi kterou proudí teplosměnná látka a postupně ji ohřívá. Tento postup lze vidět na obrázku 16, který odpovídá postupu tepla v modelu, který navrhl Benato. [34]





Obrázek 16: Schéma změny teploty v jednotlivých vrstvách rezervoárů. Vlevo studený rezervoár, vpravo horký rezervoár [34]

Jako sensiblní materiály se obvykle používají levné látky, nejčastěji štěrk. Ale zkoumalo se i použití jiných, dražších materiálů. Z těchto materiálů vypadá nejslibněji použití mědi, která má nejvyšší tepelnou hustotu z testovaných materiálů, ale zároveň se jedná o nejdražší materiál. Při výběru materiálu ovšem záleží na výkonu, který je potřeba dodávat do sítě, některé materiály mají pomalejší vybíjení, a tudíž nižší výkon. [38]

#### 4.3.2. Latentní materiály

Latentní materiály fungují na principu skupenského tepla, kdy materiál během přijímání/odevzdávání tepla mění své skupenství. Některé materiály se mění mezi pevným a kapalným skupenstvím a jiné zase mezi kapalným a plynným. Ve chvíli, kdy materiál začíná tát (případně se vypařovat), pak s přibíráním dalšího tepla nedochází k nárůstu teploty, ale k postupné změně skupenství až do chvíle, kdy se přemění veškerý materiál uvnitř rezervoáru. Poté začíná teplota opět růst. Rezervoáry s latentními materiály pak využívají tuto skupenskou přeměnu k uložení energie. Při vybíjení se pak proces obrátí, nejprve se materiál ochladí, pak se přemění na původní skupenství, a nakonec se opět ochladí na původní teplotu. Tento postup platí, pokud se elektřina ukládá tak, že se rezervoár ohřívá. Pro metody, kdy se elektřina ukládá „v chladu“, funguje princip obráceně (materiál při nabíjení zamrzá/kondenzuje a při vybíjení taje/vypařuje se). [48]

Existuje velké množství různých organických a anorganických materiálů, které se dají použít pro ukládání tepla, [49] nicméně pro použití v PTES bylo vyzkoušeno jen omezené množství. Mezi latentní materiály použité v PTES patří například směs dusičnanu draselného a dusičnanu lithného ze Steinmannova modelu nebo ethylen glykol, který ve svém modelu použil Peterson jako náplň studeného rezervoáru. [50] V druhém případě je latentní materiál uložen v jakýchsi kapslích, které zabraňují, aby se smíchal s pracovním médiem. [43]

## 5. NAVRHOVÁNÍ SYSTÉMU

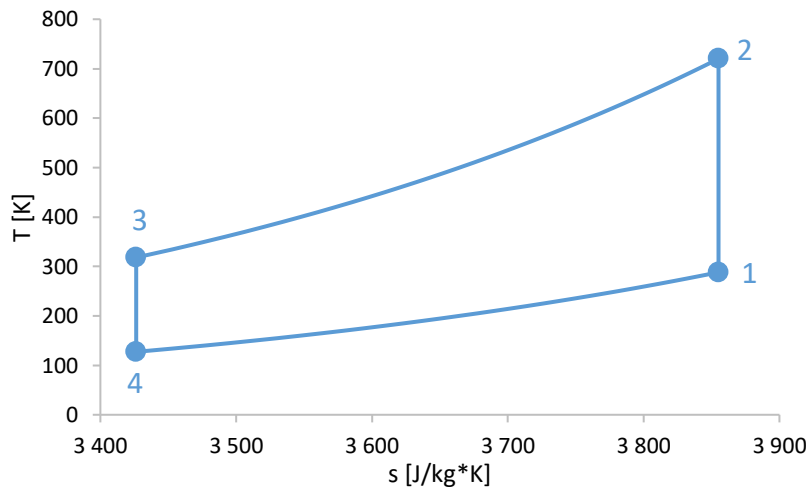
### 5.1. Velikost rezervoárů

Jednou z důležitých vlastností uložišť, která byla již dříve zmíněna, je hustota, se kterou přímo souvisí velikost daných uložišť. S vyšší hustotou můžeme dosáhnout uložení stejného množství energie v nižším objemu.

Pro výpočet velikosti uložišť, resp. „nádrží“, do kterých je ukládáno teplo/chlad, lze použít kalorimetrickou rovnici ve tvaru [39]:

$$E = m_H c_{pH} (T_2 - T_3) - m_H c_{pH} (T_1 - T_4) \quad (1)$$

kde  $m$  značí hmotnost úložného materiálu a  $c_p$  měrnou tepelnou kapacitu materiálu (uvažuje se konstantní, proto je tento vzorec nevhodný pro materiály, u kterých jsou s teplotou velké změny  $c_p$ ). Horní indexy označují horký (hot) a studený (cold) rezervoár. Rozdíl teplot  $T$  pak značí rozdíl mezi počátečním a koncovým stavem, indexy odpovídají jednotlivým stavům Joule-Braytonova cyklu, dle T-s diagramu na obrázku 17. [34]



Obrázek 17: T-s diagram Joule-Braytonova cyklu

Pro získání objemu rezervoáru pak už jen vyjádříme hmotnost jako součin hustoty a objemu, dostáváme tedy rovnici:

$$E = V_H \rho_H c_{pH} (T_2 - T_3) - V_S \rho_S c_{pS} (T_1 - T_4) \quad (2)$$

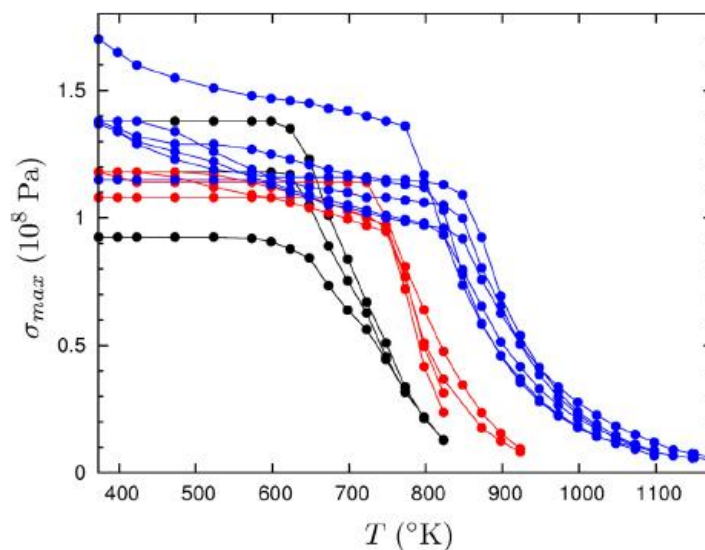
Hustoty jsou v tomto vzorci reprezentovány nejnižší hodnotou, které v rezervoáru dosahují (na vstupu do kompresoru a výstupu z expandéru). [39] Samozřejmě tato hodnota nemůže být dokonale přesná, jelikož se musí zahrnout i vlastnosti jako poréznost materiálu.

Podobně jako u rezervoárů lze vypočítat energii, tak u zařízení pro kompresi a expanzi pracovního média (argon) je možné vypočítat příkon zařízení ze vzorce: [39]

$$\dot{W} = \dot{m} [(h_2 - h_1) - (h_3 - h_4)] \quad (3)$$

## 5.2. Materiál stěn rezervoáru

Vzhledem k tomu, že při nabíjení mohou teplota a tlak uvnitř rezervoáru dosáhnout vysokých hodnot (obzvlášť u PTES s Braytonovým cyklem), je třeba vytvořit rezervoáry z materiálů, které dokážou těmto tlakům a teplotám odolat v dlouhodobém měřítku (až desítky let). U obyčejných ocelí se při opakovaném zahřívání na vysoké teploty začíná objevovat creep, tečení materiálu, kdy dochází k nárůstu plastické deformace. [51] Creep by poté způsoboval problémy při teplotách přesahujících teploty 400 °C. Proto se pro rezervoáry, které ukládají teplo po delší dobu, používají legované oceli. Nízkolegovaná ocel zvýší maximální teplotu, ovšem pro maximální snížení rizika creepu je potřeba použít vysokolegované oceli s příměsími niklu a chromu. [52] Vysokolegovaná ocel je tedy pro rezervoáry nejvýhodnější, ale také se to projevuje na její ceně. Porovnání tří zmíněných skupin ocelí lze vidět na obrázku 18.



Obrázek 18: Závislost maximálního povoleného napětí na teplotě pro různé typy ocelí. Černá – nelegovaná uhlíková ocel, červená – nízkolegovaná ocel, modrá – legovaná ocel [52].

## 5.3. Účinnost

Vlastností, na jejíž zlepšení se při vývoji klade největší důraz, je účinnost oběhu (anglicky round-trip efficiency). Ta udává celkovou účinnost systému zahrnující uložení energie a poté opětovné přeměnění na elektřinu. Celý systém PTES je teoreticky určen 3 hodnotami: topným faktorem tepelného čerpadla (Coefficient of Performance = COP), účinností tepelného motoru a účinností uložení.

Topný faktor  $COP$  je určen jako podíl tepla uloženého do rezervoáru  $Q$  a vstupní elektřiny, která čerpadlo pohání  $W_{in}$ . Pro Carnotův oběh lze za teplo  $Q$  a energii  $W_{in}$  dosadit teploty a dostáváme pak následující rovnici:

$$COP = \frac{Q_{\dot{c}}}{W_{in}} = \frac{T_{\dot{c}max}}{T_{\dot{c}max} - T_{\dot{c}min}} \quad (4)$$

kde  $T_{\dot{c}max}$  je teplota na výstupu z čerpadla a  $T_{\dot{c}min}$  je teplota na vstupu do čerpadla.

Účinnost tepelného motoru je dána podílem tepla na vstupu do motoru a výstupní elektřinou z cyklu. Pro Carnotův oběh lze do tohoto vzorce opět dosadit teploty, podobně jako v rovnici 4, a získáme tak vzorec:

$$\eta_{tm} = \frac{W_{out}}{Q_m} = \frac{T_{mmax} - T_{min}}{T_{mmax}} \quad (5)$$

kde  $T_{mmax}$  je teplota na vstupu do motoru a  $T_{min}$  je teplota na výstupu z motoru.

Poslední je účinnost uložení, která je charakterizována poměrem tepla, jež při nabíjení přichází z čerpadla, a tepla, které jde při vybíjení do motoru.

$$\eta_{st} = \frac{Q_m}{Q_{\dot{c}}} \quad (6)$$

Výsledná účinnost cyklu se dá logicky určit jako podíl elektřiny přicházející do systému při nabíjení a elektřiny, která je vracena do systému při vybíjení, nicméně se dá také určit jako součin jednotlivých účinností a topného faktoru.

$$\eta_{vys} = \frac{W_{out}}{W_{in}} = \eta_{tm} \cdot \eta_{st} \cdot COP \quad (7)$$

Za  $\eta_{tm}$  a  $COP$  lze dosadit výše uvedené vzorce, uvažuje-li se, že teplota na vstupu do čerpadla se rovná teplotě na výstupu z motoru a zároveň se teplota na výstupu z čerpadla rovná teplotě na vstupu do motoru. Tím dostáváme pouze 2 různé teploty, které si označíme  $T_H$  a  $T_S$ . Označují teplotu horkého a studeného rezervoáru. Po této úpravě si můžeme napsat upravené vzorce pro  $COP$  a  $\eta_{tm}$ :

$$COP = \frac{T_H}{T_H - T_S} \quad (8)$$

$$\eta_{tm} = \frac{T_H - T_S}{T_H} \quad (9)$$

Jak lze vidět, účinnost motoru je rovna převrácené hodnotě topného faktoru čerpadla, proto po dosazení do rovnice výsledné účinnosti dostaneme rovnici:

$$\eta_{vys} = \eta_{st} \quad (10)$$

Z této poslední rovnice vyplývá, že účinnost Carnotova oběhu může v ideálním případě dosáhnout maximální hodnoty 1 neboli 100 %.

Tyto rovnice však odpovídají ideálnímu Carnotovu cyklu, který je teoretický a nereálný. Neuvažují se ztráty, o kterých pojednává další kapitola.

## 5.4. Ztráty

Z hlediska účinnosti cyklu je pro nás nejdůležitější zaměřit se na ztráty vznikající při jednotlivých částech cyklu a snažit se je snížit, pokud možno, na minimum. Jak uvedl ve své práci McTigue, [39] ztráty lze rozdělit na několik skupin podle jednotlivých částí oběhu. Jedná se tak o ztráty při kompresi a expanzi, tlakové ztráty, tepelné ztráty, tepelné úniky a

další ztráty. Únikům se nevěnuje příliš mnoho pozornosti, protože tyto ztráty jsou způsobené únikem tepla do okolí a dají se dle potřeb snížit. Zbylé ztráty je naopak důležité brát v úvahu, protože nám ovlivňují výslednou účinnost cyklu.

