

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Budoucí trendy v CSP (Concentrating Solar Power) s důrazem na akumulaci tepelné energie

Autor: **Kateřina Vašíčková**  
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Richter**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kateřina VAŠÍČKOVÁ**

Osobní číslo: **S16B0265P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**

Název tématu: **Budoucí trendy v CSP (Concentrating Solar Power)  
s důrazem na akumulaci tepelné energie**

Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Máte za úkol:

- popsat základní fyzikální zákony využívané v CSP,
- shrnout současnou technologii pro CSP včetně možností pro akumulaci tepelné energie,
- vypracovat návrh heliotechnického zařízení včetně tepelného úložiště,
- zanalyzovat možnosti vylepšení výkonů a účinnosti s ohledem na kontinuálnost provozu.

Rozsah grafických prací: -  
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

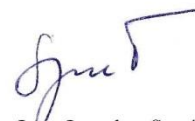
- **Manuel J. Blanco and Lourdes Ramirez Santigosa: Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology**
- **Keith Lovegrove and Wes Stein: Concentrating solar power technology**
- **Heller P: The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems Analysis, Measurement and Assessment**
- **Kleczek J: Sluneční energie - Úvod do helioenergetiky**
- **Odborné články + internetové zdroje**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Richter**  
Katedra energetických strojů a zařízení  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Kučera, Ph.D.**  
Doosan Škoda Power

Datum zadání bakalářské práce: **30. října 2018**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Dr. Ing. Jaroslav Synáč  
vedoucí katedry

V Plzni dne 25. října 2018

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Vašíčková	<b>Jméno</b> Kateřina		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Richter	<b>Jméno</b> Lukáš		
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKE			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Budoucí trendy v CSP (Concentrating Solar Power) s důrazem na akumulaci tepelné energie			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	36	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	25	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Bakalářská práce je zaměřena na koncentraci solární energie. Předává poznatky o využívaných fyzikálních zákonech, technologiích solárního pole, technologiích akumulace tepelné energie a také o tepelných obězích. Cílem této práce je provedení návrhu koncentrační sluneční tepelné elektrárny s analýzou možnosti zvýšení výkonu a účinnosti s ohledem na kontinuálnost provozu.</p>
<p><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>sluneční záření, koncentrace, tepelná energie, akumulace, tepelný oběh</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Vašíčková	Name Kateřina	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 „Design of Power Machines and Equipment“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Richter	Name Lukáš	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLÓMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Future trends in CSP (Concentrating Solar Power) with an emphasis on thermal energy storage		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	36	<b>TEXT PART</b>	25	<b>GRAPHICAL PART</b>	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This bachelor thesis is focused on the concentration of solar power. It transfers knowledge of the laws of physics, solar field technologies, thermal energy storage technologies and power cycles. The aim of this thesis is to design a concentrated solar power plant with an analysis of the possibility of increasing performance and efficiency with regard to the continuity of operation.
<b>KEY WORDS</b>	solar irradiation, concentration, thermal energy, accumulation, power cycles

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

**V Plzni dne: 24.5.2019**



.....

**podpis autora**

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala panu Ing. Lukáši Richterovi za cenné rady, ochotu a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Poděkování patří také mému konzultantovi panu Ing. Jiřímu Kučerovi, Ph.D. především za věcné rady a vstřícnost.

## Obsah

1	Úvod .....	5
2	Základní využívané fyzikální zákony .....	6
2.1	Pohyb Země kolem Slunce .....	6
2.2	Optika .....	8
2.3	Termodynamika.....	8
3	Současná technologie solárního pole .....	11
3.1	Parabolický žlab .....	11
3.2	Parabolický disk .....	12
3.3	Centrální věžový přijímač .....	13
3.4	Lineární Fresnelův reflektor .....	14
4	Současná technologie akumulace tepelné energie .....	16
4.1	Akumulace citelného tepla .....	16
4.2	Akumulace latentního tepla .....	18
4.3	Akumulace termochemického tepla .....	19
4.4	Akumulace sorpčního tepla .....	19
5	Tepelné oběhy pro CSP .....	20
5.1	S parní turbínou .....	20
5.2	S plynovou turbínou .....	21
5.3	Paroplynový oběh .....	22
5.4	Se Stirlingovým motorem.....	23
6	Návrh heliotechnického zařízení a tepelného uložení .....	24
6.1	Umístění.....	24
6.2	Solární pole.....	26
6.3	Kolektor .....	29
6.4	Absorbér .....	30
6.5	Tepelné uložení.....	31
6.6	Tepelný oběh .....	34
7	Analýza možnosti vylepšení výkonu a účinnosti .....	35
7.1	S ohledem na volbu komponent .....	35
7.2	S ohledem na kontinuálnost provozu.....	37
8	Závěr.....	40
	Seznam odborné literatury .....	41



