

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky**

**BAKALÁŘSKÁ/DIPLOMOVÁ**  
**PRÁCE**

**Možnosti měření průtoků médií vhodných k akumulaci  
energie**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **David MACHATÝ**  
Osobní číslo: **E18B0077P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Téma práce: **Možnosti měření průtoků médií vhodných k akumulaci energie**  
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

### Zásady pro vypracování

1. Vytvořte přehled systémů akumulace energie.
2. Vytvořte přehled pracovních médií vhodných pro akumulaci energie a tato zhodnoťte.
3. Porovnejte metody měření průtoků různých médií.
4. Navrhněte možnosti měření průtoků médií z hlediska aplikace energy storage.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. The National Renewable Energy Laboratory (NREL) – <https://www.nrel.gov>.
2. Flow Measurement Methods and Applications; J. E. HARDY, J. O. HYLTON, T. E. McKNIGHT, C. J. REMENYIK, F. R. RUPPEL.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Anna Fořtová**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ing. Václav Kús, CSc.**  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na možnosti měření průtoků médií vhodných k akumulaci energie. První část se zaměřuje na různé druhy akumulčních zdrojů, které se využívají v praxi pro akumulování energie. Dále jsou v práci uvedena kritéria, podle kterých jsou vybírána média pro koncentrované solární elektrárny a také popis médií již využívaných v těchto aplikacích. Ve třetí části jsou popisovány jednotlivé metody měření průtoků médií a u nich jsou popsána i některá měřidla, která na daných principech pracují. Čtvrtá část rozebírá tematiku využití jednotlivých měřidel pro vybraná média a zhodnocení jejich vhodnosti.

## **Klíčová slova**

Akumulace energie, měření průtoků, teplotná média, měřidla, koncentrovaná solární elektrárna, akumulční elektrárny.

## **Abstract**

The presented bachelor thesis is focused on the working fluids flow measurement possibilities for energy storage applications. The first part focuses on different types of energy storage sources that are used in practice for energy storage. Furthermore, the work presents the criteria according to which the media are selected for concentrated solar power plants and also a description of the media already used in these applications. The third part describes the various methods of measuring media flows and they also describe some meters that work on the principles. The fourth part discusses the use of individual meters for selected media and evaluation of their suitability.

## **Key words**

Energy accumulation, flow measuring, heat transfer fluid, gauges, concentrated solar plant, accumulation power plants.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 26.5.2021

David Machatý

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Anně Fořtové za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>1 AKUMULACE ENERGIE .....</b>	<b>10</b>
1.1 AKUMULÁTOROVÉ BATERIE .....	12
1.2 SUPRAVODIVÉ INDUKČNÍ AKUMULÁTORY .....	13
1.3 PRŮTOČNÉ BATERIE.....	14
1.4 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY .....	14
1.5 MECHANICKÉ UKLÁDÁNÍ ENERGIE .....	15
1.6 AKUMULAČNÍ ELEKTRÁRNY NA STLAČENÝ VZDUCH.....	16
1.7 PALIVOVÉ ČLÁNKY .....	17
1.8 TEPELNÁ ÚLOŽIŠTĚ.....	17
<b>2 PŘEHLED PRACOVNÍCH MÉDIÍ.....</b>	<b>18</b>
2.1 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH FAKTORŮ DŮLEŽITÝCH PRO TEPELNÝ PŘENOS.....	19
2.1.1 <i>Hustota</i> .....	19
2.1.2 <i>Bod tání</i> .....	19
2.1.3 <i>Měrná tepelná kapacita</i> .....	19
2.1.4 <i>Tepelná vodivost</i> .....	19
2.1.5 <i>Viskozita</i> .....	20
2.1.6 <i>Tepelná stabilita</i> .....	20
2.1.7 <i>Cena</i> .....	20
2.2 VÝČET NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH MÉDIÍ V KONCENTROVANÝCH SOLÁRNÍCH ELEKTRÁRNÁCH .....	21
2.2.1 <i>Voda</i> .....	21
2.2.2 <i>Vzduch</i> .....	21
2.2.3 <i>Therminol VP-1</i> .....	22
2.2.4 <i>Syntetický a minerální olej</i> .....	22
2.2.5 <i>Solar salt (NaNO<sub>3</sub> (60 %)–KNO<sub>3</sub> (40 %))</i> .....	22
2.2.6 <i>Kapalný sodík</i> .....	23
2.2.7 <i>Hitec (NaNO<sub>3</sub> (7 %)–KNO<sub>3</sub>(53 %)–NaNO<sub>2</sub> (40 %))</i> .....	23
2.2.8 <i>Hitec XL (NaNO<sub>3</sub> (7 %)–KNO<sub>3</sub> (45 %)–Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (48 %))</i> .....	23
2.2.9 <i>Dowtherm A</i> .....	23
<b>3 METODY MĚŘENÍ PRŮTOKŮ MÉDIÍ .....</b>	<b>24</b>
3.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRŮTOK TEKUTIN .....	25
3.2 METODY A MĚŘIDLA PRO MĚŘENÍ TLAKU PŘED A ZA PRVKEM PRŮTOKOMĚRU .....	28
3.2.1 <i>Rychlostní sondy</i> .....	29
3.2.2 <i>Průřezová měřidla</i> .....	31
3.2.3 <i>Kapilární průtokoměr</i> .....	34
3.2.4 <i>Kolenový průtokoměr</i> .....	34
3.2.5 <i>Dallova trubice</i> .....	35
3.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ TEKUTINY .....	36
3.3.1 <i>Turbínkové průtokoměry</i> .....	36
3.3.2 <i>Vírové průtokoměry</i> .....	37
3.3.3 <i>Indukční průtokoměry</i> .....	38
3.3.4 <i>Ultrazvukové průtokoměry</i> .....	39
3.3.5 <i>Oscilační průtokoměry</i> .....	41



3.3.6	<i>Viřivé průtokoměry</i> .....	41
3.4	MĚŘENÍ OBJEMOVÉHO PRŮTOKU.....	42
3.4.1	<i>Pístová měřidla</i> .....	42
3.4.2	<i>Tělesová (oválová) měřidla</i> .....	43
3.5	MĚŘENÍ HMOTNOSTNÍHO PRŮTOKU.....	43
3.5.1	<i>Coriolisův průtokoměr</i> .....	44
3.5.2	<i>Tepelný hmotnostní průtokoměr</i> .....	45
<b>4</b>	<b>MOŽNOSTI MĚŘENÍ PRŮTOKU MÉDIÍ Z HLEDISKA APLIKACE ENERGY STORAGE</b> .....	<b>48</b>
4.1	SOLAR SALT.....	49
4.2	DOWTHERM A.....	51
4.3	THERMINOL VP-1.....	53
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>55</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ</b> .....	<b>57</b>
	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>57</b>
	<b>ZDROJE</b> .....	<b>58</b>

## Úvod

Díky čím dál většímu zastoupení obnovitelných zdrojů v energetickém mixu stoupá i nutnost použití akumulace energie. Vzhledem k závislosti obnovitelných zdrojů na aktuálních podmínkách je akumulace energie využívána k vyhlazení nerovnoměrné výroby energie akumulováním a následným využitím ve vhodnější denní čas, kdy je energie nedostatek.

Cílem této práce je popis jednotlivých akumulačních zdrojů energie využívaných převážně v energetice. Práce sestává z jednotlivých kapitol zaměřených na popis jednotlivých vlastností, které mají jednotlivá média, a která jsou důležitá pro dimenzování akumulačního zařízení, dále obsahuje kapitoly zaměřené na porovnání jednotlivých médií mezi sebou. Následně je uveden popis jednotlivých měřidel používaných pro měření průtoku médií v těchto akumulačních zařízeních. Na závěr práce je navržen možnost měření průtoku médií z hlediska aplikace energy storage.

Téma bakalářské práce bylo zpracováno, protože téma akumulace energie je stále více aktuální v dnešní době a má potenciál i do budoucna, jak pro zlepšení energetické bilance přenosových sítí, tak pro rozvoj obnovitelných zdrojů.

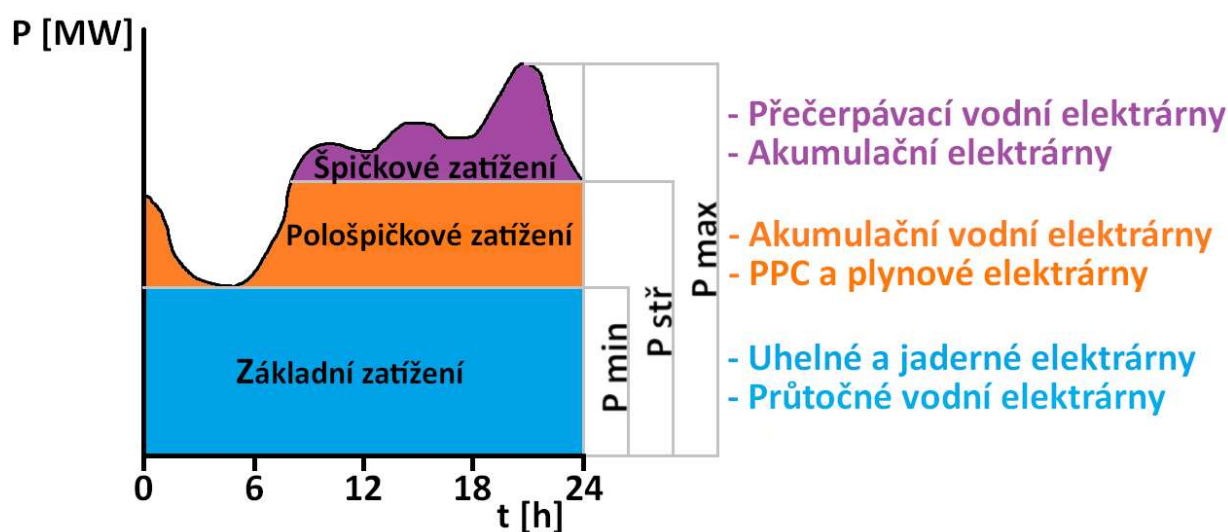
## 1 Akumulace energie

Balanční vztah mezi výrobou a spotřebou elektrické energie musí být v neustálé rovnováze z důvodu toho, že energii nelze efektivně skladovat. V současné situaci se zdroje musí neustále přizpůsobovat požadavkům odběratelů (výroba je podmíněna spotřebou viz Obr. 1) bezpodmínečně za jakéhokoliv počasí či jiných nepředvídatelných situací. Problémem v tomto systému jsou relativně omezené varianty regulace výkonu jednotlivých tepelných elektráren (v České republice se podílejí na výrobě elektrické energie z 51 % uhelné a z 32 % jaderné elektrárny). Regulovatelné nejsou ani obnovitelné zdroje (větrné a fotovoltaické elektrárny), protože jak například vítr, tak sluneční svit nemůžeme nijak ovlivnit. V dnešní době se pro tyto změny v elektrické síti, kdy je přebytek energie nebo naopak její nedostatek využívají přečerpávací vodní elektrárny. Například v noci, kdy je spotřeba nejnižší, tak přebytek energie je spotřebováván tím, že čerpají vodu do vodní nádrže, a když je energie nedostatek, tak zpětně pokrývají špičkové odběry její výrobou. Toto nemusí platit jen pro přečerpávací vodní elektrárny, ale i pro další zdroje. Takové technologie

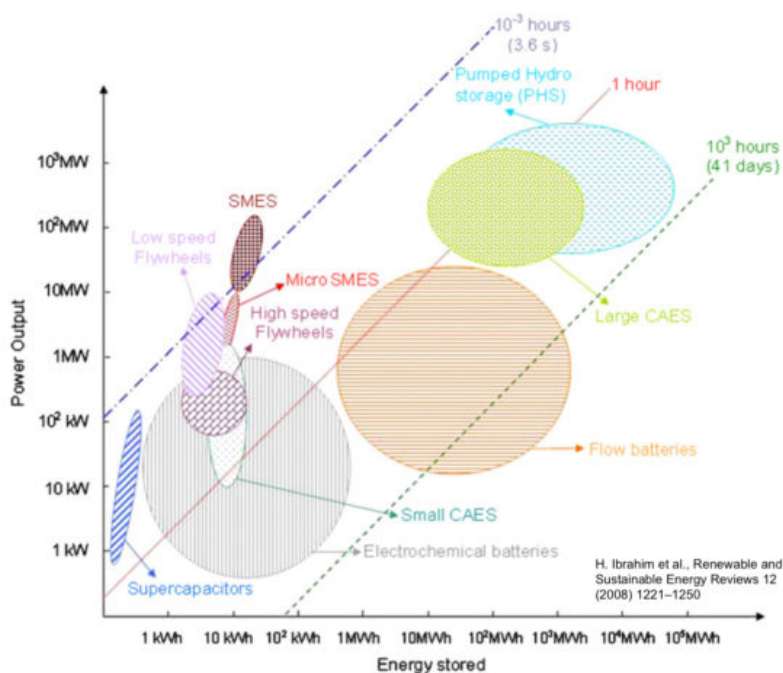
využívají přeměň na různé formy energie, které lze oproti samotné elektrické energii lépe uskladnit (s nižšími dlouhodobými ztrátami) a v případě potřeby je zpětně využít k výrobě elektřiny. Jejich největší výhodou je, na rozdíl od uhelných a jaderných elektráren, rychlá reakce regulace, tedy umožňují velice rychle začít dodávat elektrickou energii do sítě. Zároveň se mohou také využívat v místech mimo síť. Například při výpadku energie, mohou po určitou dobu fungovat jako samostatné zdroje (záleží samozřejmě na dimenzování daného zdroje) [1][2].

Mezi vhodné technologie pro akumulaci energie se řadí:

- |  |   |
|--|---|
| 1) Akumulátorové baterie                                     | 5) Mechanické ukládání energie              |
| 2) Supravodivé indukční akumulátory                          | 6) Akumulační elektrárny na stlačený vzduch |
| 3) Průtočné baterie  | 7) Vodíkové elektrárny                      |
| 4) Přečerpávací vodní elektrárny, akumulaci vodní elektrárny | 8) Tepelná úložiště                         |



Obrázek 1. Denní diagram zatížení elektrické sítě



Obrázek 2. Porovnání jednotlivých technologií pro ukládání energie [3]

## 1.1 Akumulátorové baterie

Jedná se o chemický princip uchování elektrické energie, který se nijak zvlášť neliší od baterií v mobilních telefonech (Obr. 3). Například olověný akumulátor je tvořený z několika párů olověných desek, které jsou ponořeny v roztoku kyseliny sírové. Na deskách vybitého akumulátoru se díky kyselině sírové ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) začne usazovat síran olovnatý ( $\text{PbSO}_4$ ). Po připojení stejnosměrného napětí se na kladné elektrodě začne vytvářet oxid olovičitý ( $\text{PbO}_2$ ) a záporná elektroda bude pokryta houbovitou vrstvou olova. Tím se nabitý akumulátor přemění v galvanický článek, jeho elektrolyt zhoustne a lze na jeho svorkách změřit určité napětí. Velkou výhodou baterií je, že umožňují velmi rychlou reakci na výkyvy v elektrické síti a také jejich účinnost, která přesahuje i 90% [4][5][6].

Akumulátory jsou nejčastěji z materiálů:

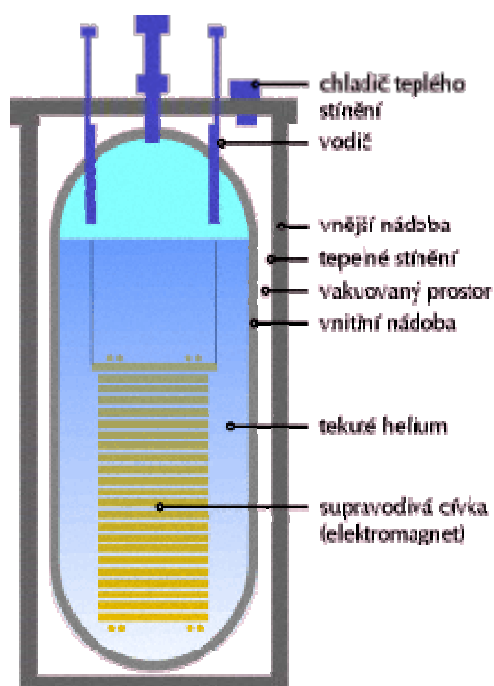
- Pb (olověné)
- Ni-Cd (Nikl-kadmium)
- Na-S (Sodíkovo-sírový)
- Li-ion (Lithium-iont)



Obrázek 3. Vysokokapacitní akumulátorová baterie [7]

## 1.2 Supravodivé indukční akumulátory

V současnosti je kladen na supravodivost větší důraz. Čím dál více se experimentuje ať už s nízkoteplotní (klasickou), tak i s vysokoteplotní supravodivostí a začíná mít užitek v praxi. Při supravodivosti dochází ke stavu, kdy daná látka přestane vykazovat za velmi nízkých teplot elektrický odpor. Využívá se proto cívek ponořených v tekutém heliu ( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ve kterých se akumuluje elektrický proud ve formě magnetického pole. Výhodou těchto akumulátorů je velmi krátká doba reakce na změnu v síti a to až 0,2 mikrosekundy. Používají se převážně tam, kde by i sebemenší výpadek znamenal velké finanční škody. Jejich účinnost také přesahuje 90 % [4][5].