#### 5.4.1. Ztráty při kompresi a expanzi

První místo, kde dochází v cyklu ke ztrátám, je uvnitř kompresoru a expandéru. Tyto ztráty závisí především na kvalitě daného kompresoru/expandéru a jejich schopnosti potlačit ztráty. Jak bylo již dříve uvedeno, pro různé modely se používají různé typy kompresorů a expandérů. Jedním z těchto typů jsou turbo stroje, které mohou dosahovat účinnosti až 90 %. Naopak reciproční stroje dosahují dle dostupných materiálů účinnosti okolo 75–85 %, hodnoty jsou ovšem dány především ztrátou ve válci a tyto účinnosti je možné do budoucna zvýšit. [39]

#### 5.4.2. Tlakové ztráty

Jedná se o ztráty v potrubích, ventilech, výměnících, rezervoárech apod., kde dochází k poklesu tlaku. Ty zapříčiní, že tlak na vstupu do expandéru je nižší než na výstupu z kompresoru (při nulových ztrátách by tyto tlaky byly stejné). Tyto ztráty se v jednotlivých úsecích zapisují ve tvaru poměru ztráty vůči původnímu tlaku [39]:

$$f_p = \frac{\Delta p}{p} \quad (11)$$

Důvodem je fakt, že ztráta tlaku  $\Delta p$  je objektivní pouze tehdy, pokud známe hodnotu původního tlaku  $p$ , v nízkotlaké části oběhu bude mít proto ztráta mnohem větší vliv na účinnost než stejně velká ztráta ve vysokotlaké části.

Ztráty v kompresoru a expandéru se dají odhadnout podle použitého přístroje, ovšem ztráty v ostatních částech závisí na geometrii. [39]

#### 5.4.3. Ztráty poklesem teplot

V rezervoárech se kromě tlakové ztráty vyskytují také ztráty teplotní. Jejich důvodem je fakt, že výměna tepla mezi pracovním médiem a úložným materiálem probíhá na konečném rozdílu teplot. McTigue vycházel ze Schumannova modelu přenosu tepla pro ukládání ve vrstvách materiálu. Schumann ve svém modelu aplikoval Fourierův zákon přestupu tepla. Ten předpokládá jednorozměrný tok a přenos je limitován povrchovou vrstvou materiálu, přičemž odpor vnitřních částic se zanedbává. Přenos tepla v rezervoáru je popsány rovnicemi: [39]

$$\frac{\partial T_g}{\partial z} = \frac{T_s - T_g}{l} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_g - T_s}{\tau} \quad (13)$$

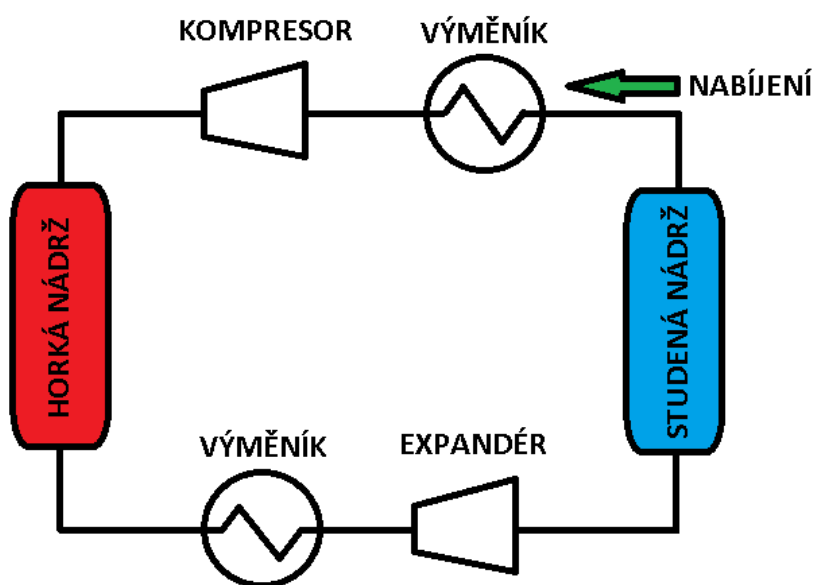
kde teploty  $T_s$  a  $T_g$  označují teploty plynu a pevného materiálu.

## 6. TEORETICKÝ NÁVRH CARNOTOVY BATERIE

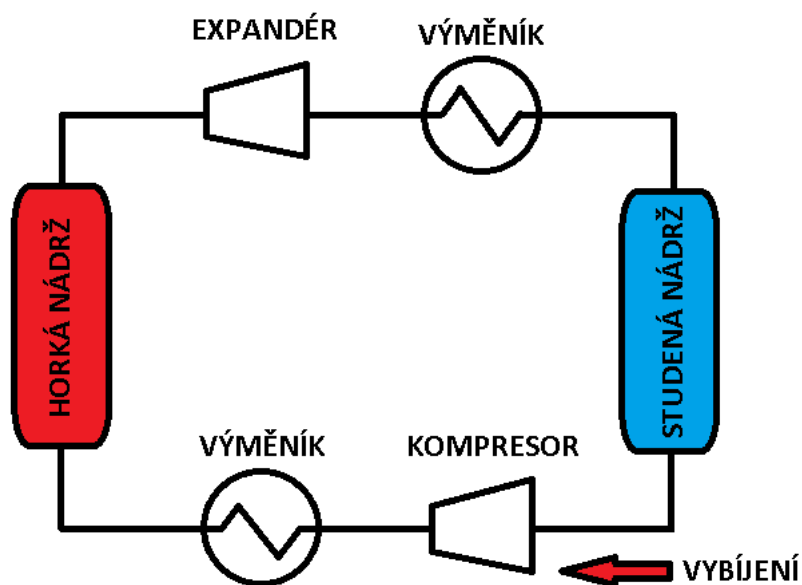
Praktická část této práce bude zaměřena na teoretický návrh jednoduššího modelu PTES. V předchozích kapitolách byly představeny různé druhy PTES založené na 2 různých obězích a využívající různé metody pro zvýšení účinnosti. Pro tento návrh bude volen model s využitím Braytonova cyklu.

### 6.1. Schéma modelu

Navrhovaný model bude obsahovat pouze základní prvky potřebné k vytvoření funkčního PTES systému: horký a studený rezervoár, kompresor a expandér a tepelné výměníky. Nabíjecí oběh je naznačen na obrázku 19 a vybíjecí na obrázku 20.



Obrázek 19: Schéma nabíjecího oběhu navrhovaného PTES systému



Obrázek 20: Schéma vybíjecího oběhu navrhovaného PTES systému

## 6.2. Vstupní parametry

Pro návrh modelu je třeba několik parametrů, které se využijí k výpočtům. Mezi tyto parametry patří především účinnosti jednotlivých součástí, jako je kompresor a expandér, a také teploty, na jakých se systém pohybuje.

V našem modelu je uvažována teplota okolí 20 °C a atmosférický tlak 101,325 kPa. V kompresoru bude pracovní plyn stlačován na tlak 10 barů (1 MPa) a po odvedení svého tepla bude opět expandovat na původní tlak. Kompresor a expandér budeme uvažovat jako adiabatické s účinností 90 % pro oba případy. Shrnutí vstupních parametrů je zobrazeno v tabulce 2.

Tabulka 2: Vstupní parametry pro návrh PTES systému

	<b>Značení</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>
<b>Teplota okolí</b>	$T_0$	293,15	K
<b>Atmosférický tlak</b>	$p_0$	101 325	Pa
<b>Tlak po kompresi</b>	$p_2$	1 000 000	Pa
<b>Účinnost kompresoru</b>	$\eta_{comp}$	90	%
<b>Účinnost expandéru</b>	$\eta_{exp}$	90	%
<b>Teplotní rozdíl</b>	$\Delta T$	5	K

## 6.3. Výběr pracovního média

Pro výběr pracovního média je důležité vzít opět v potaz maximální teploty, kterých bude médium v průběhu cyklu dosahovat. V kapitole 5 bylo uvedeno, že pro Braytonův cyklus se používá jako pracovní médium především argon nebo vzduch. Důvodem, proč nelze pro náš model s Braytonovým cyklem použít plyny, jako je CO<sub>2</sub>, je jeho vysoká kritická teplota, protože pracovní médium v Braytonově cyklu musí zůstat v plynné fázi i v částech cyklu s nejnižší teplotou. [52] U některých plynů může být také limitující nízká stabilita při maximálních teplotách cyklu. [52]

Mezi média, která přichází v úvahu pro tento model, patří argon, vzduch a pro porovnání se vzduchem si uvedeme ještě čistý dusík. Výpočty budou provedeny pro všechna tato média a vybere se z nich to nejvhodnější.

## 6.4. Nabíjení – ideální

Nejprve si určíme teoreticky vratný oběh, kdy počítáme s adiabatickou kompresí a expanzí (entropie = konstantní) a izobarickým přívodem a odvodem tepla do/z rezervoárů.

### 6.4.1. Ideální komprese

Pro návrh modelu uvažujeme kompresi i expanzi adiabatické. Pomocí knihovny CoolProp vypočítáme výsledné teploty pracovních médií adiabatické komprese z atmosférického tlaku  $p_0 = p_1$  na tlak  $p_2$ . Výsledky lze vidět v tabulce 3.

Tabulka 3: Porovnání jednotlivých pracovních médií při kompresi v rámci ideálního nabíjecího cyklu

	Argon	Vzduch	Dusík
$p_1$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_1$ [K]	288,15	288,15	288,15
$s$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	3 855,15	3 846,16	6 799,77
$p_2$ [kPa]	1 000	1 000	1 000
$T_2$ [K]	720,09	550,61	551,92
$T_2$ [°C]	446,94	277,46	278,77
$h_1$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	149 717,26	414 374,57	298 853,5366
$h_2$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	374 618,65	681 513,54	575 365,40
$\Delta h_{ideal\ nab.comp}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	224 901,39	267 138,97	276 511,86

Z tabulky vyplývá, že oproti vzduchu a dusíku dosahuje argon nejvyšší teploty, to by znamenalo potřebu využití lepších materiálů pro nádrže. Nicméně i přesto, že je jeho teplota po kompresi nejvyšší ze zkoumaných plynů, dosahuje pouze zhruba 447 °C. Podíváme-li se zpět na obrázek 18, zjistíme, že pro takový systém by stačilo použití nelegované oceli, protože při těchto teplotách nedochází ke creepu, a není proto třeba využití dražších materiálů.

### 6.4.2. Ideální odvod tepla

V další části oběhu předává pracovní médium své teplo materiálu rezervoáru, a to do doby, než se ochladí na teplotu 45 °C (318,15 K). Při tomto přenosu tepla počítáme s konstantním tlakem. Hodnota tepla, kterou pracovní médium předá rezervoáru, se rovná změně entalpie pracovního média. Pomocí CoolProp zjistíme hodnotu entalpie na konci komprese a hodnotu po odevzdání tepla rezervoáru, rozdíl těchto hodnot nám pak určuje předané teplo. Hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 4.



Tabulka 4: Porovnání jednotlivých pracovních médií při nabíjení horké nádrže v rámci ideálního nabíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_2$ [kPa]	1 000	1 000	1 000
$T_2$ [K]	720,09	550,61	551,92
$T_2$ [°C]	446,94	277,46	278,77
$T_3$ [K]	318,15	318,15	318,15
$h_2$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	374 618,65	681 513,54	575 365,40
$h_3$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	163 853,71	442 793,84	328 375,16
$\Delta h_{ideal\ nab.H}$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	-210 764,94	-238 719,70	-246 990,24

### 6.4.3. Ideální expanze

Třetí část cyklu, která následuje po odevzdání tepla rezervoáru, je expanze na původní tlak pracovního média, v našem případě na atmosférický tlak. V této části dosahuje pracovní médium právě nejnižší teploty celého cyklu, je proto důležité pro tento typ PTES, aby plyn zůstal v plynném skupenství. Argon, vzduch i dusík mají bod varu nižší než 100 K a při pohledu na tabulku 5 lze vidět, že argon dosahuje teploty okolo 127 K a vzduch a dusík dosahují téměř stejné teploty, necelých 165 K. Všechny tři plyny proto vyhovují.