## Seznam obrázků

Obrázek č. 1 – znázornění prvního Keplerova zákona.....	6
Obrázek č. 2 – znázornění druhého Keplerova zákona.....	6
Obrázek č. 3 – znázornění dopadu přímého slunečního záření.....	7
Obrázek č. 4 – znázornění Stefan-Boltzmanova zákona.....	9
Obrázek č. 5 – konstrukce parabolického žlabu.....	11
Obrázek č. 6 – konstrukce parabolického disku.....	13
Obrázek č. 7 – konstrukce centrálního věžového přijímače.....	14
Obrázek č. 8 – konstrukce lineárního Fresnelova reflektoru .....	15
Obrázek č. 9 – schéma akumulace citelného tepla dvěma nádrži s nepřímým ukládáním .....	17
Obrázek č. 10 – schéma akumulace latentního tepla .....	18
Obrázek č. 11 – schéma akumulace termochemického tepla s nepřímým ukládáním .....	19
Obrázek č. 12 – schéma a T-s diagram parního Rankin-Clausiova oběhu .....	20
Obrázek č. 13 – schéma a T-s diagram organického Rankin-Clausiova cyklu s benzenem ....	21
Obrázek č. 14 – schéma a T-s diagram uzavřeného Braytonova cyklu .....	22
Obrázek č. 15 – schéma a T-s diagram paroplynového oběhu.....	22
Obrázek č. 16 – schéma a T-s diagram oběhu se Stirlingovým motorem.....	23
Obrázek č. 17 – absorbér typu Schott PTR80 .....	31

## Seznam grafů

Graf č. 1 – znázornění dopadu přímého slunečního záření za rok .....	25
Graf č. 2 – znázornění rychlosti větru za rok .....	25
Graf č. 3 – znázornění množství přímého záření využitého solárním polem za rok.....	27
Graf č. 4 – znázornění průtoku teplotnosné tekutiny za rok .....	28
Graf č. 5 – znázornění tepelného výkonu produkovaného solárním polem za rok .....	29
Graf č. 6 – znázornění objemu akumulačního média studené nádrže za rok .....	33
Graf č. 7 - znázornění objemu akumulačního média horké nádrže za rok.....	33
Graf č. 8 – zobrazení výroby elektřiny nového návrhu.....	37
Graf č. 9 - zobrazení výroby elektřiny konečného návrhu .....	38
Graf č. 10 - zobrazení produkované energie nového návrhu za rok .....	39
Graf č. 11 - zobrazení produkované energie konečného návrhu za rok .....	39

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – zadané hodnoty pro umístění.....	24
Tabulka č. 2 – zadané hodnoty pro solární pole.....	26
Tabulka č. 3 – vypočtené hodnoty pro solární pole .....	28
Tabulka č. 4 – zadané hodnoty pro kolektor .....	29
Tabulka č. 5 – vypočtené hodnoty pro kolektor .....	30
Tabulka č. 6 – zadané hodnoty pro absorbér.....	30
Tabulka č. 7 – vypočtené hodnoty pro absorbér .....	31
Tabulka č. 8 – zadané hodnoty pro tepelné uložení .....	32
Tabulka č. 9 – vypočtené hodnoty pro tepelné uložení .....	32
Tabulka č. 10 – zadané hodnoty pro tepelný oběh.....	34
Tabulka č. 11 – vypočtené hodnoty pro tepelný oběh.....	34
Tabulka č. 12 – hodnocené parametry zlomku teplotnosných tekutin .....	35
Tabulka č. 13 - hodnocené parametry zlomku kolektorů.....	35
Tabulka č. 14 - hodnocené parametry zlomku přijímačů.....	36
Tabulka č. 15 - hodnocené parametry zlomku akumulčních médií.....	36

**Seznam použitých zkratk a symbolů**

Zkratka	Jednotka	Název
$\alpha$	[rad]	úhel dopadu
$\alpha'$	[rad]	úhel odrazu
$\beta$	[rad]	úhel lomu
$\Omega$	[sr]	prostorový úhel
a	[m]	hlavní poloosa trajektorie
$\lambda$	[m]	vlnová délka
S	[m <sup>2</sup> ]	plocha
v	[m/s]	rychlost
f	[Hz]	frekvence
n	[-]	index lomu
T	[K]	termodynamická teplota
E	[J]	energie
U	[J]	vnitřní energie
Q	[J]	teplo
Q <sub>v</sub>	[J]	vysálané teplo
Q <sub>n</sub>	[J]	vysálané teplo ve směru normály
W	[J]	práce
h	[J·s]	Planckova konstanta
$\dot{Q}$	[W]	tepelný tok
q	[W/m <sup>2</sup> ]	hustota tepelného toku
E <sub>0</sub>	[W/m <sup>2</sup> ]	sálavost černého tělesa
b	[m·K]	Wienova konstanta
$\lambda$	[W/(m·K)]	součinitel tepelné vodivosti
$\alpha$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	součinitel přestupu tepla
$\sigma_0$	[W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )]	Stefan-Boltzmanova konstanta

# 1 Úvod

Základním zdrojem koncentrované solární energie je Slunce. Sluneční energie (záření) vzniká společně s atomy hélia slučováním jader vodíku a jeho izotopů při vysokých teplotách a tlacích v samotném jádru Slunce. Tento proces se nazývá termonukleární fúze a vzniklá energie (záření) je tak ekvivalentní hmotnostnímu úbytku, jenž vzniká rozdílem hmotností sloučených jader vodíku a jádra hélia. Slunce tak ubývá na své hmotnosti, avšak v porovnání tohoto úbytku s celkovou hmotností Slunce je jeho ztráta hmotnosti zanedbatelná. Z toho důvodu lze sluneční záření řadit mezi obnovitelné zdroje energie.