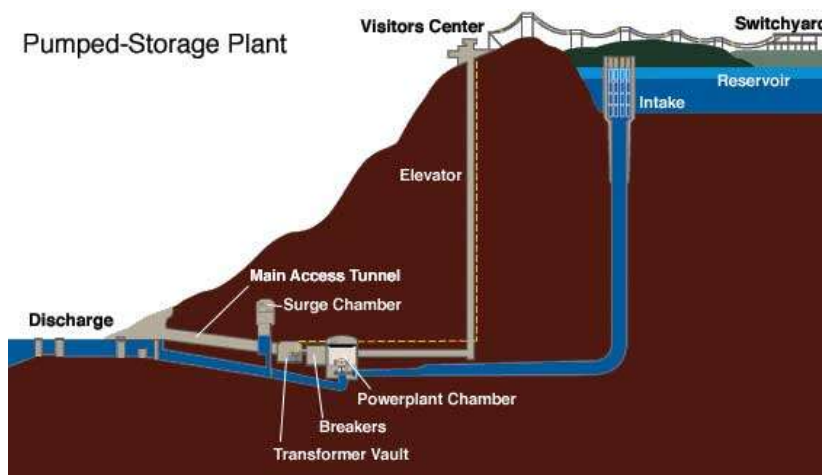
Obrázek 4. Průřez supravodivým indukčním akumulátorem [4]

### 1.3 Průtočné baterie

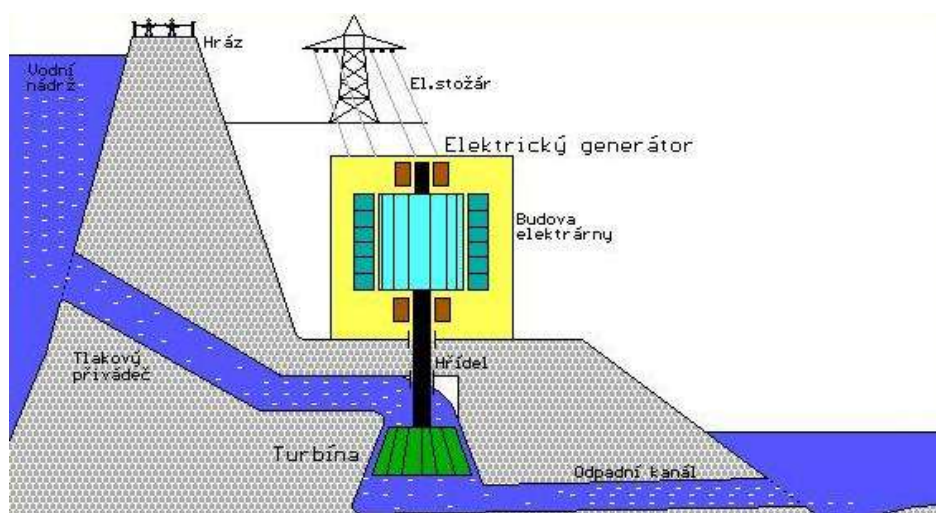
U těchto typů baterií k nabíjení a vybíjení dochází pomocí reakce dvou látek, které jsou rozpuštěny v kapalině a rozděleny do dvou nádrží navzájem oddělených membránou. Jeden z elektrolytů je kladný a druhý záporný. Technologie se podobá jak palivovým článkům ([viz kap. 1.7](#)), tak bateriím. Mezi výhody patří nepřetržitá možnost výměny kapalin, jejich regenerace a opětovné použití. Dále pak zvýšení výkonu a kapacity prostým zvětšením objemu nádob s elektrolytem a až 10 000 cyklů nabíjení. Účinnost u těchto baterií se pohybuje na hodnotě 89 % [5].

### 1.4 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací elektrárny fungují na principu velkého spádu vody. Princip je založen na dvou nádržích, které jsou mezi sebou propojené potrubím se spádem od 100 do 500 metrů (Obr. 5). Toho se dosahuje vyhloubením horní nádrže v kopci nebo se využívají vysokohorská jezera. Při přebytku energie (nejčastěji v noci) spotřebovává elektrárna energii pro vytlačení vody z dolní nádrže do horní. Při jejím nedostatku je pak voda spuštěna potrubím zpět do spodní nádrže přes turbínu, která je spojena s generátorem. Nespornou výhodou těchto elektráren je vysoký akumuláční výkon, který může být u velkých přečerpávacích vodních elektráren až v tisících megawattů. Jejich účinnost se dnes pohybuje kolem 75 %. Na podobném principu fungují akumuláční vodní elektrárny (Obr. 6), které využívají k výrobě elektřiny kinetickou a potenciální energii vody. Tyto elektrárny nespotebovávají energii, aby akumulovali vodu mezi dvěma nádržemi, jako tomu bylo u přečerpávacích vodních elektráren, ale zadržují vodu řek. Jsou stavěna na místech s velkým spádem. V přehradě teče voda přes česla k turbíně, kterou následně roztáčí. Tato díla nemusí sloužit jen pro výrobu elektřiny, ale také jako zdroj pro průmyslové odběry, zavlažování, vodu, která se dále upravuje na pitnou, nebo jako nádrž pro rekreační účely. Jejich výhodou je rychlá schopnost generování vysokých výkonů a tím snadného vyrovnávání špičkových odběrů v síti [2][4][8].



Obrázek 5. Průřez přečerpávací vodní elektrárnou [9]

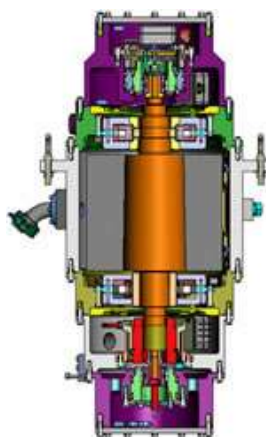


Obrázek 6. Řez akumuláční vodní elektrárnou [10]

## 1.5 Mechanické ukládání energie

Jako mechanické akumulátory se používají setrvačníky (Obr. 7). Jedním z nejprimitivnějších způsobů konstrukce setrvačnicků je umístění co nejtěžšího kola na hřídel elektromotoru. Při roztočení setrvačnicku funguje elektromotor jako alternátor, který naakumulovanou energii v setrvačnicku převede zpět na energii elektrickou. Rozdělujeme je na dva druhy: rychloběžné a pomaloběžné. Rychloběžné dokáží rotovat s rychlostí ve stovkách tisíc otáček za minutu. Mohou být vyrobeny z uhlíkových kompozitů, rotují ve vakuu a mají magnetická ložiska. Ty se pak otáčejí v prstenci indukčních cívek, aby se při přeměně zpět na elektrickou energii co nejvíce omezily mechanické ztráty. Pomaloběžné setrvačnicku mohou mít rotory z oceli a otáčejí se rychlostí 10 000 otáček za minutu. Výhodou setrvačnicků je jejich lehká údržba, dlouhá životnost a krátkodobé vydávání výkonů v jednotkách megawattů. Jejich účinnost se pohybuje kolem 80 % [1][4][5][6].

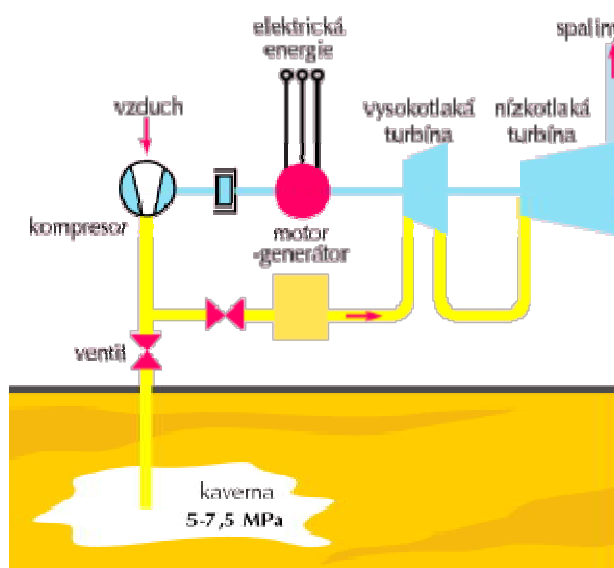




Obrázek 7. Průřez setrvačnickem [11]

## 1.6 Akumulační elektrárny na stlačený vzduch

Akumulační elektrárny na stlačený vzduch (Obr. 8) fungují na podobném principu jako přečerpávací vodní elektrárny. Když je elektřiny přebytek, začne elektrárna stlačovat vzduch do podzemních jeskyní nebo důlních kaveren, kde se tlak vzduchu pohybuje mezi 5 až 7,5 MPa. Když je zase potřeba elektrickou energii dodat do sítě, vzduch se zpětně žene přes alternátor do atmosféry. Toto řešení má poté účinnost kolem 42 %. Pro lepší účinnost se pak využívá ukládání tepla při stlačování vzduchu a následném vrácení tepla při jeho uvolňování, aby se vzduch nemusel dodatečně ohřívat. Za těchto okolností se účinnost pohybuje v rámci 50 %. Výhodou těchto elektráren jsou poměrně velké dodávky elektrické energie (v řádech stovek MW), kterou umí produkovat i několik hodin v kuse [1][4][5].



Obrázek 8. Princip tlakovzdušné elektrárny se spalovacími turbínami [4]



## 1.7 Palivové články

Palivové články fungují na principu elektrolýzy vody, kde stejnosměrný elektrický proud rozštěpí molekulu vody na vodík a kyslík při průchodu od jedné elektrody k druhé. Uvolněný vodíkový plyn se poté skladuje. To je ale u vodíku největší problém, protože je to plyn s velmi malými molekulami, tudíž dokáže projít řadou materiálů. Zpětné využití je poté provedeno díky elektrochemické reakci přeměňující vodík přímo na elektrickou energii bez spalování. Účinnost těchto článků se poté pohybuje mezi 40 – 80 %. Další přeměna je pak pomocí spalovacích motorů, u kterých je účinnost podobná klasickým benzínovým motorům (asi 25 %). Nevýhodou tohoto způsobu je vypouštění emisí NOx kvůli spalování [1][5].

## 1.8 Tepelná úložiště

Využívání těchto zdrojů v současnosti stoupá strmě vzhůru, nejen proto, že jsou čistou zálohou energie, ale také jsou velmi účinné. Tepelná úložiště fungují dvěma způsoby, buď skladují teplo nebo chlad. Skladování tepla se nejvíce využívá u koncentrovaných solárních elektráren (Obr. 9), kde např. několik tisíc zrcadel směřuje sluneční záření do jednoho bodu (solární kolektor). V něm se ohřívá látka (například tekuté soli, termooleje, kovy atd.), která se následně využívá přímo k výrobě elektřiny (princip stejný jako u klasických tepelných elektráren, kdy ve výměníku dojde k přenosu tepla z primárního do sekundárního média, které (v případě vody) se změní na páru, která následně roztáčí turbínu) nebo se ukládá k pozdějšímu využití. Při skladování chladu se naopak znovu využívá (jako například u přečerpávacích elektráren nebo u akumulčních elektráren na stlačený vzduch) přebytek energie k vyrobení velkého množství ledu nebo stlačení a zkapalnění vzduchu (teplota  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Při výrobě elektrické energie se poté vzduch ohřívá a svojí tepelnou roztažností koná mechanickou práci, která se využívá k roztáčení turbíny. Výhodou těchto technologií je poměrně dlouhá doba udržení energie a u slunečních tepelných elektráren účinnost až 99 %, kde zbytek (1 %) jsou malé ztráty na nedokonalosti izolace [1][5][12][13].

- Tepelná úložiště akumulující teplo využívají látky:
  - Tekuté soli
  - Minerální soli
  - Voda
  - Parafinové vosky
  - Mastné kyseliny
  - Alkoholy

- Kameny
- Cihly
- Beton
- Písek
- Kovy a slitiny kovů
- Grafit a jeho kompozity
- Tepelná úložiště akumulující chlad využívají látky:
  - Vzduch
  - Argon
  - Led



Obrázek 9. Koncentrovaná solární elektrárna [14]

## 2 Přehled pracovních médií

Tato kapitola pojednává o médiích, která jsou v praxi využívána v koncentrovaných solárních elektrárnách, přečerpávacích elektrárnách a akumulčních elektrárnách na stlačený vzduch vzhledem k tématu této práce. V koncentrovaných tepelných elektrárnách jsou média pro přenos tepla jednou z nejdůležitějších věcí, které udávají celkový výkon a účinnost systému, proto je snaha při návrhu elektrárny maximalizovat její výkon za co nejmenší cenu daného média. Vhodnost těchto médií pro dané odvětví (tepelná akumulace a tepelný přenos) je určováno podle několika faktorů, jako jsou například: bod tání, bod varu, tepelná stabilita, tepelná vodivost, cena, nízká viskozita, netoxičita, minimální náchylnost ke korozi, tepelná kapacita, atd. [12][15]

## 2.1 Porovnání jednotlivých faktorů důležitých pro tepelný přenos

Porovnání se týká výběru faktorů, které jsou důležité k návrhu vhodnosti teplotnosného média především pro koncentrované solární elektrárny.

### 2.1.1 Hustota

Hustota patří mezi nejzákladnější fyzikální pojmy. Je definována jako jednotka hmotnosti ( $kg$ ) na jednotku objemu ( $m^3$ ). Používá se k určení čistoty látek a k odhadu složení a charakterizaci druhů chemických směsí [16][17]. U kapalin používaných v koncentrovaných tepelných elektrárnách pak má význam pro jejich skladování. Čím větší má látka hustotu, tím větší je hustota sila pro ukládání energie, takže jeho objem může být menší. Díky tomu pak může být levnější výstavba i velikost elektrárny [12].

### 2.1.2 Bod tání

Bod tání patří mezi důležité vlastnosti sloučenin (látek). Je definován jako teplota ( $^{\circ}C$ ), ve které je látka v rovnováze jak v kapalném, tak v pevném stavu při tlaku jedné atmosféry ( $atm$ ). Dokáže se podle něj identifikovat látka a také její čistota. Je ovlivňován nečistotami, při jejichž koncentraci se bod tání sníží a zároveň se rozšíří jeho teplotní rozsah [18]. U elektráren a jejich médií s fázovou změnou pak tento bod musí být co nejbližší provozní teplotě, ve které médium pracuje [12].

### 2.1.3 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je definovaná jako množství tepelné energie ( $J$ ) potřebné pro změnu teploty jednoho kilogramu materiálu o jeden stupeň Kelvina ( $K$ ). Je proto důležité znát u látek tuto veličinu, protože nám říká, kolik energie je potřeba k ohřátí nebo ochlazení látky o dané hmotnosti (množství). To souvisí s informací o délce procesu ohřevu nebo chlazení látky při určitém množství (průtoku) a také o dopadu na náklady [19]. U médií v elektrárnách by tato veličina měla být co největší, protože velká měrná tepelná kapacita nám zajišťuje, že pro přenos tepla bude potřeba méně média na přenos stejného výkonu (oproti médiu s menší měrnou tepelnou kapacitou) [12].

### 2.1.4 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost vyjadřuje u materiálů míru schopnosti přenášet teplo. Její jednotka ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) vyjadřuje rychlost tepelného toku skrz materiál o dané tloušťce přes povrch kolmý ke zdroji vycházejícího z teplotního gradientu. Tepelná vodivost je nedílnou součástí například při chlazení elektroniky, kdy je důležité uchládit zdroj tepla (procesor), aby se

nepoškodil. Proto je důležité vědět, kolik množství tepla je potřeba odvést, aby pracoval v ideálním rozmezí teplot [20][21]. U elektráren vysoká tepelná vodivost navyšuje rychlost tepelného nabíjení a vybíjení a tím zrychluje celý cyklus [12].