Tabulka 5: Porovnání jednotlivých pracovních médií při expanzi v rámci ideálního nabíjecího cyklu

	Argon	Vzduch	Dusík
$p_3$ [kPa]	1 000	1 000	1 000
$T_3$ [K]	293,15	293,15	293,15
$s$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	3 426,37	3 283,49	6218,10
$p_4$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_4$ [K]	127,33	164,77	164,98
$T_4$ [°C]	-145,82	-108,38	-108,17
$h_3$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	163 853,71	442 793,84	328 375,16
$h_4$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	65 386,59	290 191,21	170 407,57
$\Delta h_{ideal nab. exp}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	-98 467,12	-152 602,63	-157 967,59

## 6.5. Nabíjení – reálné

### 6.5.1. Reálná komprese

U ideálního nabíjení byly uvažovány ideální kompresor a expandér, to znamená 100% účinnosti. V reálu ovšem takové kompresory ani expandéry neexistují, a proto byla navržena účinnost 90 % pro oba stroje. Pro dosažení požadovaného tlaku je třeba vynaložit větší množství energie na kompresi, což se projeví změnou rozdílu entalpií mezi body 1 a 2 podle vzorce:

$$\eta_{comp} = \frac{\Delta h_{ideal nab.comp}}{\Delta h_{real nab.comp}} \quad (14)$$

Upravením rovnice lze získat hodnotu reálného rozdílu entalpií a poté se snadno vypočítá entalpie bodu 2 jako:

$$h_2 = h_1 + \Delta h_{real nab.comp} \quad (15)$$

Díky známému tlaku a entalpii bodu 2 se využije CoolProp pro získání ostatních hodnot, především teploty. Shrnutí reálné komprese je zobrazeno v tabulce 6.

Tabulka 6: Porovnání jednotlivých pracovních médií při kompresi v rámci reálného nabíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_1$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_1$ [K]	288,15	288,15	288,15
$s_1$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	3855,15	3846,16	6799,767
$s_2$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	3888,75	3898,73	6854,03
$p_2$ [kPa]	1000	1000	1000
$T_2$ [K]	767,99	578,97	580,60
$T_2$ [°C]	494,84	305,82	307,45
$h_1$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	149 717,26	414 374,57	298 853,5366
$h_2$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	399 607,69	711 195,65	606 088,94
$\Delta h_{real\ nab.comp}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	249 890,43	296 821,08	307 235,40

Jak lze vidět z tabulky, teplota stlačeného plynu se oproti ideálnímu kompresoru zvýšila, stejně tak jako entropie, jelikož reálný kompresor už není izoentropický.

Hodnota změny entalpie  $\Delta h_{nab.comp}$  odpovídá elektrické energii, která se na kompresi spotřebuje.

### 6.5.2. Nabíjení horké nádrže v reálném cyklu

Po stlačení pracovního média v kompresoru předává médium svou tepelnou energii do horké nádrže, tím se nádrž ohřívá a pracovní médium ochlazuje. Zde neuvažujeme pokles tlaku, a předání tepla je tak izobarické.

Nutno podotknout, že teplota stlačeného plynu neodpovídá teplotě, na kterou se ohřeje horká nádrž, a rovněž teplota vybité nádrže neodpovídá teplotě plynu na vstupu do expandéru. Důvodem jsou minimální teplotní rozdíly, které byly určeny na začátku kapitoly. Jelikož zvolená teplota vybité horké nádrže odpovídá 40 °C, pracovní plyn se ochladí maximálně na teplotu 45 °C, stejně tak nádrž se ohřeje maximálně na teplotu o 5 °C nižší než teploty  $T_2$  z tabulky 7.

Tabulka 7: Porovnání jednotlivých pracovních médií při nabíjení horké nádrže v rámci reálného nabíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_2$ [kPa]	1000	1000	1000
$T_2$ [K]	767,99	578,97	580,60
$T_2$ [°C]	494,84	305,82	307,45
$T_3$ [K]	318,15	318,15	318,15
$h_2$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	399 607,69	711 195,65	606 088,94
$h_3$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	163 853,71	442 793,84	328 375,1578
$\Delta h_{real\ nab.H}$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	-235 753,99	-268 401,81	-277 713,7775

Hodnota  $\Delta h_{nab.H}$  odpovídá tepelné energii, kterou pracovní plyn předá do horké nádrže, záporná hodnota značí pokles vnitřní energie pracovního plynu.

### 6.5.3. Reálná expanze

Podobně jako u komprese i u expanze se musí počítat s účinností, která se projeví ve změně rozdílu entalpií, ovšem zde se rozdíl entalpií sníží podle vzorce:

$$\eta_{exp} = \frac{\Delta h_{real\ nab.exp}}{\Delta h_{ideal\ nab.exp}} \quad (16)$$

Po upravení rovnice a získání hodnoty reálného rozdílu entalpií se poté entalpie bodu 4 vypočítá obdobně jako u komprese, a sice:

$$h_4 = h_3 + \Delta h_{real\ nab.exp} \quad (17)$$

Stav před a po expanzi je zobrazen v tabulce 8.

Tabulka 8: Porovnání jednotlivých pracovních médií při expanzi v rámci reálného nabíjecího cyklu

	Argon	Vzduch	Dusík
$p_3$ [kPa]	1000	1000	1000
$T_3$ [K]	293,15	293,15	293,15
$s_3$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	3 426,37	3 283,49	6 218,10
$s_4$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	3 498,57	3 372,11	6 309,71
$p_4$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_4$ [K]	145,90	179,89	180,09
$T_4$ [°C]	-127,25	-93,26	-93,06
$h_3$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	163 853,71	442 793,84	328 375,1578
$h_4$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	75 233,30	305 451,47	186 204,32
$\Delta h_{real\ nab.exp}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	-88 620,40	-137 342,37	-142 170,83

Obdobně jako u kompresoru, kde hodnota změny entalpií značila elektřinu spotřebovanou na stlačení plynu, tak i u expandéru značí záporná hodnota rozdílu entalpií  $\Delta h_{real\ nab.exp}$  elektřinu, kterou expanzí získáme. Součtem těchto 2 hodnot dostáváme celkovou měrnou elektrickou energii, která se do systému dodává při nabíjení:

$$w_{in} = \Delta h_{real\ nab.comp} + \Delta h_{real\ nab.exp} \quad (18)$$

#### 6.5.4. Reálné nabíjení studené nádrže

Oproti části s horkou nádrží chladné nádrží neodevzdává pracovní plyn své teplo, nýbrž svůj „chlad“, resp. teplo z nádrže odebírá, čímž se sám ohřívá a obsah nádrže ochlazuje. Podobně jako u horké nádrže i zde platí pravidlo teplotních rozdílů, nicméně vzhledem k opačnému směru přechodu tepla (z nádrže do pracovního plynu, oproti horké nádrži, kde plyn předával teplo nádrži) se nádrž ochladí na hodnotu o 5 °C vyšší, než byla teplota pracovního plynu na výstupu z expandéru. Podobně pak teplota pracovního plynu stoupne pouze na 15 °C, přestože teplota vybité studené nádrže je 20 °C (s tímto už bylo na začátku kapitoly počítáno při volení teploty na vstupu do kompresoru) (tabulka 9).

Tabulka 9: Porovnání jednotlivých pracovních médií při nabíjení studené nádrže v rámci reálného nabíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_4$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_4$ [K]	145,90	179,89	180,09
$T_4$ [°C]	-127,25	-93,26	-93,06
$T_1$ [K]	288,15	288,15	288,15
$h_4$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	75 233,30	305 451,47	186 204,32
$h_1$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	149 717,26	414 374,57	298 853,5366
$\Delta h_{real\ nab.s}$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	74 483,96	108 923,10	112 649,21

Hodnota  $\Delta h_{nab.s}$  zde ukazuje množství chladu, které nádrž přijme. Porovnáme-li hodnotu  $h_1$  z kapitoly o kompresi a z této kapitoly, lze vidět, že se hodnoty rovnají, a proto se může tímto způsobem cyklus opakovat do plného nabití obou nádrží.

## 6.6. Ideální vybíjení

Proces vybíjení PTES je o něco komplikovanější než nabíjecí proces, což bude možné vidět na konci kapitoly, nicméně před výpočtem reálného vybíjení je vhodné nejprve navrhnout ideální proces, kdy se nebudou uvažovat účinnosti komprese a expanze. Avšak hodnoty nabitých nádrží odpovídají těm po procesu reálného nabíjení, tudíž vyšší teploty horkého i studeného rezervoáru.

### 6.6.1. Vybíjení studené nádrže

Jelikož teplota vybité studené nádrže byla zvolena 20 °C neboli 293,15 K, je třeba volit teplotu pracovního plynu na vstupu o teplotní rozdíl vyšší, aby se nádrž mohla kompletně vybit. Proto byla teplota  $T_1$  v tabulce 10 zvolena 298,15 K. Zároveň se pracovní plyn nedokáže ochladit na teplotu nabité studené nádrže, proto  $T_2$  odpovídá hodnotě o 5 K vyšší.

Tabulka 10: Porovnání jednotlivých pracovních médií při vybíjení studené nádrže v rámci ideálního vybíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_1$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_1$ [K]	298,15	298,15	298,15
$T_2$ [K]	155,90	189,89	190,09
$T_2$ [°C]	-117,25	-83,26	-83,06
$h_1$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	154 933,34	424 436,04	309 266,94
$h_2$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	80 509,59	315 529,18	196 649,05
$\Delta h_{ideal\ vyb.S}$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	-74 423,45	108 906,87	-112 617,90

### 6.6.2. Ideální komprese

Nejkomplikovanější částí při návrhu vybíjení je komprese, jelikož teplota po kompresi musí odpovídat hodnotě minimálně o teplotní rozdíl 5 K nižší, než je hodnota vybité horké nádrže, aby se zajistilo kompletní vybití nádrže. Musíme ovšem uvažovat, že této teploty chceme dosáhnout až při reálné kompresi, protože stejně jako u nabíjení se při reálné kompresi zvýší teplota více než u ideální. Teploty  $T_3$  v tabulce 11 byly voleny tak, aby při reálné kompresi na stejný tlak dosahovaly hodnoty 308,15 K (35 °C).

Tabulka 11: Porovnání jednotlivých pracovních médií při kompresi v rámci ideálního vybíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_2$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_2$ [K]	155,90	189,89	190,09
$T_2$ [°C]	-117,25	-83,26	-83,06
$s$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	3533,55	3426,62	6366,16
$p_3$ [kPa]	491,122	478,565	478,354
$T_3$ [K]	293,15	296,48	296,48
$h_2$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	80 509,59	315 529,18	196 649,05
$h_3$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	151 558,16	421 883,05	306 676,95
$\Delta h_{ideal\ vyb.comp}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	71 048,57	106 353,87	110 027,91

### 6.6.3. Vybíjení horké nádrže

Vybíjení horké nádrže funguje obdobně jako u studené nádrže s tím rozdílem, že teplo jde z nádrže do pracovního plynu. Nádrž se tak dostane na svou původní teplotu a tím se vybije. Pracovní plyn se ohřeje na teplotu nabitě horké nádrže sníženou o teplotní rozdíl (tabulka 12).

Tabulka 12: Porovnání jednotlivých pracovních médií při vybíjení horké nádrže v rámci ideálního vybíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_3$ [kPa]	491,122	478,565	478,354
$T_3$ [K]	293,15	296,48	296,48
$T_4$ [K]	757,99	568,97	570,60
$T_4$ [°C]	484,84	295,82	297,45
$h_3$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	151 558,16	421 883,05	306 676,95
$h_4$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	394 392,14	700 825,01	595 414,43
$\Delta h_{ideal\ vyb.H}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	242 833,99	278 941,96	288 737,48



### 6.6.4. Ideální expanze

Předposledním krokem je expanze na původní atmosférický tlak. Ta je zobrazena v tabulce 13.

Tabulka 13: Porovnání jednotlivých pracovních médií při expanzi v rámci ideálního vybíjecího cyklu

	Argon	Vzduch	Dusík
$p_4$ [kPa]	491,122	478,565	478,354
$T_4$ [K]	757,99	568,97	570,60
$T_4$ [°C]	484,84	295,82	297,45
$s$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	4 030,19	4 092,19	7 055,01
$p_{1'}$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_{1'}$ [K]	403,14	368,02	368,14
$h_4$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	394 392,14	700 825,01	595 414,43
$h_{1'}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	209 653,26	494 881,60	182 196,91
$\Delta h_{ideal\ vyb.exp}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	-184 738,88	-205 943,42	-213 217,52

Jelikož se, na rozdíl od nabíjecího cyklu, u vybíjení teplota a entalpie bodu 1 nerovná stejné hodnotě na začátku a na konci cyklu, je třeba zavést bod 1'. Je možné si povšimnout, že:

$$T_{1'} > T_1 \quad (19)$$

$$h_{1'} > h_1 \quad (20)$$

Vzhledem k tomu, že v tomto modelu neuvažujeme rekuperaci, je třeba po expanzi přebytečné teplo vypustit do atmosféry, jelikož nemáme možnost, jak ho využít. Vypuštěním tohoto tepla se z bodu 1' dostáváme do bodu 1 a cyklus se může opakovat.