V současné době energetika po celém světě usiluje o náhradu elektráren spalujících fosilní paliva. Tyto elektrárny vypouští do ovzduší velké množství emisí, které se následně podílí na globálním oteplování. Důvodem k ústupu od těchto elektráren je také omezená kapacita přírodních zdrojů. Světová energetika se dále snaží eliminovat i elektrárny jaderné, a to především z důvodů bezpečnosti a jaderného odpadu. Proto se stále hledají vhodné alternativy, jež by byly schopné alespoň částečně nahradit zmíněné elektrárny. Jednou z možných alternativ se jeví právě využívání obnovitelného zdroje energie v podobě koncentrace solární energie (záření).

První část práce se zabývá základními fyzikálními principy. Ty zmiňují jak Keplerovy zákony, pojednávající o pohybu planet, tak i zákony z oblasti optiky a termodynamiky. Práce pokračuje popisem současných technologií solárního pole využívané pro koncentraci solární energie. Ty se různí od parabolických žlabů přes parabolické disky až po rovinná zrcadla. Dále se práce věnuje uchovávání tepelné energie. Zde je zmíněno hned několik technologií od ukládání citelného tepla, latentního tepla, přes teplo termochemické, až po ukládání sorpčního tepla. U každé doposud zmíněné technologie je uveden i reálný příklad, ovšem pokud to technická realizace dovoluje. Poslední kapitola teoretické části pak popisuje možnosti přeměny tepelné energie na energii mechanickou a posléze elektrickou v závislosti na použité technologii solárního pole.

Druhá část práce je věnována návrhu koncentrační solární tepelné elektrárny zahrnující helio-technické zařízení využívající technologii parabolického žlabu tak i tepelné uložení využívající technologii ukládání citelného tepla. Návrh této elektrárny o výkonu 10 MW je umístěn do oblasti jižního Španělska poblíž města Sevilla. Návrh je následně podroben analýze, jež zkoumá možnosti vylepšení výkonu a účinnosti s ohledem na kontinuálnost provozu.

Po přečtení této práce by měl čtenář získat základní přehled o umístění, částech a fungování koncentrační solární tepelné elektrárny včetně možnosti akumulace tepelné energie s propojením se základními fyzikálními zákony.

## 2 Základní využívané fyzikální zákony

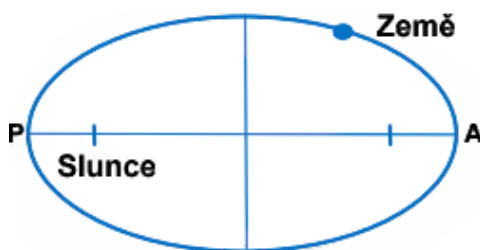
### 2.1 Pohyb Země kolem Slunce

Pro využití koncentrované solární energie je důležité znát polohu Země vůči Slunci a tím i dopad slunečního záření.

#### První Keplerův zákon

První Keplerův zákon definuje pohyb planet po elipsách, v jejichž společném ohnisku leží Slunce. [1]

Tento zákon tak popisuje tvar trajektorie planety. Na obrázku č. 1 písmeno P značí perihélium, což je nejbližší bod trajektorie tělesa od Slunce. V češtině je znám pod pojmem přísluní a na Zemi nastává v lednu. Písmeno A značí afélium, které naopak představuje nejvzdálenější bod trajektorie od Slunce. V češtině je označován jako odsuní a na Zemi nastává v červenci. [1]



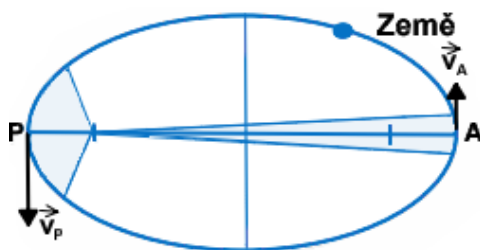
Obrázek č. 1 – znázornění prvního Keplerova zákona [1]