### 2.1.5 Viskozita

Viskozitu lze jednoduše popsat jako odpor proti proudění. Její definice je poměr smykového napětí ( $Pa$ ) vůči smykové rychlosti ( $s^{-1}$ ), kde smykové napětí vyjadřuje potřebnou sílu ( $N$ ) na jednotku plochy ( $m^2$ ) k pohybu jedné vrstvy tekutiny ve spojitosti k druhé, a smyková rychlost je mírou změny rychlosti ( $m.s^{-1}$ ), kterou se navzájem vůči sobě pohybují mezilehlé vrstvy. Důležitou vlastností viskozity je také její náchylnost na změnu teploty. Ovlivňována je opačným způsobem, tedy při zvyšování teploty média klesá a naopak. Zároveň se snížením viskozity zvyšuje i rychlost průtoku média [22][23].

### 2.1.6 Tepelná stabilita

Tepelná stabilita je vlastnost molekul látek při vysokých teplotách, tzn. více stabilní molekuly mají vyšší odolnost rozkladu při vysokých teplotách. Tepelná stabilita dále popisuje, jak je podle Shmidta definována stabilita vodního celku a jeho odolnosti vůči míchání. To je definováno jako potřebné množství práce potřebné k přeměně vodního celku na jednotku hustoty vody ( $kg/m^3$ ). Měří se v Joulech na metr čtvereční ( $J/m^2$ ) [25].

### 2.1.7 Cena

Cena média je důležitým faktorem při návrhu koncentrované tepelné elektrárny (Solar salt, oleje, atd.), naopak u akumulační elektrárny na stlačený vzduch nebo u přečerpávací elektrárny jsou náklady vzduchu a vody prakticky nulové. To má za důsledek větší cenu vyrobené elektřiny. Snížit tuto cenu pak pomáhá levnější skladovací médium jako například beton, který je levnější než teplotnosné médium, které betonu jen předá svoji energii. Tento rozdíl můžeme vidět u elektráren na principu parabolických koryt (dnes nejvíce rozšířené koncentrované sluneční elektrárny), kde se cena za kilowatthodinu pohybuje mezi 0,15 USD až 0,2 USD a právě u elektráren se solární věží a skladem by mohla jedna kilowatthodina stát mezi 0,11 USD až 0,16 USD [12][24].

Tabulka 1: Porovnání médií používaných v koncentrovaných solárních elektrárnách<sup>1</sup>

	Provozní teplota (při tlaku 1 atm)	Hustota	Bod tání	Měrná tepelná kapacita	Tepelná vodivost	Viskozita	Cena
	°C	kg/m <sup>3</sup>	°C	kJ/(kg*K)	mW/(m*K)	mPa*s	\$/kg
Voda	90	965,3	0	4,21	672,88	0,315	0
Vzduch	700	0,363	-217,15	1,136	66,32	0,041	0
Therminol VP-1	393	680	12	2,75	780	0,12	2,1
Syntetický olej	350	755	-20	2,4	95,3	0,25	3
Minerální olej	300	800	-20	2,8	83	0,7	0,3
Solar salt	600	2200	220	1,1	560	3,26	0,5
Tekutý sodík	800	763	98	1,26	51,5	0,21	2
Hitec	535	1980	142	1,4	440	20	0,93
Hitec XL	300	1992	120	1,45	520	6,37	1,1
Dowtherm A	405	672,5	15	2,725	77,1	0,12	4

## 2.2 Výčet nejpožívanějších médií v koncentrovaných solárních elektrárnách

Výčet médií je vzat z akumulacních elektráren používaných v praxi po celém světě. Využívá se i jiných látek, avšak následující jsou v největším zastoupení. Teploty udávané v této kapitole jsou uváděny při práci média za atmosférického tlaku [29].

### 2.2.1 Voda

Voda je výborným médiem využívaným v aplikacích s nízkou teplotou. Provozní teplota se pohybuje v rozsahu 25 - 90 °C. Mezi její výhody patří nízké náklady, netoxičita, velké specifické teplo a snadná dostupnost. Avšak má i několik nevýhod, kterými jsou například vysoký tlak par a korozivnost s určitými materiály. Tepelné využití má voda hlavně při dodávkách teplé vody a ve vytápění obytných prostor. V solárních elektrárnách se používá voda s příměsí různých solí pro lepší sběr solární tepelné energie za nižších teplot (50 - 90 °C) [12][15]. Nejvíce se voda používá v přečerpávacích vodních elektrárnách.

### 2.2.2 Vzduch

Vzduch se v koncentrovaných slunečních elektrárnách prakticky nepoužívá (převážně jen pro experimentální pokusy). Za tímto účelem byl zkonstruován systém pro komerční využití v Německu s výkonem 1,5 MW. Vzduch v této elektrárně dokáže za atmosférického tlaku pracovat při teplotách kolem 700 °C. Mezi největší výhody této technologie jsou její

<sup>1</sup> Informace získané z [12][15][26][27][28][29][30][31][32]

nízké náklady a vysoká účinnost vzhledem k množství a ceně vzduchu, která je nulová. Vzduch má také dobré vlastnosti, co se týče jeho průtoku potrubím. I když má vzduch horší tepelnou vodivost než jiná používaná média (tekuté soli atd.), tak právě efektivní průtok vzduchu potrubím zvyšuje jeho efektivnost při přenosu tepla [15]. Největší využití má však vzduch v akumulacích elektrárnách na stlačený vzduch, protože, jak napovídá název, je dobře stlačitelný a díky tomu mají tyto elektrárny výborné akumulační vlastnosti.

### 2.2.3 Therminol VP-1

Teplonosná syntetická kapalina Therminol VP-1 byla navržena pro přenos vyšších teplot, které splňuje jak v kapalně, tak v plynné formě. Toto médium má nejvyšší tepelnou stabilitu (mezi organickými kapalinami) a pracuje mezi 12 °C a 400 °C. Je vhodné k úpravě smícháním s dalšími difenyloxidovými / bifenylovými tekutinami, aby se v konkrétní aplikaci docílilo co největší účinnosti. V oblastech, kde teplota ovzduší klesá pod 12 °C, musí být zabráněno tuhnutí látky v potrubí dostatečným vytápěním [34].

### 2.2.4 Syntetický a minerální olej

Obě tyto látky patří do skupiny termálních olejů. Mají podobné některé vlastnosti jako například bod tání nebo tepelnou vodivost, ale liší se v například v provozní teplotě, kdy minerální olej dokáže pracovat do 300 °C a syntetický olej do 350 °C. I cena je u minerálního oleje nižší a to o 2,7 \$/kg oproti syntetickému oleji. Velikou výhodou těchto médií je jejich bod tání, který je -20 °C, takže mohou sloužit i v oblastech, kde teplota klesá k bodu mrazu, tudíž nepotřebují dodatečný ohřev [15][35].

### 2.2.5 Solar salt (NaNO<sub>3</sub> (60 %)–KNO<sub>3</sub> (40 %))

Jedná se o směs dusičnanů, která dokáže pracovat až do 600 °C, takže je vhodná pro vysokoteplotní aplikace. Její výhodou je i nízká cena kolem 0,5 \$/kg. Celkovou cenu akumulačního systému ovšem kazí bod tání této látky, který je na 220 °C což představuje konstruktérské výzvy. Je potřeba neustálá kontrola teploty systému, aby v něm médium nezamrzlo. To vede k dalším instalačním a provozním nákladům ve srovnání s ostatními systémy. Problémem také je, že objemová expanze látky spojená s přetavením soli má také za následek potencionální poškození součástí systému, tudíž systém je dražší kvůli vyššímu dimenzování. Posledním větším problémem je fakt, že látky s vyšším bodem tuhnutí mají i větší viskozitu při vyšších teplotách, což vede na vyšší náklady na čerpání média [15][36].

### 2.2.6 Kapalný sodík

Kapalný sodík má hodně široké pracovní spektrum a to od 98 °C do 883 °C. Účinnost této látky v koncentrovaných solárních elektrárnách dosahuje 88 - 96 %, avšak jeho hlavní nevýhodou je vysoká hořlavost při kontaktu s vodou. To je hlavní důvod, proč se od tekutého sodíku v dnešní době spíše upouští a používají se bezpečnější tekuté soli [37]. Dalším problémem jsou vysoké náklady tekutého dusíku, které jsou čtyřikrát vyšší než u tekutých solí. Výhodou však je jeho malá náchylnost ke korozi, díky čemuž má nižší náklady na systém elektrárny [15].

### 2.2.7 Hitec ( $\text{NaNO}_3$ (7 %)– $\text{KNO}_3$ (53 %)– $\text{NaNO}_2$ (40 %))

Hitec je směs vytvořená z alkalických dusičnanů / dusitanů, která se v solárních tepelných elektrárnách používá jako médium pro přenos tak i jako akumulací materiál pro uchování tepla. Jednou z hlavních výhod u této směsi je teplota tání 142 °C, což je téměř o 80 °C méně, než je u Solar salt. Další výhodou je malá náchylnost ke korozi, ovšem na rozdíl už od zmíněných tekutých solí, dokáže pracovat s teplotou jen do 535 °C, jinak dochází k velkému úbytku hmotnosti (ztrátám). Při vyšších pracovních teplotách se její viskozita podobá viskozitě vody a tepelná vodivost se zvýší až na dvojnásobek hodnot, které jsou u organických tekutin pro přenos tepla [15].

### 2.2.8 Hitec XL ( $\text{NaNO}_3$ (7 %)– $\text{KNO}_3$ (45 %)– $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (48 %))

Hitec XL je směs sodíkových, draslíkových a vápníkových dusičnanů. Výhodou této směsi je její teplota tání 120 °C, která je o 20 °C nižší než u Hitec a o 100 °C nižší než u Solar salt. To usnadňuje řešení problému tuhnutí tekutiny v trubkách systému tepelné solární elektrárny. Velkou nevýhodou je mezní tepelná stabilita, kterou má látka na teplotě 500 °C [15].

### 2.2.9 Dowtherm A

Dowtherm A jako tekutina pro přenos tepla je eutektická směs složená ze dvou stabilních organických sloučenin bifenyly ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ ) a difenyl oxidu ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}$ ). Tyto dvě sloučeniny mají podobné vlastnosti, tudíž lze se směsí zacházet, jako by to byla jedna sloučenina. Toto médium lze použít v aplikacích využívajících jak kapalné, tak plynné skupenství pro přenos tepla. Rozsah teplot, ve kterých může být médium využíváno, je od 15 °C do 400 °C při tlaku od atmosférického po 10,6 baru [38].



### 3 Metody měření průtoků médií

Pod pojmem měření průtoků jsou označovány tři pojmy v závislosti na veličině, kterou je potřeba sledovat. Tyto pojmy jsou: rychlost proudění, objemový průtok a hmotnostní průtok. Každý takovýto pojem (měřicí metoda) se liší pro různé aplikace [39].

Objemový průtok stanovuje průchod jednotky objemu média za jednotku času (např.: litry za minutu). Pro toto měření se nejvíce využívá tlakového spádu (neboli rozdílu tlaků) v místě kolem škrtícího orgánu potrubí. Další metodou je pak měření rychlosti proudícího média v potrubí o známém průřezu. Pro oba tyto způsoby určování objemového průtoků musí platit několik předpokladů (např.: proudící médium musí protékat celým průřezem potrubí), které se nemusejí shodovat s reálnými podmínkami při měření. Jinou běžně používanou metodou je dávkovací průtokoměr. Toto zařízení měří objem protékaného média počítáním nespojitých objemů tekutiny při průchodu měřidlem. Měření objemových průtoků se nejvíce využívá pro účely řízení systémů, u kterých je nejdůležitější co největší spolehlivost a opakovatelnost, než například velká přesnost. U těchto způsobů je většinou potřeba dělat korekci objemového průtoků při změnách teplot a tlaků. U měření plynů a páry se korekce provádí vždy kvůli jejich velké stlačitelnosti [39]. Výsledek z měření může být objemový průtok (viz rovnice (1)), nebo u měřidel vybavenými integračními zařízeními celkové proteklé množství (viz rovnice (2)) [40]:

$$Q_v = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Z níž můžeme vyjádřit objem média:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_v dt \quad (2)$$

Kde:  $Q_v$  je objemový průtok ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )

$V$  je objem ( $m^3$ )

$t$  je čas ( $s$ )

Hmotnostní průtok stanovuje průchod jednotky hmotnosti média za jednotku času (např.:  $kg/min$ ). Existují dvě metody pro přímé měření hmotnostního průtoků. Ani jedna z nich nevyžaduje kompenzaci teploty a tlaku na výstupu z měřidla. Nejpoužívanější a zároveň nejpřesnější metody (neuvažujeme-li laboratorní měření) jsou ty, které využívají



Coriolisův princip, který se používá v průmyslovém měření. Hmotnostní průtok se může také určovat ze součinu objemového průtoky při dané hustotě média. Tato metoda je méně přesná, protože se jedná o nepřímou metodu měření [39]. Výsledek měření může být udáván jako hmotnostní průtok (viz rovnice (3)) nebo jako celková hmotnost proteklého média (viz rovnice (4)) [40]:

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad (3)$$

Z níž můžeme vyjádřit hmotnost média:

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt \quad (4)$$

Kde:  $Q_m$  je hmotnostní průtok média ( $kg \cdot s^{-1}$ )

$m$  je hmotnost proteklého množství média ( $kg$ )

$t$  je čas ( $s$ )

Proteklé množství udává hmotnost nebo objem média, které proteklo potrubím za danou dobu. Příkladem těchto průtokoměrů mohou být plynoměry a vodoměry používané v domácnostech.

### 3.1 Faktory ovlivňující průtok tekutin

Na výsledky měření objemového průtoky médií mají vliv jejich vlastnosti jako například hustota, viskozita nebo rychlost proudění.

Hustotu definujeme jako hmotnost definovaného objemu tekutiny. V případě plynu se jeho hmotnost rovná počtu všech molekul pohybujících se v určitém objemu plynu. Hustota je proto přímo závislá na teplotě a tlaku. Pokud médiu plynu roste teplota při konstantním tlaku, zabírají jednotlivé molekuly větší objem, což způsobuje pokles hustoty. V opačném případě, kdy v médiu roste tlak při konstantní teplotě, přibližují se molekuly blíže k sobě a hustota roste. Proto je třeba u přístrojů používaných k měření průtoků plynů nebo páry měřit i teplotu a tlak média a jejich vlivy kompenzovat. U většiny metod měření hustoty je potřeba odebírání vzorků média kvůli přesnosti, čímž se zvětšuje složitost zařízení.

Viskozita média udává, jak médium protéká potrubím. Čím větší je viskozita, tím větší má kapalina odpor při tečení. Tato vlastnost je závislá na teplotě. Ve většině případů platí, že

čím vyšší má kapalina teplotu, tím nižší je její viskozita a má tudíž lepší průtok. U plynů na rozdíl od kapalin je při vyšších teplotách vyšší viskozita, protože se zvyšuje počet srážek a rychlost molekul média [39]. V praxi je rozlišována dynamická a kinematická viskozita. Dynamická viskozita je definována jako součinitel úměrnosti mezi stykovým napětím v tekutině a gradientem rychlosti tekoucího média ve směru kolmém k ploše, na níž je napětí sledováno. Dynamická viskozita vychází z rovnice (5) pro smykové napětí  $\tau$ :

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (5)$$

Kde:  $\tau$  je smykové napětí ( $Pa$ )

$\eta$  je dynamická viskozita ( $Pa.s$ )

$v$  je rychlost kapaliny ( $m.s^{-1}$ )

$y$  je souřadnice, na které závisí velikost rychlosti v souřadnicovém systému (-)

Výpočet kinematické viskozity  $\nu$  můžeme vidět v rovnici (6) [41]:

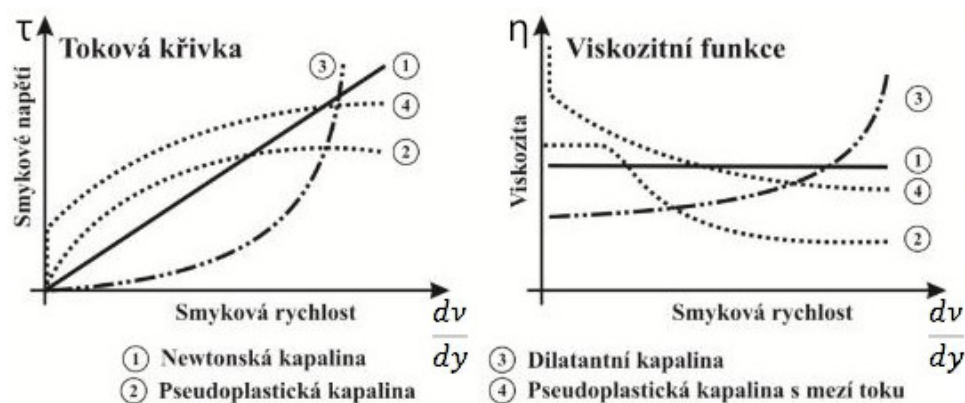
$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (6)$$

Kde:  $\nu$  je kinematická viskozita ( $m^2.s^{-1}$ )

$\eta$  je dynamická viskozita ( $Pa.s$ )

$\rho$  je hustota tekutiny ( $kg.m^{-3}$ )

Některé média (např.: neneutonské kapaliny, které mají viskozitu závislou na rychlosti, kterými se mezi sebou pohybují jednotlivé vrstvy kapaliny) mají však rozdílné chování, proto je nutné se při aplikování médií důkladně seznámit s jejich fyzikálními vlastnostmi (viz Obr. 10).