## 6.7. Reálné vybíjení

### 6.7.1. Vybíjení studené nádrže

Jelikož je vybíjení studené nádrže prvním krokem vybíjecího cyklu, bude totožné jak pro ideální, tak pro reálný oběh. Důvodem je fakt, že teplotní rozdíly na uložistích jsme uvažovali i u ideálního cyklu, reálný se liší pouze uvažováním účinností kompresoru a expandéru. Není proto třeba uvádět tabulku hodnot, jelikož odpovídá hodnotám z tabulky 10.

### 6.7.2. Reálná komprese

Obdobně jako u reálného nabíjení, tak i u vybíjení musíme u komprese uvažovat účinnost kompresoru ze vzorce:

$$\eta_{comp} = \frac{\Delta h_{ideal\,vyb.comp}}{\Delta h_{real\,vyb.comp}} \quad (21)$$

Entalpii bodu 2 pak získáme jako:

$$h_2 = h_1 + \Delta h_{real\,vyb.comp} \quad (22)$$

Teplota, které musí plyn po kompresi dosáhnout, odpovídá hodnotě 308,15 K (35 °C), proto jsme v kapitole 6.8.2 navrhli takový tlak  $p_3$ , abychom požadované teploty dosáhli v tabulce 14.

Tabulka 14: Porovnání jednotlivých pracovních médií při kompresi v rámci reálného vybíjecího cyklu

	Argon	Vzduch	Dusík
$p_2$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_2$ [K]	155,90	189,89	190,09
$T_2$ [°C]	-117,25	-83,26	-83,06
$s$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	3533,55	3426,62	6366,16
$p_3$ [kPa]	491,122	478,565	478,354
$T_3$ [K]	308,15	308,15	308,15
$h_2$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	80 509,59	315 529,18	196 649,05
$h_3$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	159 452,44	433 700,15	318 902,28
$\Delta h_{real\,vyb.comp}$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	78 942,85	118 170,97	122 253,23

Hodnota  $\Delta h_{real\,vyb.comp}$  odpovídá elektrické spotřebované na kompresi.

### 6.7.3. Vybíjení horké nádrže

Při vybíjení horké nádrže se teplo přenáší z nádrže do plynu, čímž se nádrž vrátí do svého vybitého stavu a plyn se ohřeje na teplotu nabitě nádrže sníženou o teplotní rozdíl. (tabulka 15)

Tabulka 15: Porovnání jednotlivých pracovních médií při vybíjení horké nádrže v rámci reálného vybíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_3$ [kPa]	491,122	478,565	478,354
$T_3$ [K]	308,15	308,15	308,15
$T_4$ [K]	757,99	568,97	570,60
$T_4$ [°C]	484,84	295,82	297,45
$h_3$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	159 452,44	433 700,15	318 902,28
$h_4$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	394 392,14	700 825,01	595 414,43
$\Delta h_{real\ vyb.H}$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	234 939,70	267 124,87	276 512,16

Hodnota  $\Delta h_{real\ vyb.H}$  pak odpovídá teplu, které získáme z uložičte, ovšem neodpovídá hodnotě energie, kterou z vybíjecího cyklu získáme, tomuto tématu se bude věnovat jedna z následujících kapitol.

#### 6.7.4. Reálná expanze

Posledním krokem reálného vybíjecího cyklu je expanze, zobrazená v tabulce 16.

Tabulka 16: Porovnání jednotlivých pracovních médií při expanzi v rámci reálného vybíjecího cyklu

	<b>Argon</b>	<b>Vzduch</b>	<b>Dusík</b>
$p_4$ [kPa]	491,122	478,565	478,354
$T_4$ [K]	757,99	568,97	570,60
$T_4$ [°C]	484,84	295,82	297,45
$s_4$ $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	4 030,19	4 092,19	7 055,01
$s_{1'}$ $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	4 074,11	4 147,21	7 111,38
$p_{1'}$ [kPa]	101,325	101,325	101,325
$T_{1'}$ [K]	438,61	388,38	388,58
$h_4$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	394 392,14	700 825,01	595 414,43
$h_{1'}$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	228 127,15	515 475,94	403 518,66
$\Delta h_{real\ vyb.exp}$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$	-166 264,99	-185 349,08	-191 895,77

Porovnáme-li tabulku 16 s tabulkou 13, všimneme si vyšší teploty  $T_{1r}$ , což značí vyšší teplotu, o kterou musíme plyn ochladit, a tudíž ještě vyšší podíl tepla vypuštěného do atmosféry.

## 6.8. Účinnost reálného cyklu

Abychom určili účinnost reálného cyklu, potřebujeme využít několik vzorců, do kterých dosadíme hodnoty cyklu.

Účinnost tepelného oběhu získáme podílem práce cyklu a energií do cyklu dodanou. Obecně můžeme účinnost PTES určit jako poměr elektřiny získané při vybíjení ku elektřině dodané při nabíjení.

$$\eta_{RT} = \frac{W_{vyb.out}}{W_{nab.in}} \quad (23)$$

Jelikož však počítáme s měrnými hodnotami, je vhodnější použít rovnici 7. Nicméně potřebujeme několik hodnot, se kterými budeme počítat. V tabulkách nabíjecího a vybíjecího cyklu zjistíme následující hodnoty:

$w_{comp.nab.} = \Delta h_{real.nab.comp}$	.....	elektřina dodaná kompresoru při nabíjení
$w_{exp.nab.} = \Delta h_{real.nab.exp}$	.....	elektřina získaná z expandéru při nabíjení
$w_{comp.vyb.} = \Delta h_{real.vyb.comp}$	.....	elektřina dodaná kompresoru při vybíjení
$w_{exp.vyb.} = \Delta h_{real.vyb.exp}$	.....	elektřina získaná z expandéru při vybíjení
$q_{nab.H} = \Delta h_{real.nab.H}$	.....	teplo dodané do horké nádrže při nabíjení
$q_{nab.S} = \Delta h_{real.nab.S}$	.....	chlاد dodaný do studené nádrže při nabíjení
$q_{vyb.H} = \Delta h_{real.vyb.H}$	.....	teplo odebrané z horké nádrže při vybíjení
$q_{vyb.S} = \Delta h_{real.vyb.S}$	.....	chlاد odebraný ze studené nádrže při vybíjení
$q_{atm}$	.....	teplo vypuštěné do atmosféry v rámci vybíjení

Následně vypočítáme hodnotu elektřiny spotřebované při nabíjení a získané při vybíjení. Obě hodnoty získáme podle vzorce:

$$W_{ob\dot{e}h} = W_{exp} - W_{comp} \quad (24)$$

Pro výpočet výsledné účinnosti potřebujeme nejprve vypočítat účinnost oběhu. Můžeme využít účinnost vůči využitému teplu nebo vůči využitému chladu. Pro přehlednost určíme obě:

$$\eta_{nab.ob\dot{e}h} = \frac{W_{vyb.ob\dot{e}h}}{q_{nab.H}} \quad (25)$$

$$\eta_{vyb.ob\dot{e}h} = \frac{W_{vyb.ob\dot{e}h}}{q_{nab.S}} \quad (26)$$

Pro výpočty výsledných účinností potřebujeme určit také topné faktory COP. Získáme je dosazením do rovnice 4:

$$COP_H = \frac{q_{nab.H}}{w_{nab.oběh}} \quad (27)$$

$$COP_S = \frac{q_{nab.S}}{w_{nab.oběh}} \quad (28)$$

Dosazením do rovnice 7 pak získáme rovnice pro výpočet výsledné účinnosti cyklu.

$$\eta_{RT} = COP_H \cdot \eta_{nab.oběh} \quad (29)$$

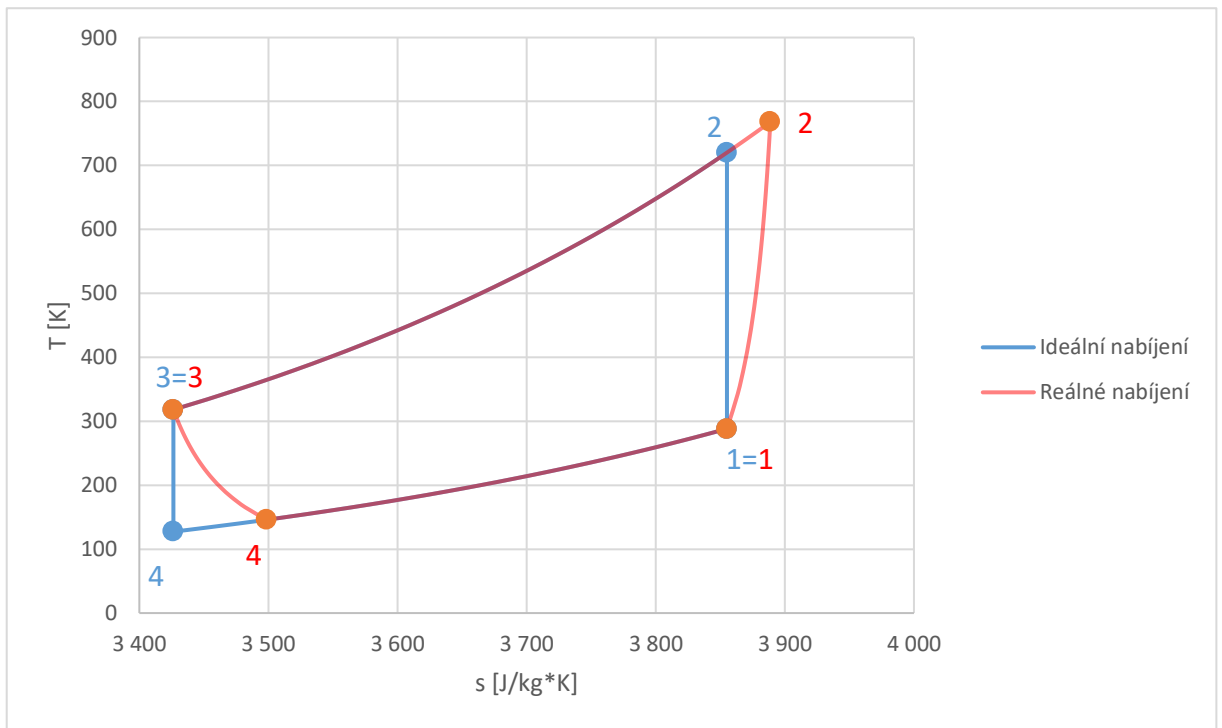
$$\eta_{RT} = COP_S \cdot \eta_{vyb.oběh} \quad (30)$$

Pro obě rovnice se hodnoty rovnají a určují nám celkovou účinnost systému. Výše uvedené hodnoty a hodnoty účinnosti jsou uvedené v tabulce 17.