Ze znalosti prvního Keplerova zákona a naklonění zemské osy vyplývá rozdílnost dopadu slunečního záření na severní a jižní polokouli. V perihéliu je ke Slunci přivrácena jižní polokoule a probíhá zde tak léto, jež je umocněno krátkou vzdáleností Země od Slunce. V tutéž dobu probíhá na severní polokouli zima, jež je ovšem krátkou vzdáleností Země od Slunce zmírněna. V aféliu je tomu přesně naopak. Z tohoto důvodu jsou zaznamenávány větší rozdíly teplot mezi zimou a létem na jižní polokouli oproti polokouli severní. S prvním Keplerovým zákonem dále souvisí i proměnlivost solární konstanty. Z důvodů větší vzdálenosti působí na Zemi v aféliu menší intenzita slunečního záření oproti Zemi v perihéliu. [2]

#### Druhý Keplerův zákon

Druhý Keplerův zákon definuje konstantnost obsahů ploch, jež jsou opsány průvodičem planety za jednotku času. [3]

Tento zákon tak popisuje, jak se planety pohybují. Je zřejmé, že rychlost planety v perihéliu je větší než rychlost téže planety v aféliu, neboť musí urazit za stejnou dobu delší dráhu. Pojem průvodič totiž představuje úsečku spojující střed planety se středem Slunce. [3]



Obrázek č. 2 – znázornění druhého Keplerova zákona [3]

Ze znalosti druhého Keplerova zákona vyplývá posun solárního času a to z důvodů rozdílnosti rychlostí Země. Toto tvrzení lze jednoduše ověřit pomocí stínu, jenž bude nejkratší vždy v jiný čas konkrétního dne. Z tohoto důvodu dochází i k posunu času východu a západu Slunce, který je pro využití koncentrované solární energie podstatný. [2]

### Třetí Keplerův zákon

Třetí Keplerův zákon definuje rovnost poměrů druhých mocnin oběžných dob dvou planet a třetích mocnin hlavních poloos jejich trajektorií. [4]

$$T_1^2/T_2^2 = a_1^3/a_2^3 \quad (1)$$

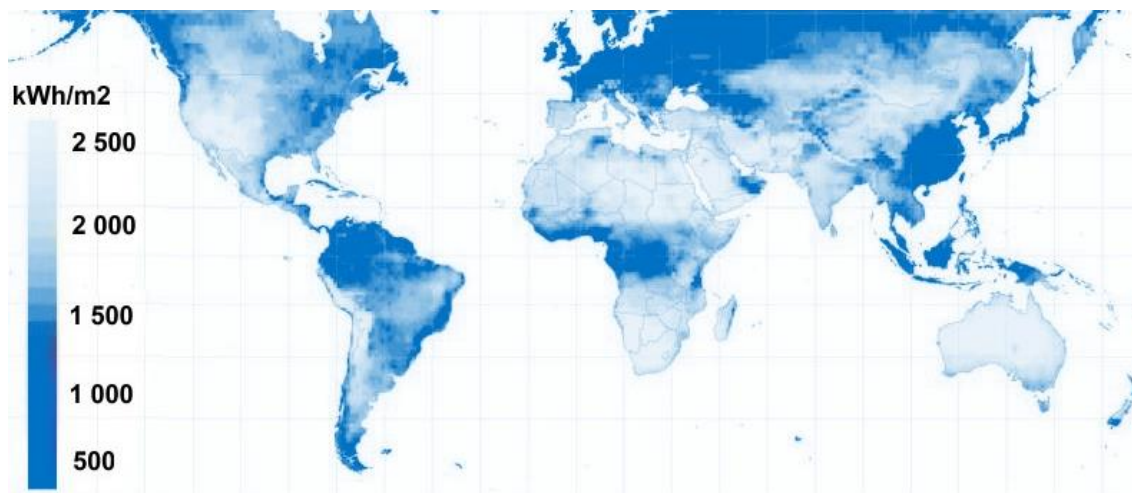
Tento zákon tak udává vztah mezi oběžnými dobami planet a hlavními poloosami jejich trajektorií. Hlavní poloosa Země je rovna přibližně  $150 \cdot 10^9$  metrů a představuje jednu astronomickou jednotku. [4]

### Solární konstanta

Solární konstanta je definována jako intenzita slunečního záření dopadající kolmo na metr čtvereční hranice zemské atmosféry a její hodnota zde průměrně nabývá velikosti  $1\,367 \text{ W/m}^2$ . [5]

Důležitá je však znalost dopadu slunečního záření na zemský povrch, kde lze sluneční záření dělit na dvě základní složky, a to na záření přímé a záření difuzní. Při zpracování koncentrované solární energie se využívá pouze přímého záření. Jde o elektromagnetické vlny, jež nebyly při průchodu atmosférou rozptýleny, odrazeny či pohlceny a následně vyzářeny. Intenzita přímého slunečního záření dopadající na zemský povrch se tak pohybuje okolo  $1\,000 \text{ W/m}^2$  v závislosti na zeměpisné šířce, průměrném počasím a množství oblačnosti. [5]

Ještě důležitějším parametrem než je solární konstanta, jež se téměř nemění, je délka slunečního svitu. Ta představuje dobu přítomnosti slunce nad obzorem ovšem za předpokladu dopadu přímého slunečního záření tedy za nulové oblačnosti. Tato doba je tak závislá především na zeměpisné šířce. Z důvodu naklonění zemské osy je v létě délka slunečního svitu na jižní polokouli nejkratší a na severní polokouli nejdelší. V zimě je tomu přesně naopak. Se snižující se zeměpisnou šířkou se tento rozdíl vyrovnává a na rovníku je tak délka slunečního svitu po celý rok shodná, což hraje ve prospěch právě rovníkových oblastí.