Obrázek 10. Závislost smykového napětí na smykové rychlosti a dynamické viskozity na smykové rychlosti pro běžné typy newtonských kapalin [33]

Všechny tyto vlivy na proudění média vyjadřuje tzv. Reynoldsovo číslo vztažené na průměr potrubí, které charakterizuje proudění viskózní tekutiny. Reynoldsovo číslo lze spočítat z rovnice (7):

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad (7)$$

Kde:  $Re$  je Reynoldsovo číslo (-)

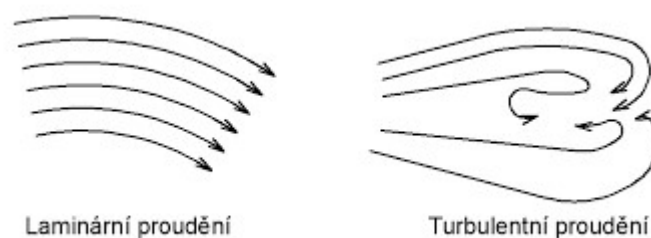
$v_s$  je střední rychlost proudění ( $m \cdot s^{-1}$ )

$d$  je průměr měrného kanálu ( $m$ )

$\nu$  je kinematická viskozita ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

Reynoldsovo číslo určuje, zda-li se jedná o proudění laminární nebo turbulentní. Pokud je Reynoldsovo číslo menší než 2000, jde o proudění laminární. Je-li však větší než 4000, jedná se o proudění turbulentní. Oblast mezi 2000 – 4000 se nazývá nestabilní, proto se o ní mluví, jako o oblasti s přechodovým prouděním.

Laminární proudění je takové proudění (viz Obr. 11), při kterém se tekutina pohybuje plynule s mírným míšením v uspořádaných vrstvách ve směru hlavního směru proudu média. Uprostřed potrubí se vrstvy pohybují nejrychleji, zatímco na krajích nejpomaleji. To je díky odporovým silám působících na stěnách potrubí, které značně snižují rychlost proudění v těchto místech. Při turbulentním proudění (viz Obr. 11) se tekutina promíchává a plynulý pohyb vrstev je nahrazen náhodným nepravidelným vířením. Rychlost tekutiny při turbulentním proudění je téměř stejný jak uprostřed potrubí, tak u stěn.



Obrázek 11. Rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním [43]

Chyby při měření mohou způsobovat také víry, které vznikají průtokem tekutiny koleny, ventily a jinými hydraulickými členy, které mění geometrii potrubí, protože v těchto místech působí na médium “kroutící” moment. Řešení těchto problémů je umístění průtokoměrů s dostatečnou vzdáleností od sebe ve směru toku média za hydraulickými členy [39].

### 3.2 Metody a měřidla pro měření tlaku před a za prvkem průtokoměru

Na tomto principu je založeno velké množství průtokoměrů. Tyto průtokoměry se dělí na několik kategorií. Jako základní průtokoměry se berou škrticí klapky, do kterých patří clona, dýza, Venturiho trubice atd. Dále sem můžeme zařadit rychlostní sondy, kolenový průtokoměr, plováčkové průtokoměry atd. Při měření musíme brát v úvahu zákon zachování mechanické energie v tekutinách, který říká, že při konstantních podmínkách se při zvyšující se rychlosti tekutiny snižuje její tlak. K této situaci dochází, když se do potrubí, ve kterém proudí tekutina, vloží překážka. Rychlost proudící tekutiny (její kinetická energie) roste při průchodu překážkou s tím, že se změní její tlak (potenciální energie). Tento rozdíl v tlacích je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění (musíme brát v úvahu i tvar překážky). Tyto tlakové poměry jsou vyjádřeny z Bernoulliho rovnice (8) [44][45]:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + h\rho g + p = konst. \quad (8)$$

Kde:  $\rho$  je hustota tekutiny ( $kg.m^{-3}$ )

$v$  je rychlost proudění tekutiny ( $m.s^{-1}$ )

$h$  je výška ( $m$ )

$g$  je gravitační zrychlení ( $m.s^{-2}$ )

$p$  je tlak ( $Pa$ )

Po úpravě lze získat vztah pro rychlost proudění (viz rovnice (9)):

$$v = k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (9)$$

Kde:  $v$  je rychlost proudění tekutiny ( $m \cdot s^{-1}$ )

$k$  je konstanta určující vlastnosti primárního prvku průtokoměru (-)

$\Delta p$  je diferenční tlak ( $Pa$ )

$\rho$  je hustota tekutiny ( $kg \cdot m^{-3}$ )

### 3.2.1 Rychlostní sondy

Tyto sondy jsou uzpůsobeny k využití závislosti dynamického tlaku média na rychlosti jeho proudění [40].

#### 3.2.1.1 Pitotova trubice

Jednou z nejjednodušších sond je Pitotova trubice (viz Obr. 12). Je to pravoúhle zahnutá trubice a rovina jejího ústí se nachází kolmo k ose potrubí. U ústí se tekutina zbrzdí na nulovou rychlost a všechna kinetická energie se stane energií potenciální. Sonda tedy snímá celkový tlak  $p_c$ , což je tlak součtu statického  $p_s$  a dynamického  $p_d$  tlaku [40]. Nevýhodou tohoto snímání je, že se statický tlak snímá na okraji potrubí, což je v jiném místě než se snímá celkový tlak  $p_c$ . Tato trubice se nejvíce používá pro měření plynů nebo velmi čistých kapalin z důvodu snadného zanesení měřidel [44]. Rovnice pro celkový tlak poté vychází z rovnice (10):

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (10)$$

Kde:  $p_c$  je celkový snímaný tlak ( $Pa$ )

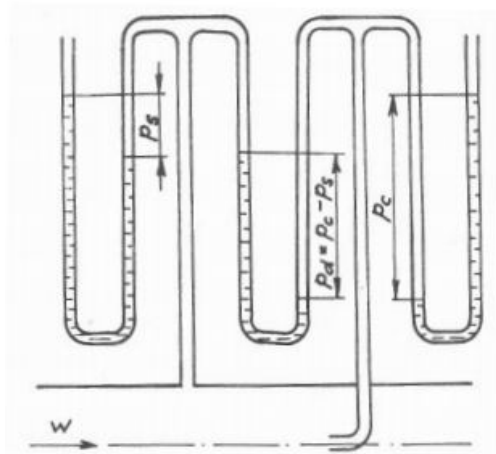
$p_s$  je statický tlak ( $Pa$ )

$p_d$  je dynamický tlak ( $Pa$ )

$\rho$  je hustota měřeného média ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$v$  je rychlost proudění ( $m \cdot s^{-1}$ )

Z této rovnice pak po vyjádření vznikne právě Bernoulliho rovnice pro rychlost tekutiny.



Obrázek 12. Princip činnosti Pitotovy trubice [46]

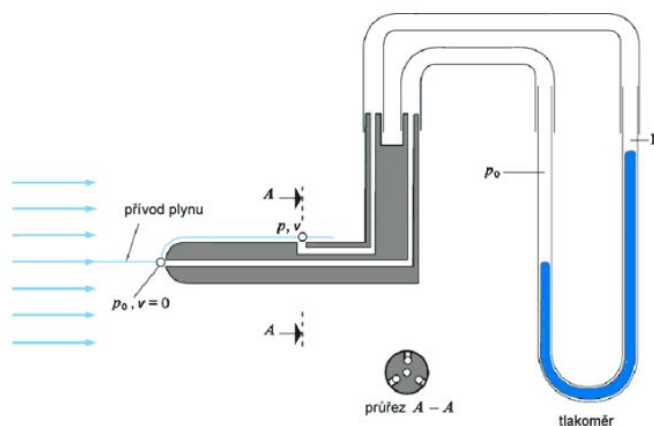
Kde:  $p_s$  je statický tlak ( $Pa$ )

$p_d$  je dynamický tlak ( $Pa$ )

$p_c$  je celkový tlak ( $Pa$ )

### 3.2.1.2 Prandtlova trubice

Dalším měřidlem je Prandtlova trubice (viz Obr. 13), která je konstrukčně uzpůsobena tak, že dokáže měřit oba tlaky (statický  $p_s$  a dynamický  $p_d$ ) na jednom místě [40]. Jde o válec se zakulaceným koncem, který je proti proudu tekutiny, celkový tlak je snímán v čele sondy a tlak statický je snímán v kanálcích ve válcové části sondy [44].



Obrázek 13. Prandtlova trubice [46]

Kde:  $p_0$  je tlak statický ( $Pa$ )

$p$  je tlak dynamický ( $Pa$ )

$v$  je rychlost média ( $m \cdot s^{-1}$ )

### 3.2.2 Průřezová měřidla

Měřicí přístroje využívají fyzikálních jevů, které nastanou při zúžení průtočného průřezu. V potrubí je umístěn tzv. škrťací orgán, který zmenšuje průtočnou plochu. Tlaky média před a za zúžením jsou závislé na velikosti průtoku snímané diferenčním tlakoměrem. Tyto přístroje jsou nejpoužívanější k měření průtoku kapalin i plynů, které mohou být ve velkém rozsahu teplot a tlaků [40]. Průtok tekutiny se určí z rovnice (11) níže [46]:

$$Q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (11)$$

Kde:  $Q_v$  je objemový průtok ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )

$\alpha$  je průtokový součinitel škrťacího orgánu, který závisí na Reynoldsově čísle, můžeme ho najít v tabulkách či nomogramech (-)

$\varepsilon$  je expanzní součinitel (pro kapaliny 1, pro plyny lze najít v nomogramech) (-)

$d$  je průměr škrťacího orgánu ( $m$ )

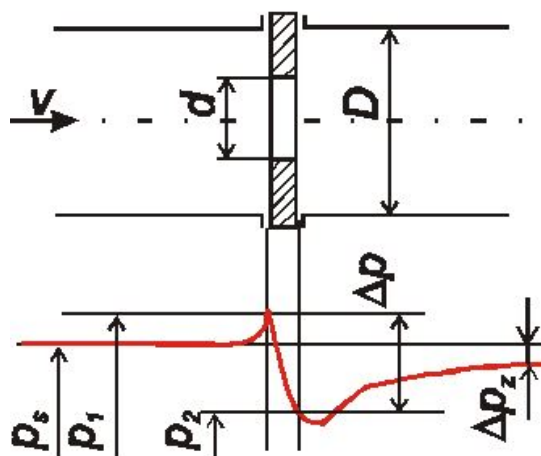
$\Delta p$  je diferenční tlak ( $Pa$ )

$\rho$  je hustota měřené kapaliny ( $kg \cdot m^{-3}$ )

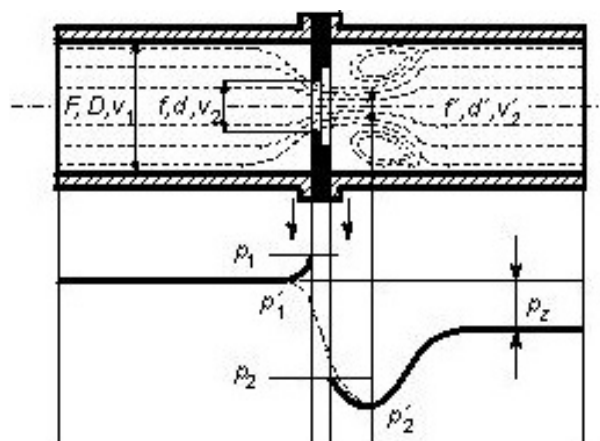
$\pi$  je Ludolfovo číslo (-)

#### 3.2.2.1 Clona

Clona (viz Obr. 14 a Obr. 15) je prakticky plochá dřevá deska z kovu, která je vložena mezi přírubami do potrubí, jak je uvedeno na Obrázku 14. Velikost otvoru a umístění desky závisí na charakteru měřeného média. Odebírání tlaku je prováděno těsně kolem desky dvěma základními způsoby: koutové odběry a přírubové odběry. K základním typům clon patří např.: clona soustředná, excentrická a segmentová. Clony se využívají k měření průtoku většiny čistých tekutin. Jejich nevýhodou je, že jsou náchylné vůči opotřebení, ke kterému dochází znečištěným médii nebo médii obsahující částice [44].



Obrázek 14. Clona [40]



Obrázek 15. Princip činnosti clony [40]

Kde:  $v$  je rychlost proudění ( $m \cdot s^{-1}$ )

$d$  je průměr otvoru škrťacího orgánu ( $m$ )

$D$  je průměr potrubí ( $m$ )

$F$  je průřez potrubí ( $m^2$ )

$f$  je průřez škrťacího orgánu ( $m^2$ )

$p_s$  je vstupní statický tlak ( $Pa$ )

$p_1$  je snímaný tlak před škrťacím orgánem ( $Pa$ )

$p_2$  je snímaný tlak za škrťacím orgánem ( $Pa$ )

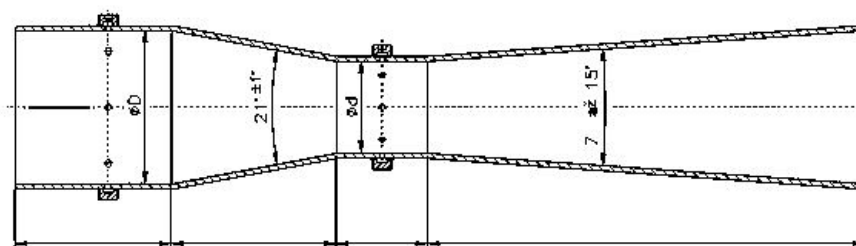


$\Delta p$  je diferenční tlak ( $p_1 - p_2$ ) (Pa)

$\Delta p_z$  je trvalá tlaková ztráta (Pa)

### 3.2.2.2 Venturiho trubice

U tohoto měřidla (viz Obr. 16) se zrychluje tekutina v kuželovém konfuzoru, proto dochází k místnímu poklesu statického tlaku. V další části potrubí (difuzoru) se vrací tlak na téměř stejnou úroveň, jakou měl před zúžením. Výhodou u tohoto měřidla je menší ztráta tlaku média, než u clony a zároveň vysoká přesnost měření. Nevýhodou je, že jsou poměrně drahé a tak se využívají velmi zřídka [44].



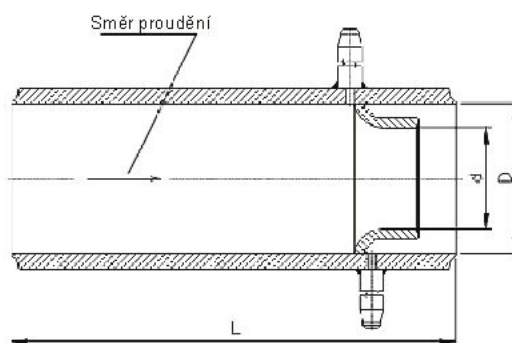
Obrázek 16. Venturiho trubice [44]

Kde:  $D$  je průměr trubice před zúžením (m)

$d$  je průměr trubice v zúžení (m)

### 3.2.2.3 Dýza

Dýza (viz Obr. 17) představuje kompromis mezi clonou a Venturiho trubicí. Dýza nemá na rozdíl od Venturiho trubice difuzor. Výhodou je, že dýza dokáže měřit průtok i médií, které obsahují větší pevné částice a navíc je levnější než Venturiho trubice. Její nevýhodou však je menší přesnost při měření a větší tlaková ztráta média [44].



Obrázek 17. Dýza [44]

Kde:  $D$  je průměr dýzy před a za zúžením (m)

$d$  je průměr dýzy v zúžení ( $m$ )

$L$  je délka potrubí ( $m$ )

### 3.2.3 Kapilární průtokoměr

Toto zařízení (viz Obr. 18) se využívá hlavně v laboratořích pro měření malých průtoků. V tomto případě je škrtícím elementem kapilára, která snímá rozdíl tlaků diferenčním tlakoměrem. Pro tato měřidla platí Hagen-Poiseuillova rovnice (12):

$$V = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1 - p_2) \quad (12)$$

Kde:  $V$  je objemový průtok ( $m^3$ )

$d$  je průměr kapiláry ( $m$ )

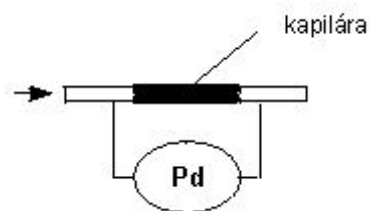
$l$  je délka kapiláry ( $m$ )

$\eta$  je dynamická viskozita ( $Pa \cdot s$ )

$p_1, p_2$  jsou tlaky před a za kapilárou ( $Pa$ )

$\pi$  je Ludolfovo číslo (-)

Kvůli přesnosti se do potrubí zařazuje místo jedné kapiláry soustava paralelně zapojených kapilár. Mezi důležité podmínky pro instalování kapilárních průtokoměrů patří čistota měřeného média, definované složení a známá hodnota dynamické viskozity [40].