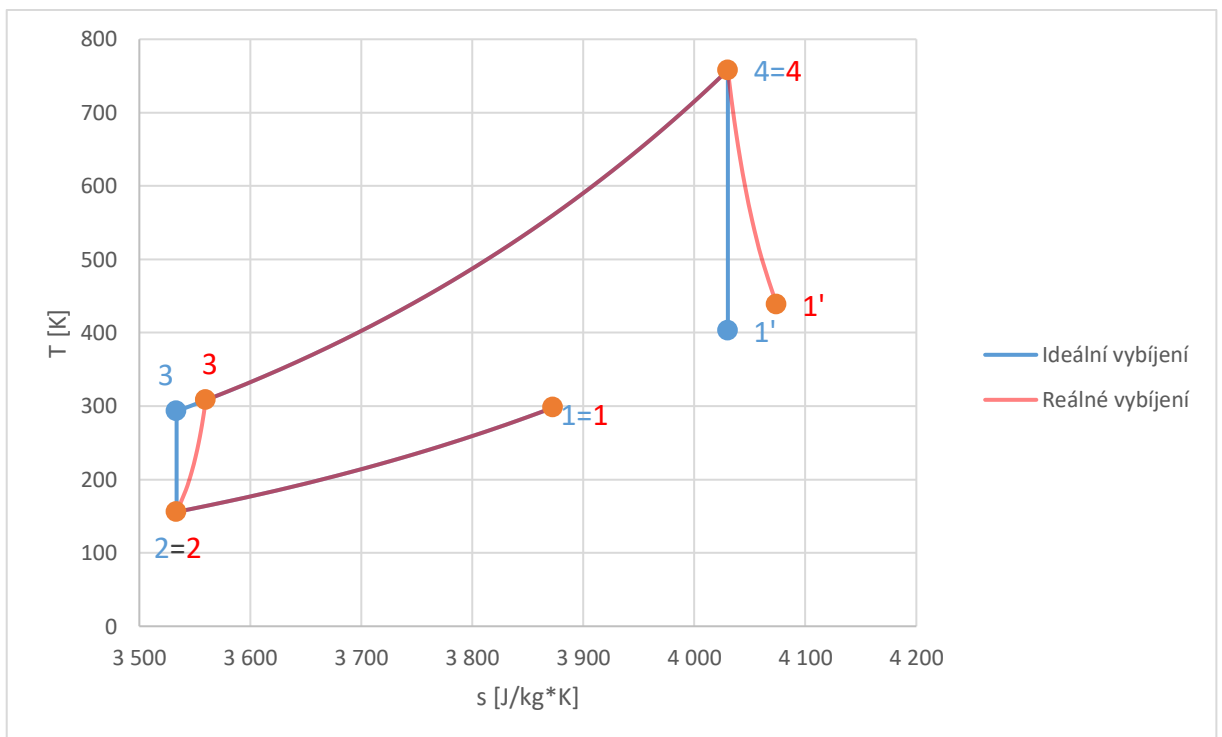
Tabulka 17: Tabulka výsledků pro zkoumané plyny

	Argon	Vzduch	Dusík
$w_{comp\ nab.} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	249 890,43	296 821,08	307 235,40
$w_{exp\ nab.} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	88 620,41	137 342,37	142 170,84
$w_{comp\ vyb.} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	78 942,85	118 170,97	122 253,23
$w_{exp\ nab.} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	166 264,99	185 349,08	191 895,77
$q_{nab.H} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	235 753,99	268 401,81	277 713,777
$q_{nab.S} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	74 483,96	108 923,10	112 649,21
$q_{vyb.H} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	234 939,71	267 124,87	276 512,16
$q_{vyb.S} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	74 423,75	108 906,87	112 617,90
$w_{nab.ob\ \dot{e}h} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	161 170,03	159 478,71	165 064,57
$w_{vyb.ob\ \dot{e}h} \left[ \frac{J}{kg} \right]$	87 322,14	67 178	69 642,54
$\eta_{nab.ob\ \dot{e}h} [\%]$	37,040	25,029	25,077
$\eta_{vyb.ob\ \dot{e}h} [\%]$	117,236	61,675	61,822
$COP_H [-]$	1,462	1,683	1,682
$COP_S [-]$	0,462	0,683	0,682
$q_{atm}$	73 193,81	91 039,89	94 251,72
$\eta_{RT} [\%]$	54,147	42,124	42,191

Z tabulky vychází, že nejvýhodnějším pracovním médiem z trojice argon, vzduch, dusík je argon. Pro přehledné zobrazení cyklů byl systém s argonem zanesen do T-s diagramu nabíjecího (obrázek 21) a vybíjecího cyklu. (obrázek 22)

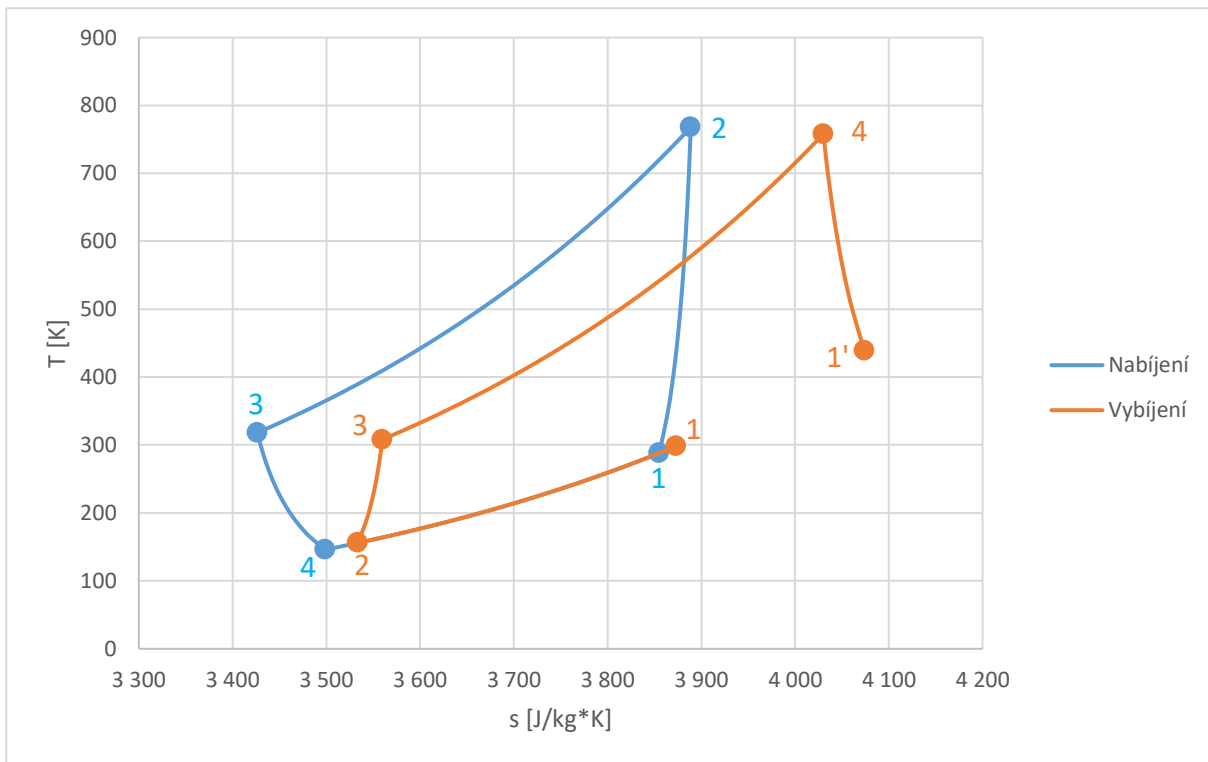


Obrázek 21: T-s diagram nabíjecího cyklu



Obrázek 22: T-s diagram vybíjecího cyklu

Modrá barva reprezentuje ideální oběh, zatímco oranžová oběh reálný, který uvažuje účinnosti kompresoru a expandéru. Jelikož v praxi se s ideálním nesetkáme, dále se zaměříme na výpočty pouze s reálným systémem, který byl zanesen do grafu na obrázku 23.



Obrázek 23: T-s diagram nabíjení + vybití navrhovaného cyklu

## 6.9. Návrh rezervoárů

Stejně jako je třeba navrhnout nabíjecí a vybíjecí cyklus, je třeba se zaměřit na návrh rezervoárů, kam energii ukládáme. Zaměříme se na výběr vhodných materiálů skladujících citelné teplo a návrh potřebné velikosti rezervoárů. Pro náš systém budeme uvažovat kapacitu 200 MWh (720 GJ) dostupné elektřiny, to znamená elektřiny, kterou získáme při vybití, nikoliv elektřiny, kterou do systému dodáme při nabíjení.

Jelikož teplota materiálu při nabitých a vybitých stavech rezervoárů je pro návrh systému velice podstatná, uvedeme si v tabulce 18 jejich teploty v jednotlivých stavech a také teplotní rozdíl mezi oběma stavy. Tyto teploty odpovídají oběhu s využitím argonu jako pracovního média a rozdíl teplot pak následně využijeme při výpočtech uložené energie.

Tabulka 18: Teploty nabitých/vybitých rezervoárů

Rezervoár	Horký	Studený
$T_{nab.} [K]$	313,15	293,15
$T_{vyb.} [K]$	762,99	150,90
$\Delta T [K]$	449,84	142,25

### 6.9.1. Materiály

Jak bylo uvedeno již dříve, PTES založené na Braytonově cyklu používají materiály skladující citelné teplo ve svých rezervoárech. To znamená, že materiál dosahuje vysokých



teplot, proto budeme uvažovat rezervoáry vyrobené z vysokolegovaných ocelí, abychom předešli vzniku creepu.

Jako náplň rezervoárů připadá v úvahu více možností, ale pro jednodušší návrh je vhodné vybrat materiál, jehož měrná tepelná kapacita zůstává v daném teplotním rozsahu téměř konstantní, a lze s ní tak počítat. V tabulce 19 lze vidět porovnání několika materiálů s ohledem na vlastnosti podstatné pro návrh. Zároveň byl zaveden koeficient  $k_{obj}$ , který udává poměr uložené energie na jednotku objemu (v  $m^3$ ).

Tabulka 19: Porovnání možných materiálů pro náplň rezervoárů [53] [54] [55] [56] [57] [58]

	$c_p \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$	$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$k_{obj} \left[ \frac{MJ}{m^3 \cdot K} \right]$
<b>Beton (hutný)</b>	1 020	2 300	2,346
<b>Cihly</b>	840	1 700	1,428
<b>Vápenec</b>	920	2 500	2,300
<b>Oxid hlinitý</b>	880	3 690	3,247
<b>Oxid titaničitý</b>	697	4 050	2,823
<b>Oxid železitý</b>	130	5 250	0,683
<b>Oxid křemičitý</b>	730	2 650	1,935
<b>Měď</b>	380	8 800	3,344
<b>Štěrka</b>	750	1 650	1,238

Z tabulky lze vidět, že nejvýhodnějším materiálem, co se rozměru nádrží týče, bude měď, následovaná oxidem hlinitým, díky nejvyšší hodnotě koeficientu  $k_{obj}$ , což značí, že je potřeba méně materiálu, a tudíž menší rezervoáry na uložení stejného množství energie.

### 6.9.2. Návrh velikosti rezervoárů

Pro návrh velikosti rezervoárů budeme uvažovat konstantní hodnotu měrné tepelné kapacity, protože neznáme jejich průběh s měnící se teplotou. K výpočtu využijeme rovnici 2, resp. si ji můžeme rozdělit, abychom dostali zvlášť energii uloženou v horkém a studeném rezervoáru:

$$E_H = V_H \rho_H c_{pH} (T_{H nab.} - T_{H vyb.}) \quad (31)$$

$$E_S = V_S \rho_S c_{pS} (T_{S vyb.} - T_{S nab.}) \quad (32)$$

Teploty odpovídají hodnotám nabitých/vybitých rezervoárů. Důležité je si uvědomit, jakou kapacitu od systému požadujeme. Uvažujeme-li 200 MWh (720 GJ) dostupné elektřiny, tak z účinnosti  $\eta_{RT}$  určíme elektřinu, kterou do systému dodáváme, a pomocí hodnot topných faktorů  $COP_H$  a  $COP_S$  zjistíme podíl energie uložené do jednotlivých nádrží. Údaje potřebné pro návrh rezervoárů jsou uvedeny v tabulce 20.

Tabulka 20: Energetické údaje pro návrh velikosti nádrží

Požadovaná kapacita [MWh]	200
Požadovaná kapacita [GJ]	720
Účinnost $\eta_{RT}$ [%]	54,147
Dodaná elektřina [GJ]	1 329,72
Energie uložená v horkém rezervoáru [GJ]	1 943,87
Energie uložená ve studeném rezervoáru [GJ]	614,14
$\Delta T_H = T_{H nab.} - T_{H vyb.}$	449,84
$\Delta T_S = T_{S vyb.} - T_{S nab.}$	142,25

Nyní už snadno vypočítáme minimální objem obou rezervoárů pro různé materiály. (tabulka 21)

Tabulka 21: Minimální rozměry nádrží

	$c_p \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$	$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$V_H [m^3]$	$V_S [m^3]$
<b>Beton (hutný)</b>	1 020	2 300	1 841,98	582,0
<b>Cihly</b>	840	1 700	3 026,11	956,1
<b>Vápenec</b>	920	2 500	1 878,82	593,6
<b>Oxid hlinitý</b>	880	3 690	1 330,77	420,4
<b>Oxid titaničitý</b>	697	4 050	1 530,82	483,7
<b>Oxid železitý</b>	130	5 250	6 331,55	2 000,4
<b>Oxid křemičitý</b>	730	2 650	2 233,80	705,7
<b>Měď</b>	380	8 800	1 292,25	408,3
<b>Štěrka</b>	750	1 650	3 491,94	1 103,2

### 6.9.3. Cena materiálů

Dále je nutné zaměřit se na cenu materiálu, protože i když je měď nejvýhodnější ze zkoumaných materiálů, jedná se zároveň o poměrně drahý kov, proto se dá předpokládat, že v praxi by se z ekonomických důvodů používal jiný materiál. Podobně jako u tabulky 19, i v tabulce 22 si zavedeme koeficient, tentokrát koeficient  $k_{cena}$ , který určuje cenu materiálu potřebného na uložení 1 MJ měrné energie.