Obrázek č. 3 – znázornění dopadu přímého slunečního záření [6]

## 2.2 Optika

Neodmyslitelnou součástí koncentrované solární energie je využití optických zákonů, jejichž znalost nám umožňuje koncentrovat sluneční záření.

### Snellův zákon

Snellův zákon popisuje jev na rovinném rozhraní optického prostředí o indexu lomu  $n_1$  a optického prostředí o indexu lomu  $n_2$  a o úhlu dopadu  $\alpha$  a úhlu lomu  $\beta$ , při němž paprsky částečně přechází z jednoho prostředí do prostředí druhého a v němž se šíří pod jiným úhlem a jinou rychlostí. [7]

$$\sin\alpha / \sin\beta = v_1/v_2 = n_2/n_1 \quad (2)$$

Na základě Snellova zákona rozeznáváme dva základní typy lomů, a to lom ke kolmici a lom od kolmice. Lom ke kolmici nastává při průchodu z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí. V opačném případě nastává lom od kolmice. [7]

### Zákon odrazu

Zákon odrazu definuje úhel odrazu  $\alpha'$ , jenž se rovná úhlu dopadu  $\alpha$ . Dopadající i odražený paprsek leží v rovině dopadu. [7]

$$\alpha' = \alpha \quad (3)$$

Zákon odrazu nám udává úhel, pod kterým se bude paprsek dále šířit. [7]

Ze znalosti optických zákonů vyplývá lom paprsků procházejících atmosférou. Se stoupající nadmořskou výškou klesá hustota vzduchu a paprsky se lámou ke kolmici. Dochází tak k mírné změně úhlu paprsků ještě před dopadem na kolektor, případně zrcadlo. I s tím je zapotřebí počítat při natáčení kolektorů či zrcadel, za účelem koncentrace slunečních paprsků. Té však nemusí být docíleno pouze natáčením ale i vhodným tvarováním. Pro představu, duté parabolické zrcadlo dokáže díky svému tvaru nasměrovat veškeré paprsky vedoucí rovnoběžně s optickou osou přímo do svého ohniska.

## 2.3 Termodynamika

Pro koncentrovanou solární energii je z hlediska termodynamiky důležitá znalost prvního a druhého termodynamického zákona.

### První termodynamický zákon

První termodynamický zákon představuje zákon o zachování energie. Definuje změnu vnitřní energie soustavy jako součet práce vykonané okolními tělesy a tepla odevzdaného okolními tělesy soustavě. [8]

$$\Delta U = W + Q \quad (4)$$

Z tohoto zákona lze říci, že soustava přijímá energii, je-li práce vykonaná okolními tělesy působící na soustavu a teplo přijaté soustavou kladné. V opačném případě soustava energii odevzdává. [8]

### Druhý termodynamický zákon

Druhý termodynamický zákon definuje přechod tepla, jenž nemůže samovolně probíhat z teploty nižší na teplotu vyšší. [8]

Z termodynamických zákonů je zřejmé, že přijímač koncentrované solární elektrárny nemůže dosahovat vyšších teplot než je teplota Slunce. Současně z nich také vyplývá, že teplo samovolně přechází z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou, tedy z přijímače či akumulární nádrže do okolí. To je však nežádoucí jev, který je zodpovědný za tepelné ztráty a tím tedy za snížení celkového přenosu tepelného toku do teplotnosné tekutiny.

Tyto ztráty se dělí v závislosti na způsobu sdílení tepelné energie na ztráty radiační, kondukční a konvekční.

### Wienův zákon

Wienův zákon definuje konstantnost součinu vlnové délky, při níž je vyzářeno nejvíce zářivé energie, a termodynamické teploty. [8]