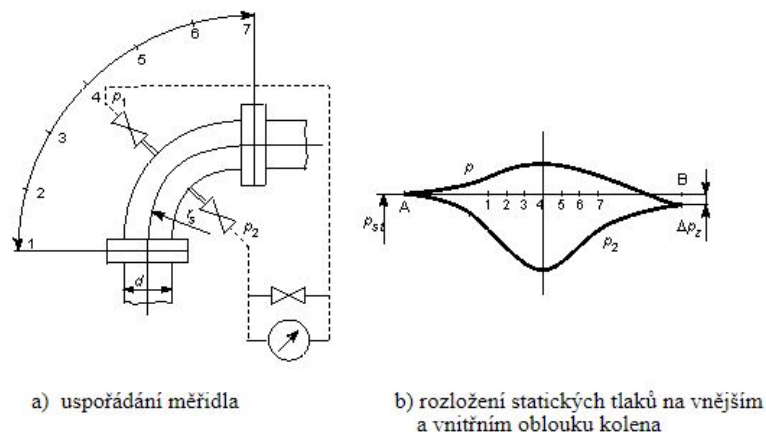


Obrázek 18. Kapilární průtokoměr [40]

### 3.2.4 Kolenový průtokoměr

Kolenový průtokoměr (viz Obr. 19) využívá k měření rozdíl tlaků, který vzniká průchodem média zakřiveným potrubím. Médium proudící kolenem, zabudovaným za přímým úsekem potrubí, se vlivem působení sil, které jsou vyvolány změnou směru proudu, mění rozložení rychlosti a statických tlaků v radiálním směru zakřivení. Výsledkem této změny je

zvýšení tlaku na straně vnějšího (většího) oblouku a pokles tlaku na straně vnitřního (menšího) oblouku v porovnání s tlakem nacházejícím se v přímé části potrubí. Rozdíl tlaku mezi měřicími body v kolenu je funkcí rychlosti proudících částic ( $m \cdot s^{-1}$ ) a tudíž i funkcí průtoku ( $m^3$ ). Největší rozdíl tlaku v ose souměrnosti kolena se měří diferenčním tlakoměrem [40].



Obrázek 19. Kolenový průtokoměr s grafem rozložení tlaků v kolenu [40]

Kde:  $p_1$  je statický tlak na vnějším oblouku kolena ( $Pa$ )

$p_2$  je statický tlak na vnitřním oblouku kolena ( $Pa$ )

$d$  je průměr potrubí kolena ( $m$ )

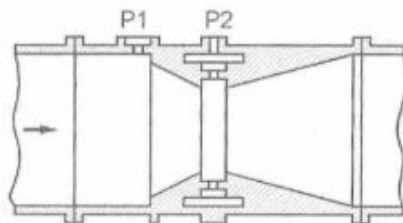
$\Delta p_z$  je tlak ztracený v měřidle ( $Pa$ )

$p_{st}$  je tlak v přímé části potrubí ( $Pa$ )

A, B jsou body začátku a konce měření

### 3.2.5 Dallova trubice

Dallova trubice se tvarem podobá Venturiho trubici (viz Obr. 20), liší se tím, že je kratší a neobsahuje zaoblené úseky. Je tvořena ze dvou kuželů otočených proti sobě odděleným hrdlem, ve kterém je úzká odběrová štěrbin, která ústí do odběrové komory. Největší výhodou Dallovy trubice je velmi nízká trvalá ztráta tlaku. Je o 30 – 50 % menší, než trvalá ztráta klasické Venturiho trubice. Dallova trubice je vhodná pro měření stejnorodých a čistých médií (kapaliny, plyny, páry a jiné technické plyny). Naopak není vhodná pro měření médií s obsahem pevných příměsí, protože se sedimenty mohou usazovat v odběrové štěrbině [47].



Obrázek 20. Dallova trubice [48]

### 3.3 Měření rychlosti proudění tekutiny

Signál z výstupu snímače průtokoměru je lineárně závislý na průtoku média na rozdíl od měření rozdílu tlaků, kde je závislost kvadratická. To snižuje chybovost při odmocňování. Při tomto měření se stanovuje objem protečeného média ze vztahu (13):

$$Q_v = \vec{v} \cdot S \quad (13)$$

Kde:  $Q_v$  je objemový průtok ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )

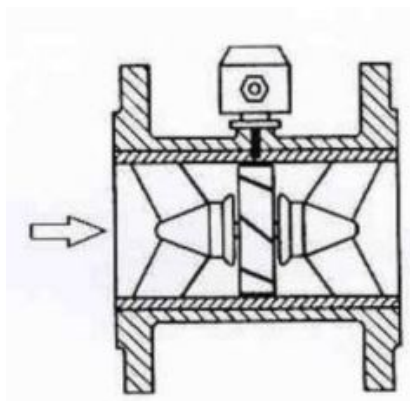
$v$  je střední rychlost proudění tekutiny ( $m \cdot s^{-1}$ )

$S$  je průřez potrubí ( $m^2$ )

Mezi průtokoměry pracující na tomto principu patří: turbínkové průtokoměry, vírové průtokoměry, elektromagnetické průtokoměry a ultrazvukové průtokoměry [44].

#### 3.3.1 Turbínkové průtokoměry

Hlavním komponentem turbínkových průtokoměrů je volně otočný rotor s lopatkami (viz Obr. 21). Průtokem média v potrubí dochází k otáčení rotoru. Otáčky rotoru jsou tedy úměrné rychlosti proudění média. Ke snímání otáček se používá bezdotykový indukční snímač, který vysílá impulsy k dalšímu zpracování a vyhodnocení. Výhodou těchto průtokoměrů je jejich využití v širokém rozsahu měřených rychlostí. Nejvíce jsou využívány pro měření průtoku vody. Nevýhody těchto průtokoměrů jsou: nevyužitelnost u médií, které při průtoku potrubím víří, nelze s nimi měřit média s vysokou viskozitou a kvůli pohyblivým částem jsou i náchylné na opotřebování a usazování nečistot [44].



Obrázek 21. Turbínkový průtokoměr [49]

### 3.3.2 Vírové průtokoměry

Průtokoměry vírové pracují na Karmanově efektu, při kterém se v tekutině obtékající po stranách neaerodynamickou překážku oddělují víry, vytvářející tzv. von Karmanovu stezku (viz Obr. 22 a 23). Rychlost vytváření vírů je částečném rozsahu hodnot Reynoldsova čísla rovna rychlosti proudění tekutiny a tudíž i velikosti průtoku. Tuto skutečnost popisuje rovnice (14).

$$\frac{Q_v}{f \cdot D^3} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{S_r} \cdot \frac{b}{D} \quad (14)$$

Kde:  $Q_v$  je objemový průtok ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )

$f$  je základní frekvence vloženého tělesa ( $Hz$ )

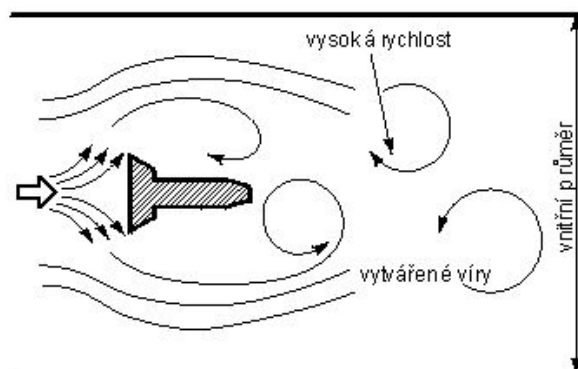
$D$  je průměr potrubí ( $m$ )

$b$  je šířka čelní plochy vloženého tělesa ( $m$ )

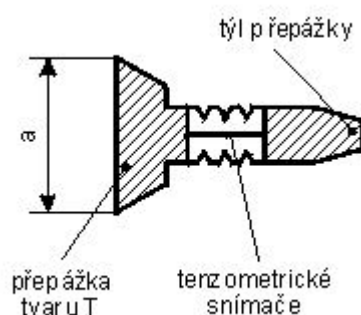
$S_r$  je Strouhalovo číslo vyjadřující rychlost změny rychlostního pole tekutiny v závislosti na čase (-)

$\pi$  je Ludolfovo číslo (-)

Vznik takovýchto vírů je doprovázen tlakovou nebo rychlostní změnou, která je snímána a převedena na elektrický signál. Výhodou těchto průtokoměrů je, že nejsou citlivé na změny v teplotě, tlaku nebo hustotě média. Další výhodou je, že ztráta tlaku média u těchto měřidel je zanedbatelná. Nevýhodou však je, že s nimi nelze měřit při malých rychlostech proudění média a také tekutiny s viskozitou nad 30 mPa.s [44].



Obrázek 22. Vírový průtokoměr [40]



Obrázek 23. Zábřana a snímač vírového průtokoměru [40]

Kde:  $a$  je šířka překážky ( $m$ )

### 3.3.3 Indukční průtokoměry

Indukční průtokoměry používají k měření princip Faradayova zákona pro elektromagnetickou indukci. Pohybem protékané tekutiny v homogenním magnetickém poli se na elektrodách, které jsou umístěny na stranách potrubí, indukuje elektrické napětí. Toto napětí můžeme vyjádřit ze základní rovnice pro indukované napětí ve vodiči, kterou upravíme na tvar (15):

$$U_i = B \cdot l \cdot v = B \cdot D \cdot \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot D^2} \quad (15)$$

Kde:  $U_i$  je indukované napětí ( $V$ )

$B$  je indukce magnetického pole ( $T$ )

$l$  je délka ( $m$ )

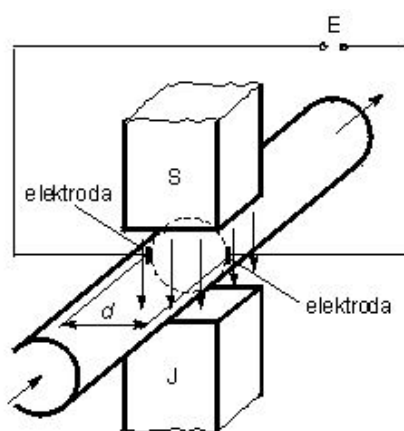
$v$  je rychlost proudění ( $m \cdot s^{-1}$ )

$D$  je průměr potrubí ( $m$ )

$Q_v$  je objemový průtok ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )

$\pi$  je Ludolfovo číslo (-)

Indukčním průtokoměrem (viz Obr. 24) lze měřit elektricky vodivé i nevodivé kapaliny. Podmínkou těchto měřičů je, že tekutina musí procházet celým průřezem potrubí, neboli potrubí musí být kompletně zaplněno touto kapalinou. Výhodou těchto průtokoměrů je, že nijak neovlivňují médium, tudíž nedochází k tlakovým ztrátám. Další výhodou je jejich spolehlivost, protože nemají žádné pohyblivé ztráty, proto u nich nedochází k opotřebování [44].



Obrázek 24. Indukční průtokoměr [40]

Kde: S je severní pól magnetu

J je jižní pól magnetu

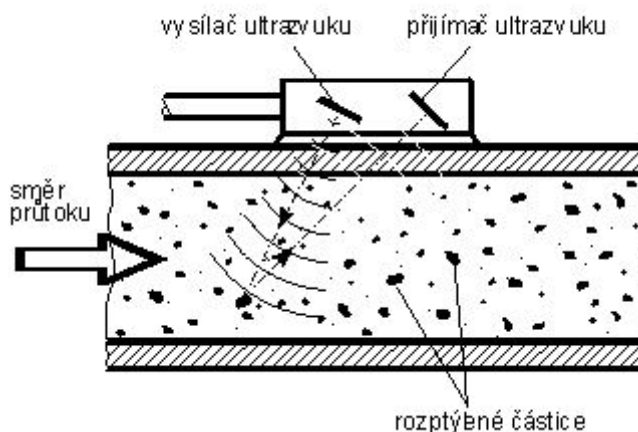
d je průměr potrubí ( $m$ )

E je elektromotorické napětí ( $V$ )

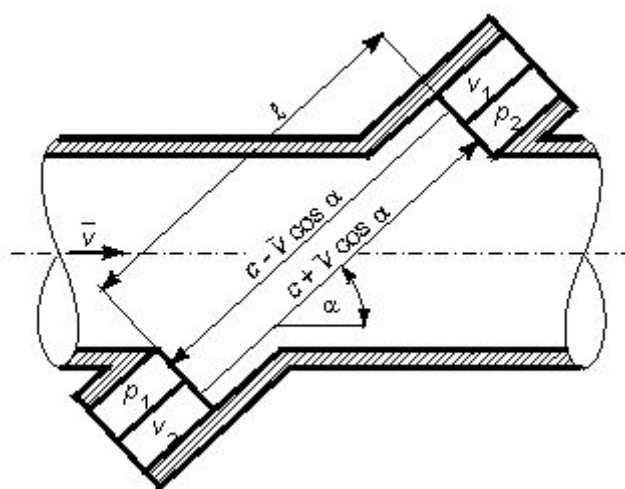
### 3.3.4 Ultrazvukové průtokoměry

Ultrazvukové průtokoměry využívají k měření rychlosti média ultrazvukové vlnění. Jsou to přístroje založené na principu Dopplerova jevu. Vysílají do proudícího média vlny o dané frekvenci a přijímají vlny odražené od bublin nebo pevných částic obsažených v médiu (viz Obr. 25). Díky odrazům má přijímané vlnění jinou frekvenci než vlnění vysílané. Tento rozdíl je přímo úměrný rychlosti proudění média v potrubí. Dalším ultrazvukovým typem průtokoměru mohou být přístroje, které pracují na principu měření doby průchodu vlny médiem (viz Obr. 26). Skládají se ze dvou vysílacích a dvou přijímacích jednotek umístěných

za sebou po směru proudění média. Jeden vysílač vysílá proti a druhý po směru proudění. Rozdíl rychlosti těchto dvou signálů je úměrný rychlosti proudění média. Tyto průtokoměry na rozdíl od těch využívajících Dopplerova jevu mohou měřit pouze čistá média. Jako u elektromagnetických průtokoměrů, tak i tyto jsou bezkontaktní, takže nezpůsobují žádnou tlakovou ztrátu měřenému médiu, ani nemají části, které by se opotřebovávaly pohybem [44].



Obrázek 25. Ultrazvukový průtokoměr na principu Dopplerova jevu [40]



Obrázek 26. Ultrazvukový průtokoměr [40]

Kde:  $v_{1,2}$  je vysílač impulzů

$p_{1,2}$  je přijímač impulzů

$c$  je rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí ( $m \cdot s^{-1}$ )

$v$  je střední rychlost proudícího média ( $m \cdot s^{-1}$ )

$\alpha$  je úhel natočení signálu oproti směru průtoku média ( $^\circ$ )



$l$  je vzdálenost mezi vysílači a přijímači ( $m$ )

### 3.3.5 Oscilační průtokoměry

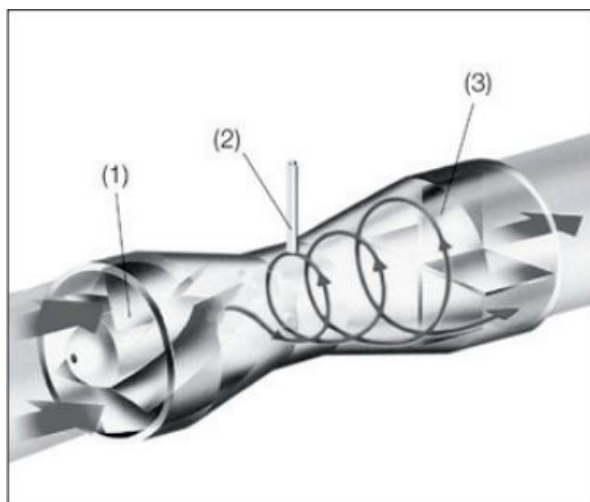
Oscilační průtokoměry (viz Obr. 27) pracují na principu, kdy je část média protékající potrubím vedena odtokem do měřicí komory. Komora se ještě dělí na dvě buňky, uklidňovací a měřicí. Médium je přiváděno do uklidňovací komory, na jejímž konci je tryska, která dodává plynu potřebnou rychlost. V měřicí buňce jsou dva kanály, mezi kterými je oscilační tělísko. Vlivem Coandova jevu přilne proud média k jedné straně oscilačního tělíska. To způsobí přetlak na jedné straně tělíska a na druhé podtlak. Tím se přesměruje proud do druhého kanálu a tlakové poměry se obrátí. Tento děj se periodicky opakuje a jeho frekvence je úměrná rychlosti proudění [50].