Tabulka 22: Ceny zkoumaných materiálů [38] [59]

	$cena \left[ \frac{Kč}{t} \right]$	$k_{cena} \left[ \frac{Kč \cdot K}{MJ} \right]$	$výsl. cena [mil. Kč]$
<b>Beton (hutný)</b>	19 656	19 271	109,58
<b>Cihly</b>	10 920	13 000	73,93
<b>Vápenec</b>	7 425,6	8 071	45,90
<b>Oxid hlinitý</b>	32 760	37 227	211,70
<b>Oxid titaničitý</b>	43 680	62 669	356,37
<b>Oxid železitý</b>	21 840	168 000	955,34
<b>Oxid křemičitý</b>	3 276	4 488	25,52
<b>Měď</b>	327 600	862 105	4 902,40
<b>Štěrk</b>	1 092	1456	8,28

Z tabulky 22 vidíme, že přestože je měď nejvýhodnější z hlediska uloženého množství energie v co nejmenším objemu, je zároveň mnohonásobně dražší než všechny ostatní materiály. Pro náš návrh ukládání 200 MWh elektřiny se dokonce měď jako jediný z vybraných materiálů pohybuje v hodnotách miliard Kč. Oproti tomu nejlevnější materiál, štěrk, se cenově jako jediný pohybuje v hodnotách jednotek milionů Kč.

## 7. EKONOMICKÉ HODNOCENÍ CARNOTOVÝCH BATERIÍ

Carnotovy baterie, jakožto relativně nově zkoumaná forma ukládání elektřiny, potřebuje být schopna konkurovat zavedeným technologiím nejen účinností, kapacitou nebo výkonem, ale zároveň také z ekonomického hlediska. Jako porovnávací technologii zvolíme lithiové baterie, jelikož se jedná o nejpoužívanější uložení nezávislé na umístění (například přečerpávací vodní elektrárny jsou závislé na vodním zdroji). Veličinou, která se často používá pro porovnávání technologií ukládání elektřiny, jsou náklady na elektřinu dodávanou z uložení  $C_{out}$ , [60] ta se určí pomocí vzorce:

$$C_{out} = \frac{C_{in}}{\eta} + \frac{CAPEX}{N} \quad (33)$$

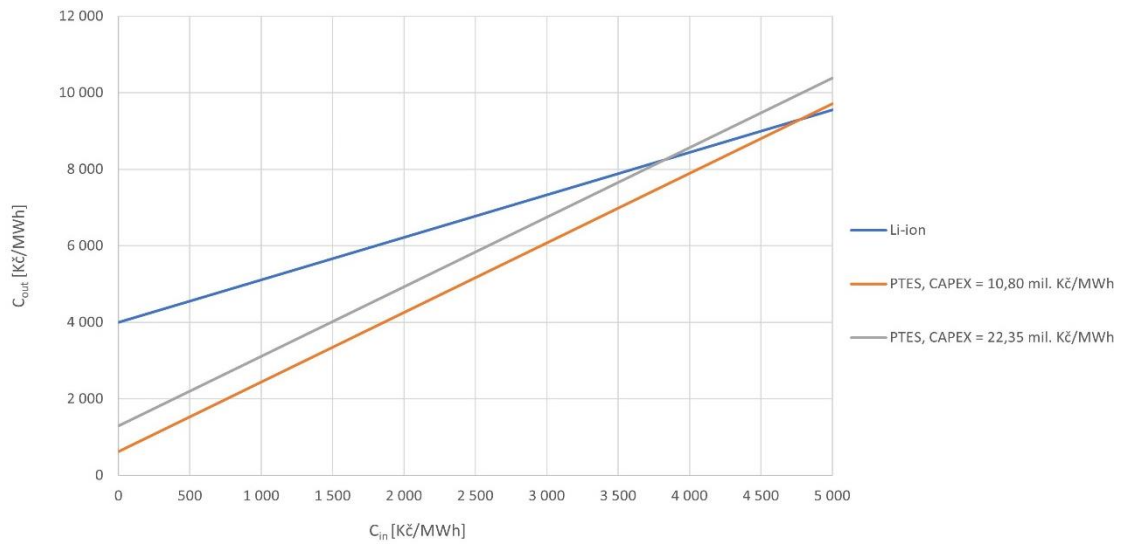
kde  $C_{in}$  je cena nakupované elektřiny,  $\eta$  je účinnost systému (round-trip efficiency) a  $N$  značí počet cyklů, které technologie zvládne za dobu své životnosti.

Zásadními rozdíly mezi PTES a lithiovými bateriemi jsou jejich účinnosti a počty možných cyklů. Zatímco lithiové baterie excelují svou vysokou účinností, PTES zase disponují mnohem vyšší životností. Shrnutí údajů potřebných pro porovnávání bylo zaneseno do tabulky 23. [9] [61] [60] [62] [63]

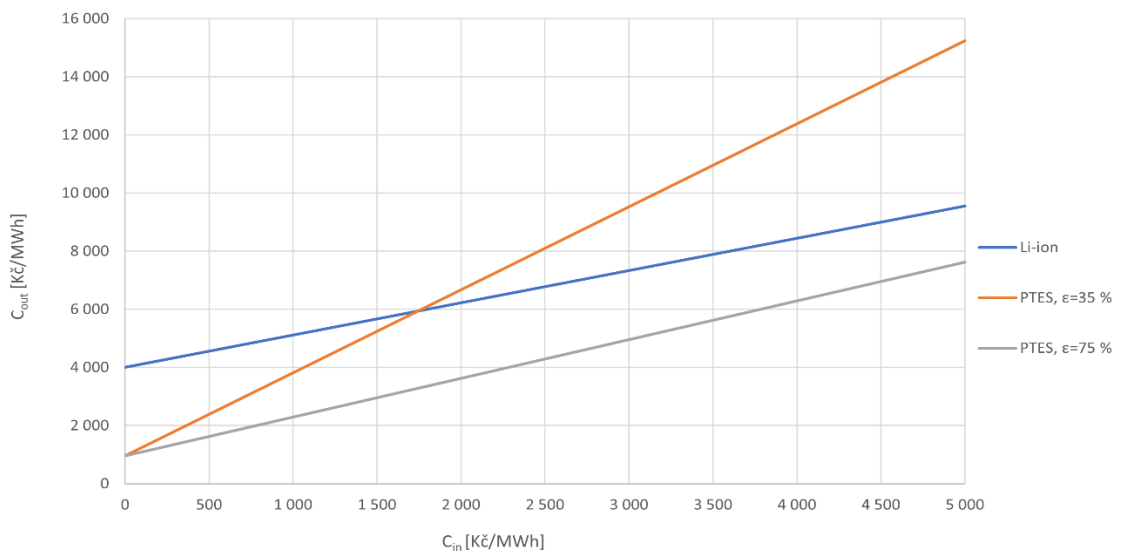
Tabulka 23: Porovnání lithiových a Carnotových baterií v CAPEX, účinnosti a počtu cyklů

	Li-ion baterie	PTES	
		min	max
<b>CAPEX [kč/kWh]</b>	20 00	10 800	22 350
<b>Účinnost [%]</b>	90	35	75
<b>Počet cyklů [-]</b>	5 000	14 600	20 000

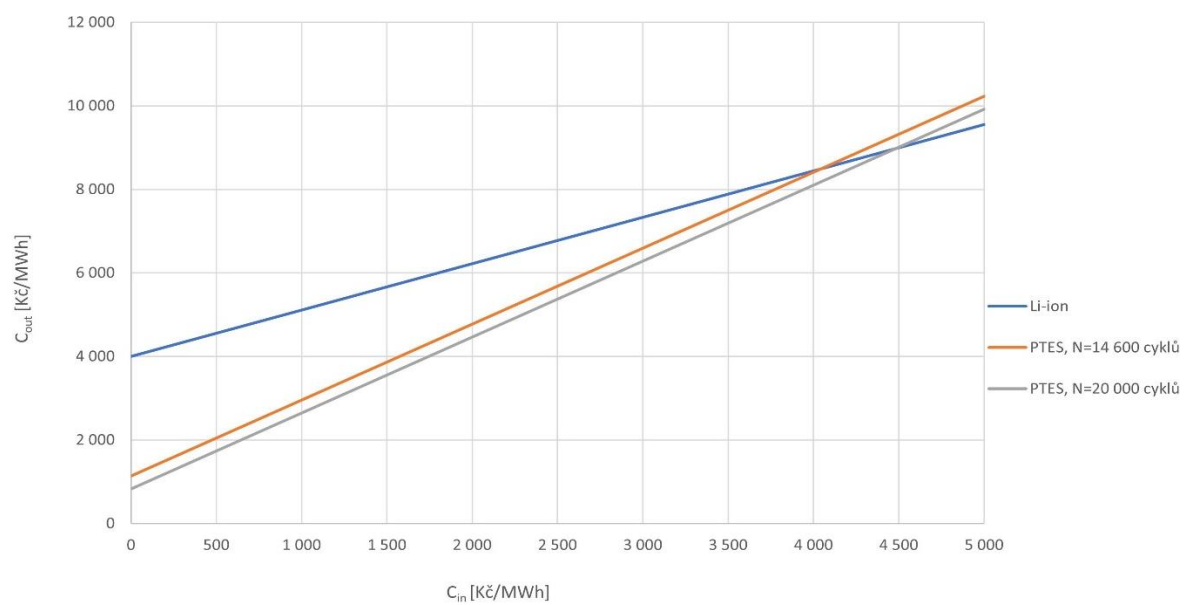
Údaje pro lithium-iontové baterie byly vybrány na základě průměrných nebo nejčastěji uváděných hodnot. Pro PTES byly vybrány minimální a maximální hodnoty nalezené v literatuře. Pro nejlepší představu, kdy jsou výhodné lithiové a kdy Carnotovy baterie, byly sestaveny 3 grafy závislosti  $C_{out}$  na  $C_{in}$ , jeden s měnícími se investičními náklady (obrázek 24), jeden s měnící se účinností (obrázek 25) a jeden s měnící se životností (počty cyklů) (obrázek 26). V každém grafu jsou lithiové baterie reprezentovány jednou křivkou, která odpovídá hodnotám z tabulky 23. Pro PTES byly vždy vytvořeny 2 křivky, jedna pro minimální a jedna pro maximální hodnotu měnící se veličiny. Veličiny, které u křivek pro PTES uvažujeme konstantní, udáváme jako průměr minimální a maximální hodnoty. Porovnávací grafy jsou uvedeny níže.



Obrázek 24: Porovnání Li-ion a PTES (s měnící se hodnotou CAPEX)



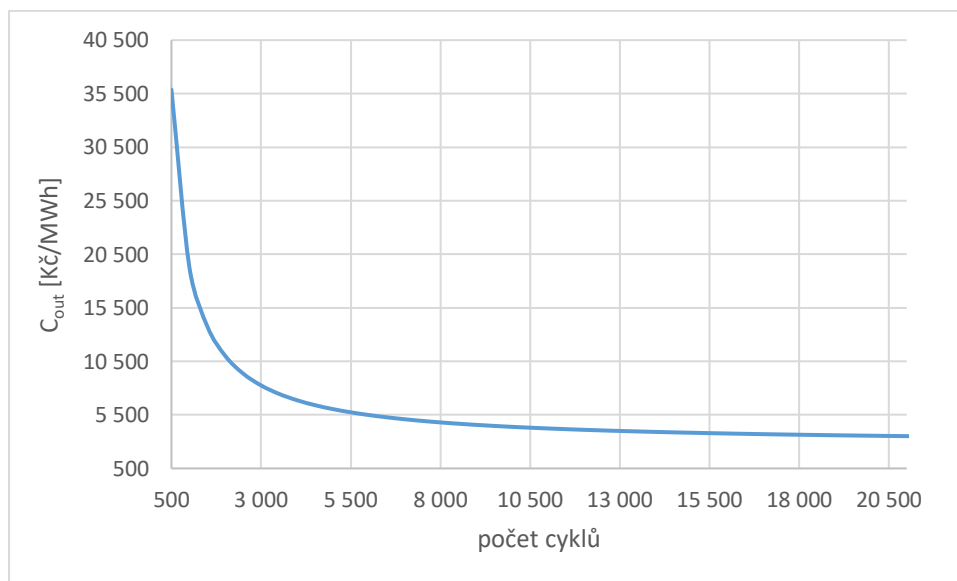
Obrázek 25: Porovnání Li-ion a PTES (s měnící se hodnotou účinnosti)



Obrázek 26: Porovnání Li-ion a PTES (s měnící se životností)

Z grafů lze vyčíst jistý trend, a sice že pro nižší ceny nakupované elektřiny je výhodnější technologie PTES, zatímco pro vyšší ceny nakupované elektřiny jsou výhodnější lithiové baterie. Podle grafů má největší vliv na prodejní cenu PTES účinnost celého systému. Podíváme-li se na graf, který uvažuje změnu účinnosti, vidíme, že pro spodní hranici účinnosti (35 %) se křivky protnou již okolo hodnoty 1 700 Kč/MWh, zatímco pro maximální hodnotu (75 %) se protnou až ve velmi vysokých nákupních cenách. Rozdíly mezi minimálními a maximálními hodnotami při změnách kapitálových cen a při změnách životnosti nejsou tak výrazné a v obou případech se křivka minimální i maximální hodnoty protíná s křivkou lithiových baterií v rozmezí 3 800–4 800 Kč/MWh.