$$\lambda_{\max} \cdot T = b \quad (5)$$

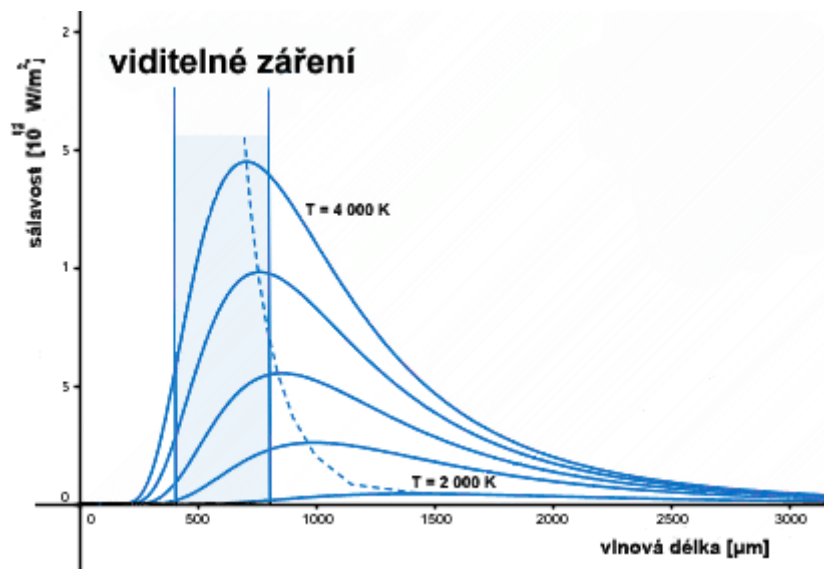
Z Wienova zákona plyne, že tělesa s vyšší teplotou budou vysílat záření o nižší vlnové délce a naopak, aby se zachovala konstantní hodnota součinu, jež má být rovna Wienově konstantě. Ta odpovídá hodnotě  $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ . [8]

### Stefan-Boltzmanův zákon

Stefan-Boltzmanův zákon definuje celkovou sálavost černého tělesa, jež je přímo úměrná čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty. [8]

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (6)$$

Stefan-Boltzmanův zákon popisuje závislost sálavosti tělesa na jeho teplotě. Pro představu, zvýšíme-li teplotu tělesa 2krát, teplo vysílané za jednotku času jednotkovým povrchem černého tělesa se zvýší 16krát. Značka  $\sigma_0$  představuje Stefan-Boltzmannovu konstantu, jež je rovna  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ . [8]



Obrázek č. 4 – znázornění Stefan-Boltzmannova zákona [9]

### Planckův zákon

Planckův zákon definuje energii černého tělesa, jež není vysílána spojitě, ale po částech (kvantech). Energie těchto kvant je pak přímo úměrná frekvenci záření. [8]

$$E = h \cdot f \quad (7)$$



Z Planckova zákona je zřejmé, že čím kratší vlnovou délku bude záření mít, tím vyšší bude jeho frekvence a následně i energie. Značka  $h$  představuje Planckovu konstantu, jež je rovna  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s. [8]

### Lambertův zákon

Lambertův zákon popisuje snižování zářivosti plošného zdroje s kosinem úhlu dopadu. [8]

$$dQ_v = dQ_n \cdot d\Omega \cdot \cos\alpha \quad (8)$$

Lambertův zákon tak udává zářivost plošného zdroje, jež klesá s rostoucím úhlem dopadu. [8]

Ze znalosti zákonů ovlivňující radiační ztráty vyplývá volba selektivního povrchu absorbéru, jenž dobře pohlcuje sluneční záření s kratší vlnovou délkou a tím s vyšší energií. Ke snížení těchto ztrát lze také využít skleněného krytu okolo absorbéru z důvodů dobré propustnosti slunečního záření dovnitř, ale špatné propustnosti infračerveného záření ven. Tím dosáhneme skleníkového efektu a snížení radiačních ztrát. [10]

### Fourierův zákon

Fourierův zákon definuje vektor hustoty tepelného toku, jenž je přímo úměrný gradientu teploty a má opačnou směr. [8]

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T; \dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad}T \quad (9)$$

Tento zákon tak udává množství tepla proteklého jednotkou plochy za jednotku času. Značka  $\lambda$  zde představuje součinitel tepelné vodivosti. [8]

### Newtonův zákon

Newtonův zákon definuje přímou úměru vektoru hustoty tepelného toku a gradientu teploty. [8]

$$q = \alpha \cdot (T_t - T_s); \dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T_t - T_s) \quad (10)$$

Newtonův zákon tak popisuje množství tepla proteklého jednotkou plochy za jednotku času. Značka  $\alpha$  zde představuje součinitel přestupu tepla. [8]

Ze znalosti zákonů ovlivňující kondukční ztráty vyplývá volba izolačních materiálů pro nosníky absorbérů či akumulčních nádrží, z důvodů nízkého součinitele tepelné vodivosti izolantů, a tím snížení kondukčních ztrát. Z těchto zákonů dále vyplývá i volba akumulčního média, po němž je požadován vysoký součinitel tepelné vodivosti z důvodu rychlosti nabíjecích (vybíjecích) procesů. [10]

Konvekční ztráty vznikají v případě, je-li absorbér obklopen proudící tekutinou. Velikost ztráty pak závisí na rozdílu teplot absorbéru a okolí, druhu a rychlosti proudící tekutiny a následně i na tvaru a umístění absorbéru. Absorbéry jsou i proto kryty sklem. Prostor mezi sklem a absorbérem může být navíc členěn přepážkami, které brání proudění ohřátého vzduchu. [10]