Obrázek 27. Oscilační průtokoměr [51]

### 3.3.6 Vířivé průtokoměry

Vířivý průtokoměr (viz Obr. 28) pracuje na principu víru proudu média. Na vstupu průtokoměru jsou umístěny usměrňovací lamely, které rozvířují proud měřeného média. Vír vytváří místa s nižším a vyšším tlakem, který se otáčí v ose proudu. Snímač, který je umístěn v cestě toku média snímá frekvenci nižšího a vyššího tlaku, která je úměrná rychlosti proudění média [52].



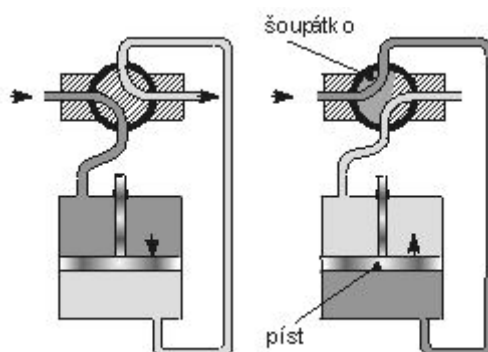
Obrázek 28. Princip vířivého průtokoměru (1 - vstupní zakřivené lopatky, 2 - piezoelektrický snímač, 3 - výstupní usměrňovací lopatky) [52]

### 3.4 Měření objemového průtoku

Průtokoměry, které přímo měří objem, pracují na principu rozdělení média do jednotlivých odměrných prostor se známým objemem. Ze známého objemu jednotlivých komor a vynásobením tohoto objemu počtem těchto komor se získá celková hodnota objemu média, které daným potrubím protéklo za určitý čas. Mezi tyto měřidla patří průtokoměr s krouživým pístem, oválové měřidlo, bubnové průtokoměry atd. Protože se průtokoměry skládají z velkého množství pohyblivých částí, tak jsou vhodné spíše k měření čistých médií, než médií znečištěných nebo obsahujících pevné částice. Způsobují také tlakovou ztrátu, a protože je nelze dostatečně utěsnit, nejsou vhodné pro měření plynů [44].

#### 3.4.1 Pístová měřidla

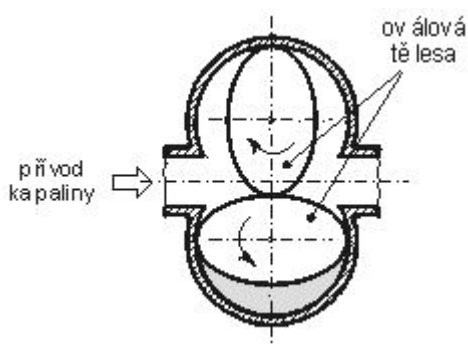
Pístová měřidla (viz Obr. 29) se řadí mezi nejpřesnější přístroje používané k měření protékajícího množství kapalin. Měřenou kapalinou jsou střídavě naplňovány a vyprazdňovány odměrné prostory, které jsou vymezeny pístem a tělesem měřidla. Účinkem tlakového spádu v měřidle dochází k pohybu pístu, který je spojen s počítadlem. U těchto měřidel se využívá dvou i více odměrných komor, jejichž funkce na sebe navazuje tak, aby byl chod měřidla a průtok média nepřerušovaný. Pístová měřidla mohou být použita i pro měření velmi viskózních médií [40].



Obrázek 29. Pístové měřidlo [40]

### 3.4.2 Tělesová (oválová) měřidla

Tělesová měřidla (viz Obr. 30) jsou velmi rozšířeným druhem objemových měřidel. Princip činnosti je založen na tom, že v komoře jsou dvě oválná tělesa, jejichž pohyb je vzájemně vázán prostřednictvím ozubených kol nebo ozubením přímo na tělesech. K otáčivému pohybu (i k odměřování kapaliny) oválných těles dochází kvůli rozdílu tlaku před a za tělesa. Tato měřidla jsou využívána k měření různých organických kapalin a médií vyráběných v petrochemickém a potravinářském průmyslu (např.: měření množství nadojeného mléka) [40].



Obrázek 30. Tělesové (oválové) měřidlo [40]

## 3.5 Měření hmotnostního průtoku

Těchto metod není mnoho. Hmotnostní průtok může být měřen nepřímo přepočtem z objemového průtoku nebo může být měřen přímo. Dvě základní měřidla pro přímé měření jsou [40]:

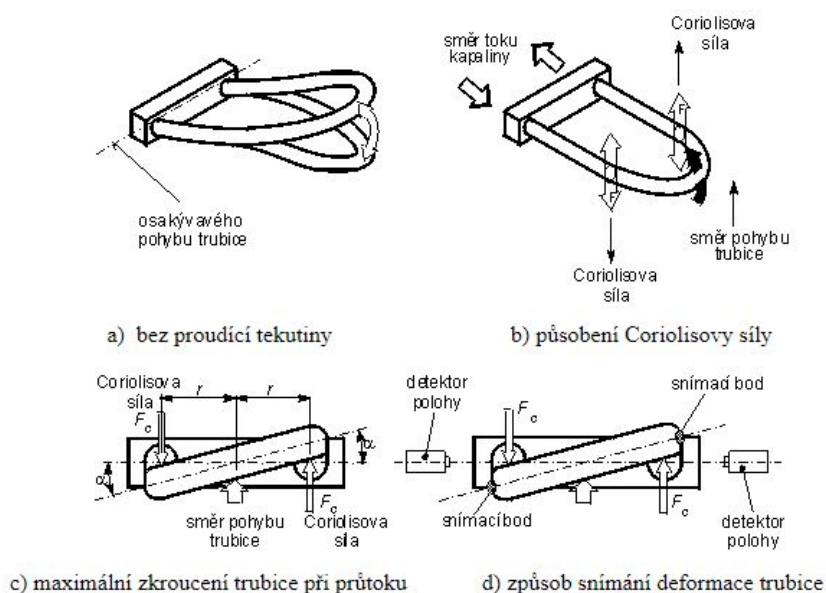
- Coriolisův průtokoměr
- Tepelný hmotnostní průtokoměr

### 3.5.1 Coriolisův průtokoměr

Průtokoměr tohoto typu používá k měření tzv. Coriolisovy síly vznikající v měřících trubicích, které při průtoku média vibrují (viz Obr. 31 a 32). Fázový posuv kmitů, které jsou díky této síle generovány, jsou úměrné hmotnostnímu průtoku tekutiny trubicí a zároveň, frekvence těchto kmitů odpovídá hustotě tekutiny. Výhodou těchto průtokoměrů je velice přesné měření hmotnostního průtoku, které je navíc nezávislé na teplotě, tlaku, viskozitě, obsahu pevných částic v tekutině, atd. [44]



Obrázek 31. Coriolisův průtokoměr [44]



Obrázek 32. Princip činnosti Coriolisova průtokoměru [40]

Kde:  $y$  je vzdálenost od středu ( $m$ )

$\alpha$  je úhel natočení ( $^\circ$ )

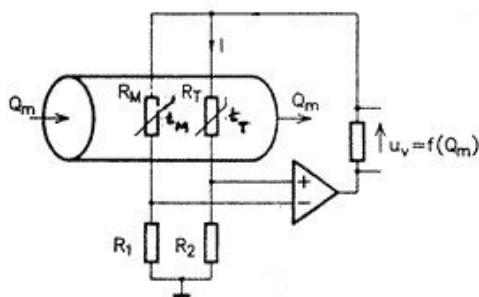
### 3.5.2 Tepelný hmotnostní průtokoměr

Princip činnosti těchto průtokoměrů vychází ze závislosti výměny tepla, které přechází od zdroje do proudící tekutiny, na hmotnostním průtoku. Můžeme je rozdělit na dva typy:

- Termoanemometry
- Kalorimetrické průtokoměry

#### 3.5.2.1 Termoanemometry

Termoanemometr je vyhřívaná sonda uložena v potrubí, kterým prochází médium (viz Obr. 25). Velikost odebíraného tepla sondy médiem je ovlivněna rychlostí proudění, tepelnou vodivostí a teplotou proudícího média, která musí být neustále měřena. Jako čidlo je v termoanemometrech používán platinový drátek o průměru 0,01 – 0,1 mm, který je zahříván na teplotu 200 – 500 °C [44].



Obrázek 33. Termoanemometr [53]

Kde:  $R_M$  je odporový snímač teploty

$R_T$  je elektricky vyhřívaný odporový snímač teploty

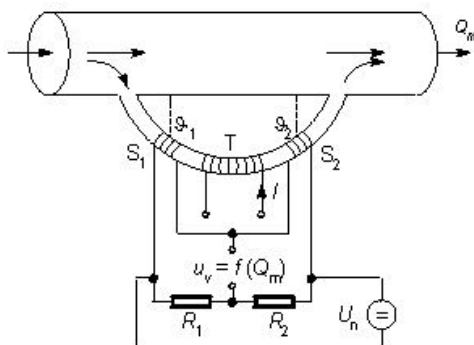
$Q_m$  je hmotnostní průtok ( $kg \cdot s^{-1}$ )

$u_v$  je napětí na měřícím odporu ( $V$ )

$R_1, R_2$  jsou rozdílové odpory ( $\Omega$ )

#### 3.5.2.2 Kalorimetrické průtokoměry

U těchto průtokoměrů je zdroj tepla umístěn do středu průřezu potrubí, kde jsou snímány teploty před a za zdrojem tepla (viz Obr. 34). Velikost průtoku média je určena z rozdílu těchto teplot [44].

**Obrázek 34. Kalorimetrický průtokoměr [40]**

Kde:  $Q_m$  je hmotnostní průtok ( $kg \cdot s^{-1}$ )

$\vartheta_1$  je teplota před čidlem ( $^{\circ}C$ )

$\vartheta_2$  je teplota za čidlem ( $^{\circ}C$ )

$S_1, S_2$  jsou odporové snímače teploty

T je topné vinut

$R_1, R_2$  jsou sériově řazené odpory

I je proud (A)

$U_n$  je jmenovité napětí zdroje (V)

$u_v$  je snímané napětí (V)

Tabulka 2: Přehled médií vhodných k měřícím metodám [44]

Průtokoměr	Rozsah ( $Q_{max}:Q_{min}$ )	Plyny, páry		Kapaliny				Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Přesnost měřené hodnoty	Tlaková ztráta
		A	B	A	B	C	D				
Normalizovaná clona	4:1	X	-	X	O	-	O	do 540	do 41	1-2%	velká
Excentrická clona	4:1	O	X	O	X	-	O	do 540	do 41	2%	velká
Segmentová clona	4:1	O	X	O	X	-	O	do 540	do 41	2%	velká
Venturiho trubice	4:1	X	O	X	O	O	O	do 540	do 41	1-2%	střední
Dýza	4:1	X	O	X	O	O	O	do 540	do 41	1-2%	velká
Pitotova trubice	3:1	X	-	X	-	O	O	do 540	do 41	5%	malá
Kolenový	3:1	X	O	X	O	-	O	do 540	do 41	5%	malá
Elektromagnetický (indukční)	10:1	-	-	X	X	X	X	do 180	do 10,5	1%	-
Vírový	20:1	X	O	X	O	-	O	do 430	do 10,5	1,50%	střední
Turbínkový	10:1	X	-	X	-	O	O	do 500	do 43	0,50%	velká
Ultrazvukový	30:1	-	X	-	X	O	O	do 300	do 10	5%	-
Coriolisův	80:1	O	-	X	X	X	O	do 200	do 10	0,20%	malá
Termoanemometr	50:1	X	-	O	-	-	-	do 65	do 31	1%	malá
Dávkovací průtokoměry	10:1	-	-	X	-	O	-	do 250	do 10	1%	střední

Kde: A je čistá tekutina

B je znečištěná tekutina

C je viskózní tekutina

D je korozivní tekutina

x je průtokoměr je určen přímo pro daný typ tekutiny

o je průtokoměr lze použít pro tento typ tekutiny

- je průtokoměr není určen pro tuto tekutinu

## 4 Možnosti měření průtoku médií z hlediska aplikace energy storage

Tato kapitola pojednává o třech médiích, která jsou nejvíce využívána v koncentrovaných solárních elektrárnách a možnosti měření jejich průtoku potrubím. Koncentrované solární elektrárny byly vybrány z důvodu jejich vysoké účinnosti a také kvůli jejich ekologičnosti, na kterou je v dnešní době kladen velký důraz. To je také jeden z důvodů, proč v dnešní době zažívají tak velký rozmach.

Aby bylo zajištěno správné měření výkonu koncentrované sluneční elektrárny, je důležité měřit právě průtok teplotnosného média potrubím. Průtoky jsou většinou měřeny na studené straně tepelného systému.

Pro tato měření může být použito různých principů měření a senzorů. Ta jsou vybírána dle jednotlivých teplotnosných médií, velikosti průtoků, průměrů potrubí, specifických požadavků na přesnost měření a i nákladů s nimi spojených.

K měření v koncentrovaných solárních elektrárnách jsou nejvíce využívány dva druhy měření:

- Objemového průtoku
- Hmotnostního průtoku

Princip těchto měření průtoků byl vysvětlen v kapitole 3.

Specifickými měřidly využívanými v koncentrovaných solárních elektrárnách jsou: ultrazvukové průtokoměry, vírové průtokoměry, Coriolisův průtokoměr a průřezová měřidla. Jejich princip je vysvětlen v kapitole 3. Nejvhodnějšími průtokoměry, které se používají v koncentrovaných solárních elektrárnách pod 400 °C, jsou ultrazvukové a vírové. Do teploty 200 °C lze použít například Coriolisův průtokoměr, který je nejvíce vhodný pro trubky malé velikosti za předpokladu, že je možno za měřicí přístroj zaplatit vyšší cenu a lze si dovolit větší prostor pro umístění přístroje. Průřezová měřidla jsou nejpoužívanější pro média pracující při teplotách nad 500 °C. Při výběru vhodného měřidla je nutné vybírat podle různých parametrů, jako jsou: přesnost měření, měřicí rozsah, tlakové ztráty, náklady na měřidlo, náchylnost ke korozi, údržba atd. [54]



Kritéria pro výběr vhodných médií používaných v koncentrovaných solárních elektrárnách jsou následující (jak již bylo zmíněno v kapitole 2):

- Hustota
- Bod tání
- Měrná tepelná kapacita
- Tepelná vodivost
- Viskozita
- Tepelná stabilita

S ohledem na výše zmíněné vlastnosti byla provedena evaluace médií vhodných pro akumulaci tepla při použití CSP a byly zvoleny následující látky:

- a) Solar salt
- b) Dowtherm A
- c) Therminol VP-1

Níže budou uvedeny vlastnosti dílčích látek vzhledem k principu měření a dále bude navržen a zhodnocen zvolený princip měření ať už používaný na koncentrované solární elektrárně nebo alternativy tohoto měřicího principu.

#### 4.1 Solar salt

Z pohledu přenosu tepla vykazuje médium výborné hodnoty (vysoký koeficient teplotní vodivosti, tepelná kapacita). Například v porovnání s vodou může přenést stejnou velikost energie v menším objemu, což významně sníží náklady na skladovací prostory. Z důvodu stability média jsou vhodné pracovní teploty do 600 °C. Tato teplota je nižší než maximální teplota média z důvodu snížení korozivnosti, která vzniká při reakci s nerezovou ocelí používanou na potrubí v koncentrovaných solárních elektrárnách. Solar salt může být používán za atmosférického tlaku, což snižuje náklady na elektrárnu. Toto snížení nákladů je ale vykompenzováno náklady na vyhřívání potrubí vzhledem k bodu tání Solar salt (220 °C). Aby nedošlo k zamrznutí média, je třeba potrubí vytápět.

Pro Solar salt musí být vybírána měřidla podle kritérií, která musí zahrnovat teplotu, ve které mohou měřidla bezproblémově pracovat a dále je potřeba vzít v úvahu viskozitu. V neposlední řadě je pak potřeba vybrat měřidlo s odolností proti korozi (viz Tabulka 1 a kapitola 2.2) [15][28][55].