Jelikož životnost je hlavní výhodou PTES v porovnání s lithiovými bateriemi, je vhodné zobrazit závislost prodejní ceny na počtu cyklů, které systém zvládne za dobu své životnosti. Graf na obrázku 27 zobrazuje tuto závislost při uvažování nákupované ceny 1 500 Kč/MWh.



Obrázek 27: Závislost prodejní ceny na životnosti PTES

Z tohoto grafu lze vidět, že závislost není lineární, nicméně připomíná spíše logaritmickou funkci. Pro počty cyklů PTES, které se pohybují v rozmezí 14 600–20 000, se prodejní cena mění velice pomalu v porovnání s účinnostmi okolo 5 000 cyklů, kterých dosahují lithiové baterie. Tento fakt značí, proč dosahují PTES systémy tak dobrých prodejních cen i pro spodní hranice svých životností.

## 8. ZÁVĚR

V rešeršní části byl popsán základní princip Carnotových baterií neboli PTES (Pumped Thermal Energy Storage), historie vývoje, popis některých z možných typů této technologie, možná pracovní média a materiály, které lze použít. Byly nastíněny vlastnosti konkurenčních technologií ukládání energie vyspělých i stále se vyvíjejících. Závěrem rešerše lze říct, že Carnotovy jsou nadějnou technologií ukládání energie, která má již několik slibných konceptů. Dá se ovšem říct, že prozatím nedosáhla svého maximálního potenciálu a existuje stále prostor pro budoucí vývoj.

Následně byl navržen jednoduchý model Carnotovy baterie pracující s Braytonovým oběhem s uvažováním účinností kompresoru/expandéru a teplotních rozdílů na rezervoárech. Pro 3 různé plyny, argon, vzduch a dusík, byl navržen nabíjecí i vybíjecí oběh. Plyn, který dosahoval největší účinnosti, byl argon s účinností lehce nad 54 %. Důvodem nižší účinnosti systému se vzduchem nebo dusíkem může být fakt, že teplotní rozdíly byly pro všechny plyny stejné: 5 K, nicméně cykly se vzduchem a dusíkem dosahují v nabíjecím cyklu po kompresi téměř o 200 K nižší teploty než v systému s argonem. Z toho vyplývá, že procentuálně je pokles pro argon nižší, což znamená nižší ztrátu.

Jelikož byly výpočty provedeny pro jednoduchý model, nedala se předpokládat příliš velká účinnost. Možnými způsoby zvýšení účinnosti cyklu, pokud bychom uvažovali stále stejné teplotní rozdíly (které byly v práci odhadnuty), by bylo použití lepších kompresorů a expandérů nebo zavedení rekuperace pro využití tepla, které se v současném systému vypouští do atmosféry.

Při návrhu rezervoárů byly zkoumány potřebné velikosti a možné materiály pro náplň rezervoárů při uvažování argonového systému. Bylo zkoumáno 9 různých materiálů, kdy byl na základě jejich tepelné kapacity a hustoty určen koeficient, který poukázal na nejvhodnější materiál s co největším poměrem uložené energie na jednotku plochy. Z tohoto hlediska byla nejvýhodnějším materiálem měď, nicméně při zohlednění cen materiálů je měď velice nevýhodná. Ekonomicky nejvhodnějším materiálem se ukázal šterk, který má velmi nízké náklady a zároveň přijatelné množství energie na  $\text{m}^3$ .

V ekonomické části bylo provedeno porovnání PTES s jeho největším konkurentem, lithiovými bateriemi, co se týče závislosti ceny elektřiny dodávané z uložení na ceně nakupované elektřiny. Z vytvořených grafů jsme zjistili, že PTES je díky své delší životnosti cenově výhodnější pro nižší ceny nakupované elektřiny, zatímco lithiové baterie jsou díky vysoké účinnosti vhodné při vysokých cenách nakupované elektřiny.

## 9. REFERENCE

- [1] WHITE, Alexander a Christos MARKIDES. Thermodynamic analysis of pumped thermal electricity storage. In: *Applied Thermal Engineering* [online]. United Kingdom: Elsevier, 2013, s. 291-298 [cit. 2020-03-24]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112002141?via%3Dihub>
- [2] THESS, Andre. Carnot batteries. In: *DLR* [online]. Hannover: German Aerospace Center (DLR), 2018 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://event.dlr.de/en/hmi2018/carnot-batterien/>
- [3] BENATO, Alberto a Anna STOPPATO. Pumped Thermal Electricity Storage: A technology overview. In: *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. University of Padova: Elsevier, 2018, s. 301-315 [cit. 2020-03-25]. ISSN 2451-9049. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904917303700?via%3Dihub>
- [4] QUACHINING, Volker. Typical output of a solar thermal power plant with two-hour thermal storage and backup heater to guarantee capacity. In: *Volker Quaschnig* [online]. Německo: Volker Quaschnig, 2013 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals2/index.php>
- [5] CSP Plant Coupled with Thermal Storage and Hybridization. In: *Energy Matters* [online]. WordPress, 2012 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://narasimhancs.wordpress.com/tag/hybridization/>
- [6] CAPITAL EXPENDITURE VERSUS OPERATING EXPENDITURE. *Energyst* [online]. United Kingdom: Energyst, 2020 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.energyst.com/solutions/capex-vs-opex/>
- [7] Německo do konce roku 2038 zavře všechny uhelné elektrárny, rozhodla komise. *Česká televize* [online]. Praha 4: Česká televize, 2019 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/svet/2716517-nemecko-nejpozdeji-do-konce-roku-2038-skonci-s-uhelnou-energii-rozhodla-komise>
- [8] Pumped Hydro Storage System. *SinoVoltaics* [online]. Hong Kong: SinoVoltaics, 2020 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/pumped-hydro-storage-system/>



- [9] ZABLOCKI, Alexandra. Fact Sheet: Energy Storage (2019). *EESI* [online]. Washington DC: EESI, 2019 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>
- [10] Pumped Hydropower. *Energy Storage Association* [online]. Washington, DC: ESA, 2017 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/pumped-hydropower/>
- [11] Jak funguje největší akumulátor v Česku: podívejte se do elektrárny Dlouhé Stráně. In: *VTM* [online]. VTM, 2020 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/jak-funguje-nejvetsi-akumulator-v-cesku-podivejte-se-do-elektrarny-dlouhe-strane/sc-870-a-189061/default.aspx>
- [12] Pumped hydro Storage. *European Association for Storage of Energy* [online]. Brussels: EASE, 2016 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE\\_TD\\_Mechanical\\_PHS.pdf](https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Mechanical_PHS.pdf)
- [13] Compressed Air Energy Storage (CAES). *Climate Technology Centre & Network* [online]. Copenhagen: Climate TechWiki, 2010 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.ctc-n.org/technologies/compressed-air-energy-storage-caes>
- [14] Solar Energy Storage. In: *SolAgra* [online]. California: SolAgra, 2018 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.solagra.com/uploads/7/8/1/7/78177638/3694220.jpeg?397>
- [15] Compressed Air Energy Storage. *Pacific Northwest National Laboratory* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2019 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://caes.pnnl.gov>
- [16] DE DECKER, Kris. Ditch the Batteries: Off-Grid Compressed Air Energy Storage. *Low-tech magazine* [online]. Barcelona: Low-tech Magazine, 2018 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.lowtechmagazine.com/2018/05/ditch-the-batteries-off-the-grid-compressed-air-energy-storage.html>
- [17] WANG, Jidai, Kunpeng LU, Lan MA, Jihong WANG, Shihong MIAO, Jian LI a Dan WANG. Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development. *Energies* [online]. 2016, **2017**(10), 991 [cit. 2020-12-05]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/991>
- [18] SÁNZEC-DIÉZ, Eduardo, Edgar VWNTOSA, Massimo GUARNIERI, Andrea TROVO a Petr MAZUR. Redox flow batteries: Status and perspective towards sustainable stationary energy storage. *Journal of Power Sources* [online]. 2021, **481**

- [cit. 2020-11-01]. ISSN 0378-7753. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775320311083>
- [19] Chytrá energie v diplomce: Vanadové redoxní průtočné baterie. In: *Obnovitelné desetiletí* [online]. Uhlířské Janovice: Aliance pro energetickou soběstačnost, 2016 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://obnovitelnedesetileti.cz/chytra-energie-v-diplomce-vanadove-redoxni-prutocne-baterie>
- [20] Flow Batteries. *Clean Energy Institute* [online]. Washington: University of Washington, 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/flow-battery/>
- [21] BELLINI, Emiliano. Redox flow batteries for \$66/kWh from steel industry waste. *PV magazine* [online]. California: PV Magazine, 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.pv-magazine.com/2020/04/14/redox-flow-batteries-for-66-kwh-from-steel-industry-waste/>
- [22] LAWSON, Barrie. Flow Batteries. *Electropedia* [online]. United Kingdom: Woodbank Communications, 2015 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/flow.htm>
- [23] MANTHIRAM, Arumugam. An Outlook on Lithium Ion Battery Technology. *ACS Central Science* [online]. Texas, 2017, **3**, 1063–1069 [cit. 2020-12-06]. ISSN 2374-7951. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acscentsci.7b00288>
- [24] BUCHMANN, Isidor. Is Lithium-ion the Ideal Battery?. *Battery university* [online]. Vancouver: CADEX, 2010 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [https://batteryuniversity.com/learn/archive/is\\_lithium\\_ion\\_the\\_ideal\\_battery](https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery)
- [25] KILLINGSWORTH, Nick J., Vi H. RAPP, Daniel L. FLOWERS, Salvador M. ACEVES, Jyh Yuan CHEN a Robert DIBBLE. Increased efficiency in SI engine with air replaced by oxygen in argon mixture. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. Elsevier, 2011, **33**(2), 3141-3149 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.07.035](https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.07.035)
- [26] TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory Přehled základních typů a jejich vlastností. *Tzbinfo* [online]. Brno: tzb, 2019 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [27] Implementation of large-scale Li-ion battery energy storage systems within the EMEA region. *Applied Energy* [online]. 2020, **160**, 114166 [cit. 2020-12-06]. ISSN 0306-

2619. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919318537>
- [28] LI, Kaiyuan a King JET TSENG. Energy efficiency of lithium-ion battery used as energy storage devices in micro-grid. *IECON* [online]. Singapore: IEEE, 2015, **41**, 5235-5240 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7392923>
- [29] COLTHORPE, Andy. California utility PG&E breaks ground on 730MWh Moss Landing battery project. *Energy Storage News* [online]. London: Solar Media Ltd., 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/news/california-utility-pge-breaks-ground-on-730mwh-moss-landing-battery-project>
- [30] KEEN, Kip. As battery costs plummet, lithium-ion innovation hits limits, experts say. *S&P Global* [online]. Canada: S&P Global, 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z:  
<https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/as-battery-costs-plummet-lithium-ion-innovation-hits-limits-experts-say-58613238>
- [31] FRATE, Guido, Marco ANTONELLI a Umberto DESIDERI. A novel Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) system with thermal integration. In: *Applied Thermal Engineering* [online]. Elsevier, 2017, , s. 1051-1058 [cit. 2020-03-25]. ISSN 1359-4311. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111634114X?via%3Dihub>
- [32] GUO, Juncheng, Ling CAI, Jincan CHEN a Yinghui ZHOU. Performance evaluation and parametric choice criteria of a Brayton pumped thermal electricity storage system. *Energy* [online]. Elsevier, 2016, **113**, 693-701 [cit. 2020-03-25]. ISSN 0360-5442. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216310027?via%3Dihub>
- [33] MCTIGUE, Josh. "Carnot batteries" for electricity storage. In: *National Renewable Energy Laboratory* [online]. USA: NREL, 2019 [cit. 2020-11-01]. Dostupné z:  
<https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75559.pdf>
- [34] BENATO, Alberto. Performance and cost evaluation of an innovative Pumped Thermal Electricity Storage power system. In: *Energy* [online]. University of Padova:

- Elsevier, 2017, s. 419-436 [cit. 2020-03-24]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217312422?via%3Dihub>
- [35] BOBČÍK, Marek. *Ideální oběhy plynových turbín*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [36] DESRUES, Tristan, Jacques RUER, Philippe MARTY a Jean-Francois FOURMIGUÉ. A thermal energy storage process for large scale electric applications. In: *Applied Thermal Engineering* [online]. France: Elsevier, 2010, s. 425-432 [cit. 2020-04-02]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431109002932>
- [37] WHITE, Alexander. Loss analysis of thermal reservoirs for electrical energy storage schemes. In: *Applied Energy* [online]. Cambridge University of Engineering Department: Elsevier, 2011, s. 4150-4159 [cit. 2020-04-26]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911002522?via%3Dihub>
- [38] BENATO, Alberto a Anna STOPPATO. Heat transfer fluid and material selection for an innovative Pumped Thermal Electricity Storage system. In: *Energy* [online]. University of Padova: Elsevier, 2018, s. 155-168 [cit. 2020-04-26]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218300562?via%3Dihub>
- [39] MCTIGUE, Joshua, Alexander WHITE a Christos MARKIDES. Parametric studies and optimisation of pumped thermal electricity storage. In: *Applied Energy* [online]. United Kingdom: Elsevier, 2015, s. 800-811 [cit. 2020-03-24]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261914008423>
- [40] DUMONT, O., R. DICKES, M. ISHMAEL a V. LEMORT. *Mapping of performance of pumped thermal energy storage (Carnot battery) using waste heat recovery*. Athens, 2019. Dostupné také z: [https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/239271/1/orc\\_ptes\\_review.pdf](https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/239271/1/orc_ptes_review.pdf)
- [41] MORANDIN, Matteo, Mehmet MERCANGÖZ, Florian BUCHTER a François MARÉCHAL. Conceptual design of a thermo-electrical energy storage system based on heat integration of thermodynamic cycles – Part A: Methodology and base case. In: *Energy* [online]. Elsevier, 2012, , s. 375-385 [cit. 2020-04-25]. ISSN 0360-5442. Dostupné z:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544212002228?via%3Dihub>
- [42] MERCANGÖZ, Mehmet, Jaroslav HEMRLE, Lilian KAUFMANN, Andreas Z'GRAGGEN a Christian OHLER. Electrothermal energy storage with transcritical CO<sub>2</sub> cycles. *Energy* [online]. Elsevier, 2012, **45**(1), 407-415 [cit. 2020-04-30]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212002046?via%3Dihub>
- [43] PETERSON, Richard. A concept for storing utility-scale electrical energy in the form of latent heat. In: *Energy* [online]. Elsevier, 2011, , s. 6098-6109 [cit. 2020-04-25]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211005330#!>
- [44] STEINMANN, W. D. The CHEST (Compressed Heat Energy STORAGE) concept for facility scale thermo mechanical energy storage. *Energy* [online]. Elsevier, 2014, **69**, 543-552 [cit. 2020-03-25]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214003132?via%3Dihub>
- [45] Understanding Global Warming Potentials. *EPA* [online]. Washington, DC: EPA, 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [46] KOEN, Antoine, Farres Antunes PAU a Alexander WHITE. A study of working fluids for transcritical pumped thermal energy storage cycles. In: *2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES)* [online]. France: IEEE, 2019, s. 1-7 [cit. 2020-04-30]. ISBN 978-1-7281-2317-2. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867217>
- [47] R744 - oxid uhličitý. *Messer* [online]. Praha 4: Messer, 2020 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: [https://www.messer.cz/documents/20591/2777596/R744\\_CZ.pdf/fba70301-440c-89ae-a72f-2a34e0a96686](https://www.messer.cz/documents/20591/2777596/R744_CZ.pdf/fba70301-440c-89ae-a72f-2a34e0a96686)
- [48] ŽEMLOVÁ, Tereza, Ivo JIŘÍČEK a Václav JANDA. Materiály pro akumulaci tepla ze spalování biomasy. *Tbzinfo* [online]. Praha: tbz, 2010 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/6740-materialy-pro-akumulaci-tepla-ze-spalovani-biomasy>
- [49] SHARMA, Atul, Vineet Veer TYAGI, Changren CHEN a Dharam BUDDHI. Review on thermal energy storage with phase changematerials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2009, **13**(2), 318-345 [cit. 2020-

- 11-10]. ISSN 1364-0321. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107001402#!>
- [50] STEINMANN, Wolf-Dieter, Dan BAUER a Maike JOHNSON. Pumped thermal energy storage (PTES) as smart sector-coupling technology for heat and electricity. *Energy* [online]. Elsevier, 2019, **183**, 185-190 [cit. 2020-03-25]. ISSN 0360-5442. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219311879?via%3Dihub>
- [51] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. První. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01507-6.
- [52] LAUGHLIN, Robert B. Pumped thermal grid storage with heat exchange. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* [online]. 2017, **9**(4), 1-23 [cit. 2020-05-26]. ISSN 1941-7012. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4994054>
- [53] Katalog stavebních materiálů. *Tzbinfo* [online]. Praha: tzb, 2020 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: [https://stavba.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000086\\_katalog.html](https://stavba.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000086_katalog.html)
- [54] Aluminum Oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Properties. *Accuratus* [online]. Phillipsburg: Accuratus, 2013 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://accuratus.com/alumox.html>
- [55] Titanium Dioxide - Titania ( TiO<sub>2</sub>). *AZO Materials* [online]. Manchester: AZoNetwork, 2020 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1179>
- [56] Hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). *National Institute of Standards and technology* [online]. USA: NIST, 2018 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C1317608&Type=JANAFS&Table=on>
- [57] Hematite. *PubChem* [online]. Bethesda, MD: National Center for Biotechnology Information, 2020 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hematite#section=Melting-Point>
- [58] Silica - Silicon Dioxide (SiO<sub>2</sub>). *AZO Materials* [online]. Manchester: AZoNetwork, 2020 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1114>
- [59] How Much Does Crushed Stone or Gravel Cost?. *HomeGuide* [online]. USA: Liaison Ventures, Inc., 2020 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://homeguide.com/costs/gravel-prices>
- [60] BAŠTA, Vít, Jan ŠPALE, Miroslav RATHAN, Martin HOFMAN, Michal KASAN a Václav NOVOTNÝ. Skladování elektřiny prostřednictvím tepla aneb Carnotovy

baterie 1. dí – principy a přehled. *Tzbinfo* [online]. Praha: tzb, 2020 [cit. 2020-12-13].  
Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/t.py?t=55&i=127842&fbclid=IwAR0UDJbdc1mCrQQAuUKhqzR3sNJuFSa7csuolHIhECa73USGKUByfRtXpZ4>

- [61] LARSSON, Patrik a Philip BÖRJESSON. *Cost models for battery energy storage systems*. Stockholm, 2018. Bachelor of Science Thesis. KTH Industrial Engineering and Management.
- [62] GEORGIU, Solomos, Marko AUNEDI, Goran STRBAC a Christos MARKIDES. On the Value of Liquid-Air and Pumped-Thermal Electricity Storage Systems in Low-Carbon Electricity Systems. *Energy* [online]. 2020, **193**, 166680 [cit. 2020-12-13]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219323758?via%3Dihub>
- [63] SMALLBONE, Andrew, Verena JÜLCH, Robin WARDLE a Anthony ROSKILLY. Levelised Cost of Storage for Pumped Heat Energy Storage in comparison with other energy storage technologies. *Energy Conversion and Management* [online]. Elsevier, 2017, **152**, 221-228 [cit. 2020-12-13]. ISSN 0196-8904. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417308713>

## 10. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Časová bilance dodávky elektřiny do sítě z fotovoltaické elektrárny .....	14
Obrázek 2: Schéma přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně, největší přečerpávací elektrárny v ČR .....	15
Obrázek 3: Schéma ukládání energie ve formě stlačeného vzduchu .....	16
Obrázek 4: Schéma průtočné baterie .....	17
Obrázek 5: Princip lithiové baterie .....	18
Obrázek 6: T-s diagram Joule-Braytonova cyklu .....	21
Obrázek 7: Návrh PTES systému, který předvedl Desrues .....	22
Obrázek 8 .....	23
Obrázek 9: Schéma systému, který navrhl Benato. Vlevo schéma při nabíjení, vpravo při vybíjení.....	24
Obrázek 10: T-s diagram Rankinova cyklu, červená barva značí proces nabíjení a modrá barva značí vybíjení .....	25
Obrázek 11: Základní schéma navržené Morandinem.....	26
Obrázek 12: Schéma Petersonova modelu.....	27
Obrázek 13: Porovnání klasického PTES systému s oběma typy PTES využívajícími odpadní tepla .....	28
Obrázek 14: Schéma a T-s diagram modelu CHEST .....	29
Obrázek 15: Schéma připojení amoniakového cyklu při nabíjení (vlevo). Při vybíjení (vpravo) se amoniakový cyklus nevyužívá.....	30
Obrázek 16: Schéma změny teploty v jednotlivých vrstvách rezervoárů. Vlevo studený rezervoár, vpravo horký rezervoár .....	33
Obrázek 17: T-s diagram Joule-Braytonova cyklu .....	34
Obrázek 18: Závislost maximálního povoleného napětí na teplotě pro různé typy ocelí. Černá – nelegovaná uhlíková ocel, červená – nízkolegovaná ocel, modrá – legovaná ocel [52].	35
Obrázek 19: Schéma nabíjecího oběhu navrhovaného PTES systému.....	38
Obrázek 20: Schéma vybíjecího oběhu navrhovaného PTES systému.....	38
Obrázek 21: T-s diagram nabíjecího cyklu .....	55
Obrázek 22: T-s diagram vybíjecího cyklu.....	55
Obrázek 23: T-s diagram nabíjení + vybíjení navrhovaného cyklu.....	56
Obrázek 24: Porovnání Li-ion a PTES (s měnící se hodnotou CAPEX).....	61
Obrázek 25: Porovnání Li-ion a PTES (s měnící se hodnotou účinnosti) .....	61
Obrázek 26: Porovnání Li-ion a PTES (s měnící se životností) .....	61
Obrázek 27: Závislost prodejní ceny na životnosti PTES.....	62



## 11. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání typických uložišť elektriny.....	19
Tabulka 2: Vstupní parametry pro návrh PTES systému.....	39
Tabulka 3: Porovnání jednotlivých pracovních médií při kompresi v rámci ideálního nabíjecího cyklu.....	40
Tabulka 4: Porovnání jednotlivých pracovních médií při nabíjení horké nádrže v rámci ideálního nabíjecího cyklu.....	41
Tabulka 5: Porovnání jednotlivých pracovních médií při expanzi v rámci ideálního nabíjecího cyklu.....	42
Tabulka 6: Porovnání jednotlivých pracovních médií při kompresi v rámci reálného nabíjecího cyklu.....	43
Tabulka 7: Porovnání jednotlivých pracovních médií při nabíjení horké nádrže v rámci reálného nabíjecího cyklu.....	44
Tabulka 8: Porovnání jednotlivých pracovních médií při expanzi v rámci reálného nabíjecího cyklu.....	45
Tabulka 9: Porovnání jednotlivých pracovních médií při nabíjení studené nádrže v rámci reálného nabíjecího cyklu.....	46
Tabulka 10: Porovnání jednotlivých pracovních médií při vybíjení studené nádrže v rámci ideálního vybíjecího cyklu.....	47
Tabulka 11: Porovnání jednotlivých pracovních médií při kompresi v rámci ideálního vybíjecího cyklu.....	48
Tabulka 12: Porovnání jednotlivých pracovních médií při vybíjení horké nádrže v rámci ideálního vybíjecího cyklu.....	48
Tabulka 13: Porovnání jednotlivých pracovních médií při expanzi v rámci ideálního vybíjecího cyklu.....	49
Tabulka 14: Porovnání jednotlivých pracovních médií při kompresi v rámci reálného vybíjecího cyklu.....	50
Tabulka 15: Porovnání jednotlivých pracovních médií při vybíjení horké nádrže v rámci reálného vybíjecího cyklu.....	51
Tabulka 16: Porovnání jednotlivých pracovních médií při expanzi v rámci reálného vybíjecího cyklu.....	51
Tabulka 17: Tabulka výsledků pro zkoumané plyny.....	54
Tabulka 18: Teploty nabitých/vybitých rezervoárů.....	56
Tabulka 19: Porovnání možných materiálů pro náplň rezervoárů.....	57
Tabulka 20: Energetické údaje pro návrh velikosti nádrží.....	58

Tabulka 21: Minimální rozměry nádrží .....	58
Tabulka 22: Ceny zkoumaných materiálů .....	59
Tabulka 23: Porovnání lithiových a Carnotových baterií v CAPEX, účinnosti a počtu cyklů .....	60