### 3 Současná technologie solárního pole

Pro záchyt slunečního záření slouží kolektor. Díky jeho odrazným plochám se sluneční záření soustřeďuje na přijímač (absorbér), jímž protéká daná teplotná tekutina. Již bylo vytvořeno velké množství konstrukcí soustřeďujících kolektorů, tvořených nejčastěji pomocí reflektorů. Ty mohou být rovinné či parabolické, segmentové či spojitě atd. [11]

Dále je možné kolektory z konstrukčního hlediska dělit dle pohyblivosti za Sluncem. Existují kolektory pevné, jež zajišťují dostatečný koncentrační poměr po celý den a celý rok. Koncentrační poměr je poměr mezi plochou apertury k ploše absorbéru. Kromě kolektorů pevných jsou časté i kolektory pohyblivé, jež sledují dráhu Slunce. Jejich konstrukce obsahuje jednu či dvě rotační osy, umožňující dané natáčení. [11]

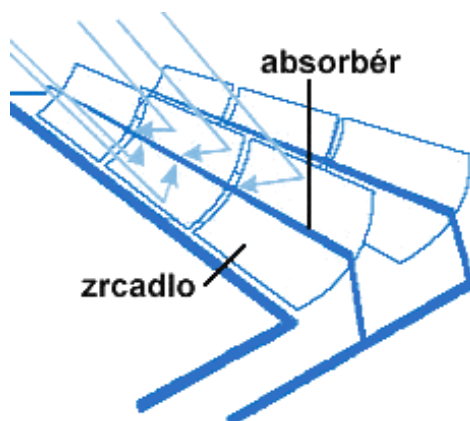
Jedním z dílčích cílů je dostat co nejvíce slunečního záření na přijímač (absorbér) a ohřát tak teplotnou tekutinu. Současná konstrukce přijímačů se různí. Lze se setkat s izolovaným potrubím, plochou umístěnou vysoko na věži či se Stirlingovým motorem.

Teplotnou tekutinou proudící v přijímači (absorbéru) mohou být různá média. Mezi ně lze řadit minerální či vysokoteplotní syntetické oleje. Avšak po překročení teploty okolo 400°C dochází k jejich velmi rychlé degradaci. Pro vyšší teploty je pak využíváno roztavených solí. Použití vody zde není výjimkou, ovšem jen při vysokém tlaku. [12]

Současná technologie solárního pole má z hlediska konstrukčního provedení několik základních představitelů a to parabolický žlab, parabolický reflektor, centrální věžový přijímač a lineární Fresnelův reflektor. [13]

#### 3.1 Parabolický žlab

Parabolický žlab představuje vhodně tvarovaná zrcadla, jež soustřeďují sluneční záření na přijímač (absorbér), vedoucí podél ohniska paraboly. Uvnitř přijímače se nachází teplotná tekutina, která se právě díky koncentraci slunečního záření ohřívá na teplotu okolo 400 °C. Celá sestava zrcadel spolu s přijímačem je namontována na rámu s jedním stupněm volnosti. To umožňuje natáčení celé sestavy za Sluncem. Osa žlabu bývá orientována ve směru sever-jih, což umožňuje sledovat slunce od východu k západu a koncentrovat tak sluneční záření po dobu celého dne s vyšší účinností. [12] [13]



Obrázek č. 5 – konstrukce parabolického žlabu [14]

## **Kolektor**

Při stavbě kolektoru je snaha docílit značné tuhosti konstrukce rámu, která je nezbytná pro zajištění vhodných geometrických a tím i optických vlastností kolektoru. Jsou známy dvě možná konstrukční provedení rámu, a to buď pomocí centrálního prostorového rámu (torzního boxu) nebo pomocí centrální ocelové trubky (torzní trubky). Výhodou použití torzního boxu oproti torzní trubce je vyšší tuhost, a to i při vyšších rychlostech větru. Jeho nevýhoda však spočívá ve vyšších pořizovacích nákladech způsobených větším množstvím materiálu a potřebou velmi přesné montáže. [15]

Materiálem parabolického žlabu nejčastěji bývá stříbřené železo či leštěný plech. Délka žlabu je 100 až 150 metrů a šířka se pohybuje okolo 6 metrů. [15]

## **Přijímač**

Nejčastěji se lze setkat s evakuovaným přijímačem, jenž se skládá ze dvou soustředných potrubí. Vnější potrubí je vyrobeno z borosilikátového skla s antireflexním povrchem pro zlepšení propustnosti slunečního záření. Vnitřní potrubí je oproti tomu vyrobeno z nerezové oceli. Vnější povrch tohoto ocelového potrubí je opticky selektivní za účelem vysoké pohltivosti a nízké emise pro infračervené záření. Uvnitř tohoto potrubí koluje teplotně izolovaná tekutina. Skleněné potrubí je spojeno s potrubím ocelovým pomocí vlnovce. Ten je pevně svařen na jedné straně s vnějším povrchem ocelové trubky a na straně druhé s koncem skleněného potrubí pomocí svařování sklo-kov. Toto však není jeho jediná funkce. Vlnovec dále slouží k odstranění rozdílu tepelné roztažnosti obou potrubí a také vymezuje pevnou prstencovou mezeru určenou pro vakuum za účelem snížení tepelných ztrát. [12] [15]