Z těchto důvodů je níže uvedeno několik měřidel používaných v koncentrovaných solárních elektrárnách v sestupném pořadí od nejvhodnějšího po nejméně vhodné a dále alternativa, která by mohla být k tomuto účelu využita také. Mezi tato měřidla patří:

- Venturiho trubice
- Dýza
- Pitotova trubice
- Indukční průtokoměr

Venturiho trubice spadá do kategorie průřezových měřidel. Ta jsou jedna z nejvyužívanějších měřidel používaných v koncentrovaných solárních elektrárnách. Parametry provozních podmínek měření pro toto měřidlo jsou uvedeny v Tabulka 2. Venturiho trubice, která je dimenzována pro měření čistých médií a zároveň s ní lze měřit i viskózní a korozivní kapaliny, je vhodná pro měření Solar salt. S ohledem na maximální pracovní teplotu Solar salt je Venturiho trubice vhodným, i když lehce podhodnoceným měřidlem. Vhodné je toto měřidlo i vzhledem k provoznímu tlaku. Z pohledu přesnosti, u tohoto měřidla je udávána chybnost 1 – 2 %. Nevýhodou je střední tlaková ztráta, kterou způsobuje měřenému médiu, což snižuje účinnost tepelného cyklu.

Dýza se stejně jako Venturiho trubice řadí mezi průřezová měřidla. I toto měřidlo je vhodné pro měření Solar salt, vzhledem k možnosti měření čistých viskózních a korozivních kapalin. Toto měřidlo pracuje za stejných podmínek jako Venturiho trubice, tedy má i stejné omezení. Rozdíl mezi těmito měřidly je v tlakové ztrátě, kdy Venturiho trubice měla střední tlakovou ztrátu a u dýzy je velká tlaková ztráta procházejícího média, tudíž ještě více snižuje efektivnost tepelného cyklu.

Pitotova trubice je stejně jako dýza a Venturiho trubice řazena mezi průřezová měřidla. Pitotova trubice je také vhodná pro měření čistých viskózních korozivních kapalin. Má i stejné vlastnosti jako předchozí dvě jmenované. Výhodou tohoto měřidla je, že nezpůsobuje tak velkou tlakovou ztrátu jako Venturiho trubice nebo dýza. Nevýhodou tohoto měřidla je jeho přesnost, ta je udávána hodnotou chybovosti 5 %, což je mnohem více než u předchozích dvou zmiňovaných.

Indukční průtokoměry již nepatří mezi média využívaná v koncentrovaných solárních elektrárnách, nicméně představují vhodnou alternativu pro měření průtoků. Nemají totiž žádné pohyblivé části, tudíž mají vysokou životnost. Jedinou podmínkou pro správné měření

průtoku je, že potrubím, kterým protéká médium, musí být médiem kompletně zaplněno, aby se docílilo co nejmenší chyby měření. Zároveň musí být protékané médium elektricky vodivé. Výhodou těchto měřidel je, že mohou měřit jak čistá, tak znečištěná média a viskózní i korozivní média, protože jsou usazeny na potrubí a ne uvnitř potrubí. Přesnost měření je udávána do 1 % chybovosti. Další výhodou tohoto měřidla je, že nezpůsobuje tlakovou ztrátu média. Indukční průtokoměry mají nízkou provozní teplotu (jen do 180 °C, což je o 40 °C méně než je bod tání Solar salt). Z toho důvodu by toto měřidlo bylo vhodnější, kdyby bylo vyvinuto na vyšší teplotu [44].

## 4.2 Dowtherm A

Dalším médiem, které bylo vybráno na základě vlastností vhodných pro koncentrované solární elektrárny je Dowtherm A. Toto teplotnosné médium, je využíváno k široké škále tepelných aplikací. Je stabilní, není rozkladatelné za vysokých teplot a zároveň je účinné jak v kapalném, tak v plynném skupenství. Výhodou Dowtherm A je, že má nízkou viskozitu přes celý svůj teplotní pracovní rozsah, což se projevuje v efektivním přenosu tepla v obou skupenstvích. Zároveň je nekorozivní k běžným kovům a slitinám, což rozšiřuje možnosti pro návrh teplovodního potrubí. Dowtherm A může pracovat při atmosférickém tlaku, což znamená, že potrubí nemusí být dimenzováno na vysoké tlaky. Předností tohoto média oproti Solar salt je jeho bod tání, který je udáván na hodnotě 15 °C, tudíž potrubí nemusí být vyhříváno (pokud potrubí není v prostředí, kde by okolní teplota klesla pod danou mez), aby médium nezatuhlo. V neprospěch tohoto média oproti Solar salt je jeho nižší pracovní teplota (o 200 °C), která je udávána hodnotou 400 °C [29][38].

Vhodná měřidla pro médium Dowtherm A jsou vybírána s ohledem na vlastnosti tohoto teplotnosného média: nízká viskozita v celém rozsahu pracovních teplot a také pracovní teplota, která dosahuje hodnot 400 °C. Zároveň jsou tato měřidla vybraná i na základě možnosti měření kapalného nebo plynného skupenství (Dowtherm A může pracovat v obou těchto stavech). Z těchto důvodů jsou vybrány následující průtokoměry, používané v koncentrovaných solárních elektrárnách, v sestupném pořadí od nejvhodnějšího po nejméně vhodné a dále alternativa, která by mohla být k tomuto účelu využita také. Mezi tato měřidla patří:

- Vírový průtokoměr
- Venturiho trubice a dýza
- Coriolisův průtokoměr

- Kolenový

Vírový průtokoměr je v dnešní době využíván v řadě koncentrovaných solárních elektráren. Toto měřidlo je dimenzováno pro měření Dowtherm A, protože je vhodné pro měření jak čistých kapalin, tak čistých plynů. Z tlakového hlediska je vírový průtokoměr dokonce předimenzovaný. S ohledem na pracovní teplotu média je měřidlo úplně dostačující. Nevýhodami tohoto měřidla jsou průměrná hodnota přesnosti, kdy je chybovost udávána na hodnotě 1,5 % a střední tlaková ztráta, což snižuje efektivnost celého tepelného procesu [29].

Průřezová měřidla jsou stejně jako vírový průtokoměr hojně využívána v koncentrovaných solárních elektrárnách. Jejich parametry jsou uvedeny v [Tabulka 2](#). Jsou vhodná pro měření čistých kapalných i plyných médií. Venturiho trubici i dýzu lze využít pro měření Dowtherm A, protože jsou teplotně pro toto médium plně dimenzovaná. Z tlakového hlediska jsou tato měřidla také zcela vhodná. Přesnost měření u těchto dvou průtokoměrů je srovnatelná s vírovým průtokoměrem. Markantní rozdíly nastávají u Venturiho trubice a dýzy v tlakové ztrátě, kdy dýza má velkou tlakovou ztrátu oproti Venturiho trubici i vírovému průtokoměru, a v ceně, protože je dýza levnější, tudíž by s ní byly spojeny nižší náklady při výstavbě elektrárny. V porovnání těchto dvou měřidel s vírovým průtokoměrem, spočívá jejich rozdíl v tom, že Venturiho trubice a dýza mohou měřit i viskózní tekutiny, tudíž jsou méně vhodné pro nízkoviskózní média jako je Dowtherm A.

Dalším měřidlem, kterým je vhodné měřit Dowtherm A je Coriolisův průtokoměr. I tento průtokoměr je využíván v koncentrovaných solárních elektrárnách, ale s tímto měřidlem na rozdíl od ostatních nelze měřit průtok plynů, tudíž by se mohl použít jen pro Dowtherm A v kapalném skupenství. Z tlakového hlediska je srovnatelný s vírovým průtokoměrem. Výhodami tohoto průtokoměru jsou přesnost měření, u které se chybovost pohybuje na hodnotě 0,2 % a malá tlaková ztráta média, což zlepšuje účinnost tepelného přenosu v elektrárně. Nevýhodou Coriolisova průtokoměru je jeho nižší pracovní teplota 200 °C. To by znamenalo, že u měřeného média nemohou být naplno využity jeho tepelné vlastnosti.

Kolenový průtokoměr již není používán v koncentrovaných solárních elektrárnách, ale mohl by být zajímavou alternativou. Tento průtokoměr je vhodný jak pro měření čistých plynů, tak pro měření čistých kapalin. To znamená, že je zcela vhodný pro měření média

Dowtherm A v obou jeho skupenstvích. Z pohledu tlaku a pracovní teploty je toto měřidlo srovnatelné s průřezovými měřidly. Výhodou kolenového průtokoměru oproti vírovému průtokoměru nebo průřezovým měřidlům je, že způsobuje nižší tlakovou ztrátu média. To zlepšuje efektivitu přenosu tepla elektrárny. Nevýhodou u tohoto měřidla však je jeho přesnost měřené hodnoty, která je udávána na hodnotě chybovosti 5 % [44].

### 4.3 Therminol VP-1

Dalším médiem vhodným k použití v koncentrovaných solárních elektrárnách je Therminol VP-1. Jako Dowtherm A je navrženo tak, aby mohlo pracovat jak v plynném, tak v kapalném skupenství, což rozšiřuje možnosti využití tohoto média. Therminol VP-1 vykazuje výbornou tepelnou stabilitu a nízkou viskozitu po celý jeho pracovní teplotní rozsah, který se pohybuje od 12 °C do 400 °C. To znamená, že médium musí být sledováno v chladném podnebí, aby se zabránilo tuhnutí média, a tím nevznikaly provozní problémy. Rozdíl mezi Therminolem VP-1 a Dowtherm A je v jejich cenách, kdy se cena Therminolu VP-1 pohybuje na hodnotě 2,1 \$/kg a Dowthermu A na hodnotě 4 \$/kg. Dalším rozdílem mezi těmito dvěma médii je jejich tepelná vodivost, kdy u Therminolu VP-1 je přibližně desetinásobná [34][57].

Kritéria měřidel pro toto médium jsou podobná těm pro Dowtherm A, protože tyto dvě látky mají podobné vlastnosti. Měřidla musí být schopna měřit média s nízkou viskozitou, musí být vhodná do vyšších provozních teplot a zároveň i vhodná pro měření kapalin a plynů [44]. Z důvodu podobných vlastností Therminolu VP-1 a Dowtherm A je i zde vhodné využít měřidla jako Venturiho trubice, dýza nebo kolenový průtokoměr a dále jsou uvedena vhodná měřidla v sestupném pořadí od nejvhodnějšího po nejméně vhodné a jejich alternativa:

- Vírový průtokoměr
- Normalizovaná clona
- Segmentová clona
- Turbínkový průtokoměr

Nejvhodnějším měřidlem pro Therminol VP-1 je vírový průtokoměr z důvodu jeho vlastností popsaných v Tabulka 2. Vírový průtokoměr je vhodný pro měření Therminolu VP-1, z důvodu schopnosti měření jak čistých kapalin, tak i čistých plynů. Z teplotního a tlakového hlediska vírový průtokoměr plně pokrývá celou pracovní oblast

Therminolu VP-1. Toto měřidlo lze považovat za celkem přesné, avšak nevýhodou tohoto měřidla je střední ztráta tlaku média při průchodu tímto měřidlem.

Dalším vhodným měřidlem používaným v koncentrovaných solárních elektrárnách je normalizovaná clona. Toto měřidlo je vhodné pro Therminol VP-1 z důvodu jeho konstrukce pro měření málo viskózních médií a pro měření čistých kapalin a plynů. Z tepelného a tlakového hlediska je normalizovaná clona stejná jako vírový průtokoměr, ale přesnost je u tohoto měřidla horší než u vírového průtokoměru. To samé platí u ztráty tlaku média při průchodu měřidlem.

Stejně jako normalizovaná clona, tak se i segmentová clona řadí mezi měřidla používaná v koncentrovaných solárních elektrárnách. Mezi jejich společné vlastnosti se řadí pracovní teplota a tlak. Rozdíly mezi segmentovou clonou a normalizovanou clonou je ve vhodnosti měřeného média, protože segmentová clona je přímo určena pro znečištěné kapaliny a plyny, ale pro čistá média je pouze vhodná. Dále pak je segmentová clona méně přesná, co se týče měření průtoku. Tlaková ztráta je u obou měřidel stejná.

Turbínkový průtokoměr se již neřadí mezi měřidla využívaná v koncentrovaných solárních elektrárnách, ale mohl by být vhodnou alternativou. Toto měřidlo je také přímo určeno pro měření čistých kapalin a plynů avšak na rozdíl od normalizované clony není přímo určeno pro málo viskózní kapaliny. Dalším rozdílem oproti cloně je jeho pracovní teplota, která je o něco nižší, avšak pořád plně pokrývá tepelný rozsah Therminolul VP-1. Výhody turbínkového průtokoměru oproti normalizované cloně jsou v tlaku, přesnosti a tlakové ztrátě, kdy dokáže měřit za vyššího tlaku s nižší chybovostí a menší tlakovou ztrátou [44].

## 5 Závěr

Využívání akumulčních systémů jako záložních zdrojů energie v dnešní době představuje velké výhody jak z pohledu výroby elektrické energie, tak z pohledu její regulace v přenosové a distribuční soustavě. Tyto systémy, i když mají vysoké náklady na výstavbu, se z energetického pohledu vyplatí do budoucna. Existuje mnoho způsobů, jak elektrickou energii akumulovat od baterií přes mechanické ukládání energie a akumulční elektrárny (jak na vzduch, tak na vodu nebo tepelná úložiště) až po palivové články. V České republice převažují přečerpávací a akumulční vodní elektrárny, z důvodu značného vodního hospodářství a také kvůli podnebí, ve kterém se nachází. Z pohledu efektivity jsou nejlepší koncentrované solární elektrárny, které dosahují vysokých účinností. Jsou vybudovávány na místech s velkou koncentrací sluneční energie, aby byly co nejefektivnější. Z důvodu efektivity je práce převážně zaměřena na měření protékaného média právě v těchto elektrárnách.

Pro správné zvolení média pro konkrétní aplikaci v koncentrované solární elektrárně je nejprve zapotřebí znát jeho vlastnosti. Obecně jsou za jedny z nejdůležitějších faktorů pro tepelný přenos brány: hustota, bod tání, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, viskozita, tepelná stabilita a cena média. Tyto faktory přímo ovlivňují jak účinnost tepelného cyklu elektrárny, tak její cenu při výstavbě a cenu jejího provozu. Média, která se dlouhodobě řadí mezi nejvyužívanější v koncentrovaných solárních elektrárnách jsou: Solar salt, Dowtherm A, Therminol VP-1, syntetický a minerální olej, Hitec, Hitec XL a kapalný sodík.

Podle média je následně nutné vybrat vhodná měřidla. Výběr může být podmíněn veličinou, která by měla být daným měřidlem měřena, ať už se jedná o rychlost, objem nebo hmotnost média a zároveň vlastnostmi daných kapalin nebo cenou měřidel. Je důležité, aby měřidla co nejméně ovlivňovala protékané médium a zároveň musí dosáhnout co nejpresnějších hodnot měření. Při řešení tohoto problému bylo největší překážkou vybrat takové měřidlo, které by bylo přímo dimenzované pro dané médium. Vždy se alespoň v jedné vlastnosti lišila nebo nebyla dimenzována například na danou teplotu média. Z toho důvodu byly brány jako stěžejní vlastnosti sestupně právě teplota média, při které je schopno pracovat, tlak do jakého lze s měřidlem měřit, vhodnost měřidla z hlediska měření například viskózních kapalin, přesnost měřené hodnoty a tlaková ztráta měřidla. Tyto faktory byly řešeny podle médií: Solar salt, Dowtherm A a Therminol VP-1, protože mají jedny z největších zastoupení mezi koncentrovanými solárními elektrárnami ze všech jmenovaných.

Dále v práci byla popsána měřidla přímo využívaná v těchto elektrárnách a přiřazena k danému médiu dle vhodnosti. Na závěr byla přiřazena i měřidla, která se nevyužívají v koncentrovaných solárních elektrárnách, ale která by mohla představovat vhodné alternativy pro daná média.

Z mého pohledu je zlepšování a adaptování akumulčních zdrojů energie do elektrické sítě velmi důležité, protože i tímto stylem lze předcházet událostem jako je například blackout a navíc se zjednodušuje řízení zdrojů energie jako takových, čímž dochází i ke zvýšení efektivity výroby energie. Koncentrované solární elektrárny jsou navíc samy o sobě ekologickým zdrojem energie, pokud uvažujeme čistě výrobu energie a její uskladnění. Jak již bylo řečeno, tak je nutné neustále zlepšovat a vyvíjet nové technologie, aby používané technologie mohli být co nejefektivnější. Toto platí i o měřících průtoků, na jejichž informacích závisí určení účinnosti přenosu tepla teplotonosným médiem. Proto by bylo vhodné ubírat se směrem vyvíjení těchto měřičů, aby dokázaly pokrýt stoprocentně všechny vlastnosti médií používaných v daných elektrárnách, aby bylo dosaženo co největší účinnosti.



## Seznam použitých obrázků

Obrázek 1. Denní diagram zatížení elektrické sítě .....	11
Obrázek 2. Porovnání jednotlivých technologií pro ukládání energie [3].....	12
Obrázek 3. Vysokokapacitní akumulátorová baterie [7] .....	13
Obrázek 4. Průřez supravodivým indukčním akumulátorem [4].....	13
Obrázek 5. Průřez přečerpávací vodní elektrárnou [9] .....	15
Obrázek 6. Řez akumulační vodní elektrárnou [10] .....	15
Obrázek 7. Průřez setrvačником [11].....	16
Obrázek 8. Princip tlakovzdušné elektrárny se spalovacími turbínami [4] .....	16
Obrázek 9. Koncentrovaná solární elektrárna [14] .....	18
Obrázek 10. Závislost smykového napětí na smykové rychlosti a dynamické viskozity na smykové rychlosti pro běžné typy newtonských kapalin [33] .....	27
Obrázek 11. Rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním [43].....	28
Obrázek 12. Princip činnosti Pitotovy trubice [46] .....	30
Obrázek 13. Prandtlůva trubice [46].....	30
Obrázek 14. Clona [40].....	32
Obrázek 15. Princip činnosti clony [40] .....	32
Obrázek 16. Venturiho trubice [44] .....	33
Obrázek 17. Dýza [44].....	33
Obrázek 18. Kapilární průtokoměr [40].....	34
Obrázek 19. Kolenový průtokoměr s grafem rozložení tlaků v kolenu [40] .....	35
Obrázek 20. Dallova trubice [48].....	36
Obrázek 21. Turbínkový průtokoměr [49].....	37
Obrázek 22. Vírový průtokoměr [40] .....	38
Obrázek 23. Zábрана a snímač vírového průtokoměru [40] .....	38
Obrázek 24. Indukční průtokoměr [40] .....	39
Obrázek 25. Ultrazvukový průtokoměr na principu Dopplerova jevu [40].....	40
Obrázek 26. Ultrazvukový průtokoměr [40].....	40
Obrázek 27. Oscilační průtokoměr [51].....	41
Obrázek 28. Princip vířivého průtokoměru (1 - vstupní zakřivené lopatky, 2 _ piezoelektrický snímač, 3 - výstupní usměrňovací lopatky) [52].....	42
Obrázek 29. Pístové měřidlo [40] .....	43
Obrázek 30. Tělesové (oválové) měřidlo [40] .....	43
Obrázek 31. Coriolisův průtokoměr [44].....	44
Obrázek 32. Princip činnosti Coriolisova průtokoměru [40].....	44
Obrázek 33. Termoanemometr [53].....	45
Obrázek 34. Kalorimetrický průtokoměr [40] .....	46

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání médií používaných v koncentrovaných solárních elektrárnách .....	21
Tabulka 2: Přehled médií vhodných k měřicím metodám [44] .....	47

## Zdroje

- [1] How Energy Storage Works. *Union od Concerned Scientists* [online]. 2015 [vid. 2020-10-10]. Dostupné z: <https://www.ucsusa.org/resources/how-energy-storage-works>
- [2] ING. JAN MAREŠ, PROF. ING. MARTIN LIBRA, CSC., ČZU PRAHA, ING. VLADISLAV POULEK, CSC a POULEK SOLAR, S. R. O. Akumulace elektrické energie. *Elektro* [online]. 2011, **2011**(02) [vid. 2020-10-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie--9696>
- [3] Energy Storage, can Superconductors be the solution? *Quantum levitation* [online]. 2019 [vid. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://quantumlevitation.com/archives/4938>
- [4] CESTY K AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE. *ČEZ* [online]. 2014 [vid. 2020-10-10]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty\\_1.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html)
- [5] WAGNER, Vladimír. Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie. *OENERGETICE.cz* [online]. 2018 [vid. 2020-10-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>
- [6] ING. PETR DVOŘÁK, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE, DOC. ING. PETR BAČA, PH.D. a ING. DAVID PLÉHA. Akumulace elektřiny. *TZB-info* [online]. 2011 [vid. 2020-10-10]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [7] EPRSERVICE. Batteries Accumulators Tech. *pixabay* [online]. 2020 [vid. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://pixabay.com/photos/batteries-accumulators-tech-nick-5431353/>
- [8] Charakteristika - Elektrárny. *Svět energie* [online]. [vid. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/charakteristika>
- [9] BYRD-MCDEVITT, Dominic. Pumpstor racoon mtn - Přečerpávací vodní elektrárna. *Wikipedie* [online]. 2004 [vid. 2020-10-16]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99e%C4%8Derp%C3%A1vac%C3%AD\\_vodn%C3%AD\\_elektr%C3%A1rna#/media/Soubor:Pumpstor\\_racoon\\_mtn.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99e%C4%8Derp%C3%A1vac%C3%AD_vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna#/media/Soubor:Pumpstor_racoon_mtn.jpg)
- [10] Vodní elektrárna. *Energyweb* [online]. 2006 [vid. 2020-11-08]. Dostupné z: [https://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=2&slovník\\_page=vodni\\_el.html](https://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=vodni_el.html)
- [11] *Flywheel\_2004\_sm.jpg (150×245)* [online]. 2004 [vid. 2020-10-16]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f8/Flywheel\\_2004\\_sm.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f8/Flywheel_2004_sm.jpg)
- [12] ALVA, Guruprasad, Lingkun LIU, Xiang HUANG a Guiyin FANG. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **68**, 693–706. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.10.021
- [13] Heat Transfer Fluid - an overview | ScienceDirect Topics. *Science direct* [online]. [vid. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/heat-transfer-fluid>
- [14] MICHAEL4WIEN. Sun Electricity Production. *Pixabay* [online]. 2018 [vid. 2020-10-17]. Dostupné z: <https://pixabay.com/photos/sun-electricity-production-renewable-4535891/>
- [15] VIGNAROOBAN, K., Xinhai XU, A. ARVAY, K. HSU a A. M. KANNAN. Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review. *Applied Energy* [online]. 2015, **146**, 383–396. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.125
- [16] JOHNSON, Lee. Importance of Density. *Sciencing* [online]. 2020 [vid. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://sciencing.com/importance-density-5484217.html>
- [17] LOWER, Stephen. 2.4: Density and its Applications. *Chemistry LibreTexts* [online]. 3. říjen 2013 [vid. 2020-11-27]. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Courses/Palomar\\_College/PC%3A\\_CHEM100\\_-\\_Fundamentals\\_of\\_Chemistry/03%3A\\_Matter\\_and\\_Energy/2.4%3A\\_Density\\_and\\_its\\_Applications](https://chem.libretexts.org/Courses/Palomar_College/PC%3A_CHEM100_-_Fundamentals_of_Chemistry/03%3A_Matter_and_Energy/2.4%3A_Density_and_its_Applications)
- [18] AMNITA.OLABS.EDU.IN. Melting Point of an Organic Compound. (Theory) : Class 11 : Chemistry : Amrita Online Lab. *Olabs* [online]. 2013 [vid. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://amrita.olabs.edu.in/?sub=73&brch=7&sim=33&cnt=1>
- [19] TREVOR, Ryan. *Why is specific heat capacity important? + Example* [online]. 8. říjen 2015 [vid. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://socratic.org/questions/why-is-specific-heat-capacity-important>
- [20] ALBURY, PH.D., Aymara. Why thermal conductivity matters. *PureTemp* [online]. 1. březen 2016 [vid. 2020-11-28]. Dostupné z: <http://www.puretemp.com/stories/why-thermal-conductivity-matters>
- [21] AKOSS. Understanding Thermal Conductivity | Advanced Thermal Solutions. *qats* [online]. 21. říjen 2011 [vid. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.qats.com/cms/2011/10/21/understanding-thermal-conductivity/>
- [22] WEN, Christopher. Viscosity - Chemistry LibreTexts. *Chemistry LibreTexts* [online]. 15. srpen 2020 [vid. 2020-11-28]. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Physical\\_Properties\\_of\\_Matter/States\\_of\\_Matter/Properties\\_of\\_Liquids/Viscosity](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Liquids/Viscosity)
- [23] COMPANY, CSC Scientific. What is Viscosity, and Why is Measuring Viscosity Important? *cscscientific* [online]. 2013 [vid. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.cscscientific.com/viscosity>

- [24] DEIGN, Jean. Role skladování při snižování nákladů na CSP. *Reuters events* [online]. 6. březen 2015 [vid. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.reutersevents.com/renewables/csp-today/technology/role-storage-cutting-csp-costs>
- [25] STANDS4 LLC. Thermal stability. *Definitions* [online]. 2021 [vid. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.definitions.net/definition/THERMAL+STABILITY>
- [26] Air - Thermophysical Properties. *Engineering Toolbox* [online]. 2003 [vid. 2021-03-03]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d\\_156.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html)
- [27] Water - Thermophysical Properties. *Engineering Toolbox* [online]. 2003 [vid. 2021-03-03]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d\\_162.html](https://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html)
- [28] HELLER, Lukas. *Literature Review on Heat Transfer Fluids and Thermal Energy Storage Systems in CSP Plants* [online]. 31. květen 2013 [vid. 2021-03-03]. Dostupné z: [https://sterg.sun.ac.za/wp-content/uploads/2011/08/HTF\\_TESmed\\_Review\\_2013\\_05\\_311.pdf](https://sterg.sun.ac.za/wp-content/uploads/2011/08/HTF_TESmed_Review_2013_05_311.pdf)
- [29] DOWTHERM A. The Dow Chemical Company [online]. [cit. 2021-3-3]. Dostupné z: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/176/176-01463-01-dowtherm-a-tds.pdf?iframe=true>
- [30] W.-D.STEINMANN. Thermal energy storage systems for concentrating solar power (CSP) plants - ScienceDirect. *Science direct* [online]. 2012 [vid. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978184569769350011X>
- [31] Thermal Fluid Comparison Tool, Calculators, and Tips. *Duratherm* [online]. [vid. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://durathermfluids.nl/en/resources>
- [32] BOEREMA, Nicholas, Graham MORRISON, Robert TAYLOR a Gary ROSEGARTEN. Liquid sodium versus Hitec as a heat transfer fluid in solar thermal central receiver systems. *Science direct* [online]. 2012, **86**(9), 2293–2305. ISSN 0038-092X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.001>
- [33] Database of Concentrated Solar Power Projects all around the world | REVE News of the wind sector in Spain and in the world. *Reve* [online]. 11. březen 2017 [vid. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.evwind.es/2017/03/11/database-of-concentrated-solar-power-projects-all-around-the-world/59070>
- [34] Therminol VP-1 Heat Transfer Fluid | Therminol | Eastman. *Therminol* [online]. 2020 [vid. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.therminol.com/product/71093459>
- [35] BERGAN, Pål G. a Christopher J. GREINER. A New Type of Large Scale Thermal Energy Storage. *Energy Procedia* [online]. 2014, **58**, Renewable Energy Research Conference, RERC 2014, 152–159. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:[10.1016/j.egypro.2014.10.422](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.422)

- [36] COSCIA, Kevin, Spencer NELLE, Elliot T., Satish MOHAPATRA, Alparslan OZTEKIN a Sudhakar NETI. Thermophysical Properties of LiNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> Mixtures for Use in Concentrated Solar Power. *Journal of Solar Energy Engineering* [online]. 2013, **135**. Dostupné z: doi:10.1115/1.4024069
- [37] LIU, Jing, Yongqing HE a Xianliang LEI. (PDF) Heat-Transfer Characteristics of Liquid Sodium in a Solar Receiver Tube with a Nonuniform Heat Flux [online]. 2019 [vid. 2020-12-29]. Dostupné z: doi:10.3390/en12081432
- [38] DOWTHERM A Heat Transfer fluid. The Dow Chemical company [online]. [cit. 2021-3-23]. Dostupné z: [http://samyangoil.com/new/catalog/1/2\\_Dow\\_Chemical/DOWTHERM\\_A\\_en.pdf](http://samyangoil.com/new/catalog/1/2_Dow_Chemical/DOWTHERM_A_en.pdf)
- [39] KLEPÁRNÍK, Jan. Snímače průtoků. *user.mendelu* [online]. 28. duben 2018 [vid. 2021-01-19]. Dostupné z: [http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn\\_prutoku.htm](http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_prutoku.htm)
- [40] DOC. ING. KADLEC, CSC., Karel a Miloš DOC. ING. KMÍNEK, CSC. 4.5 Měření průtoků a protoklého množství. *uprst.vscht* [online]. 22. červenec 2002 [vid. 2021-01-19]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm#k45>
- [41] DOC. MGR. MIROSLAV ČERNÝ, PH.D. Vazkost kapalin. Ústav fyzikálního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/BF/labiny/vazkost.pdf>
- [42] BROŽOVÁ, Kristina. 6 - Stanovení viskozitní funkce polymerních roztoků (Stanice viskozimetrie E430) - PDF Free Download. *Anzdoc* [online]. [vid. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://adoc.pub/6-stanoveni-viskozitni-funkce-polymernich-roztok-stanice-vis.html>
- [43] SEDLAČEK, Alois. 1 TEKUTINOVÉ MECHANIMY UČEBNÍ TEXTY PRO VÝUKU MECHATRONIKY2. *Anzdoc* [online]. [vid. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://adoc.pub/min4d00df4567bacd9c4fe1ed281e7ec76a6953.html>
- [44] ING. SOŇA ORLÍKOVÁ. Měření průtoků tekutin - principy průtokoměrů. *Elektrorevue* [online]. 2001 [vid. 2021-01-19]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [45] KUBATOVA, Senta. Bernoulliho rovnice – WikiSkripta. *Wikiskripta* [online]. 2011 [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Bernoulliho\\_rovnice](https://www.wikiskripta.eu/w/Bernoulliho_rovnice)
- [46] DOC. ING. JOSEF FORMÁNEK, PH.D. Podklady k principu měření rychlosti a rychlosti proudění. Home.zcu [online]. [cit. 2021-2-18]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvyuka/Data/ivk-mt-soubory/12-F.pdf>
- [47] DALLOVA TRUBICE - Mattech. *Mattech* [online]. 2016 [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://mattech.cz/produkty/dallova-trubice-272/>
- [48] BC. RICHTER, Lukáš. *Průmyslové snímače průtoků* [online]. B.m., 2015 [vid. 2021-02-18]. Západočeská Univerzita v Plzni. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41549479-Zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka-katedra-technologie-a-mereni.html>

- [49] ŠEVČÍKOVÁ, Natálie. SNÍMAČE A AKČNÍ ČLENY - senzory aerodynamických a hydrodynamických veličin - FD ČVUT PRAHA Y1SC. *SlidePlayer* [online]. [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12964254/>
- [50] Měření průtoků bioplynu: Snímače a měřicí technika. AUTOMA: časopis pro automatizační techniku [online]. 2017, 2017(08) [cit. 2021-2-18]. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/11017.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/11017.pdf)
- [51] ING. MÜLLER, Martin. Měření a seřizování nástrojů. *mm průmyslové spektrum* [online]. 2007, 2007(6) [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-a-serizovani-nastroju.html>
- [52] Vířivé a vírové průtokoměry ABB: cenově výhodné řešení měření průtoků. AUTOMA: časopis pro automatizační techniku [online]. 2014, 2014(10) [cit. 2021-2-18]. Dostupné z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/53038.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/53038.pdf)
- [53] KLEPÁRNÍK, Jan. Hmotnostní průtokoměry. *WEB podpora výuky* [online]. 12. duben 2018 [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: [http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn\\_prhmotnostni.htm](http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_prhmotnostni.htm)
- [54] GUILLOT, Emmanuel. *R12.10 Report on mass flow measurement and calibration procedures* [online]. 2020. Dostupné z: [https://sfera.sollab.eu/downloads/JRA/WP12/Deliverable\\_R12.10\\_Report\\_on\\_mass\\_flow\\_measurement\\_and\\_calibration\\_procedures.pdf](https://sfera.sollab.eu/downloads/JRA/WP12/Deliverable_R12.10_Report_on_mass_flow_measurement_and_calibration_procedures.pdf)
- [55] Molten salts properties. *Archimede solar energy* [online]. 20. říjen 2009 [vid. 2021-03-13]. Dostupné z: [http://www.archimedesolarenergy.com/molten\\_salt.htm](http://www.archimedesolarenergy.com/molten_salt.htm)
- [56] Therminol VP-1: Vapor Phase/Liquid Phase Heat Transfer Fluid. Sintelub [online]. 1999 [cit. 2021-3-27]. Dostupné z: [https://www.sintelub.com/wp-content/uploads/PDS/37.therminol\\_vp1.pdf](https://www.sintelub.com/wp-content/uploads/PDS/37.therminol_vp1.pdf)