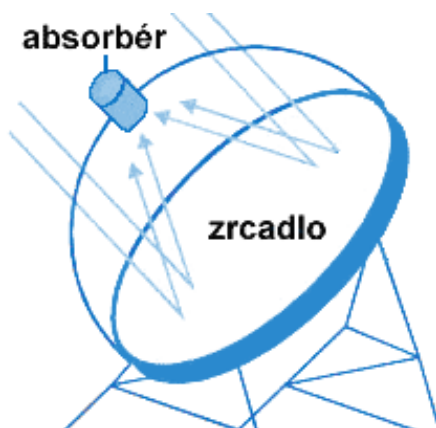
Vzhledem k technické a tak i cenové náročnosti se evakuované přijímače používají pouze při vyšších teplotách, kde je požadována dobrá tepelná účinnost. Vysoká cena je tak kompenzována vyšším tepelným výkonem. Při nižších teplotách se používají neevakuované přijímače. [15]

## **Projekty**

Projekty využívající technologii parabolického žlabu patří v současné době k nejhojnějším a lze je spatřit v USA, Španělsku, Itálii, Egyptě, Jižní Africe, Saudské Arábii, Číně, Indii a dokonce i v Dánsku. Mezi španělské projekty patří například projekt Solacor 2 se solárním polem o rozloze 300 000 m<sup>2</sup> a výkonem 50MW. [16]

### **3.2 Parabolický disk**

Parabolický disk představuje vhodně tvarovanou plochu, jež soustřeďuje sluneční záření do ohniska paraboly, kde se vyskytuje lokální zařízení, jímž je nejčastěji Stirlingův motor. Díky bodové koncentraci se zde dosahuje vysokých teplot až okolo 1 000 °C. Parabolický disk je díky svým dvěma rotačním osám vždy v ideální poloze vůči Slunci. Parabolický disk zároveň představuje plnou clonu natočenou přímo proti slunci, čímž se předejde tzv. kosinovým ztrátám, a má tak nejvyšší potenciál účinnosti solární konverze ze všech současných technologií koncentrované solární energie. [12] [13]



Obrázek č. 6 – konstrukce parabolického disku [14]

### Reflektor

V případě reflektoru parabolického disku je známo několik variant. Může se jednat buď o parabolické mono-zrcadlo, soustavu menších tvarovaných zrcadel, či skupinu menších parabol se společným ohniskem. [12]

Reflektor parabolického disku se nejčastěji vyrábí z pokovených skel či plastů o průměru 1 až 25 metrů. [17]

### Přijímač

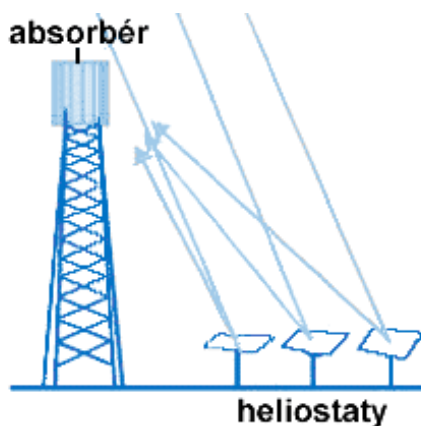
Přijímačem je nejčastěji Stirlingův motor, který převádí tepelnou energii ze slunečního záření na energii mechanickou. Ta je následně pomocí generátoru přeměněna na již požadovanou elektrickou energii. Stirlingův motor se skládá z klikové hřídele spojené písty, pracovního plynu a regenerátoru. Z hlediska pracovního plynu se nejčastěji jedná o vodík či hélium, a to především z důvodů nízké viskozity a vysoké tepelné vodivosti těchto plynů. Regenerátorem je většinou porézní těleso s vysokou tepelnou kapacitou. [17]

### Projekty

Projekty využívající technologii parabolického disku patří v současné době k nejméně častým a lze je spatřit především v USA. Mezi americké projekty patří například projekt Maricopa s počtem 60 parabolických disků a výkonem 1,5MW. [16]

### 3.3 Centrální věžový přijímač

Centrální věžový přijímač představuje velké množství zrcadel (heliostatů), které soustřeďují sluneční záření na přijímač (absorbér) umístěný zpravidla na vrcholu vysoké věže. Zde pak dochází k ohřevu vhodného média až na teplotu okolo 1 500 °C. Heliostaty díky svým dvěma počítačově řízeným rotačním osám umožňují velice přesné sledování polohy Slunce. [12] [13]



Obrázek č. 7 – konstrukce centrálního věžového přijímače [14]

### Heliostat

Heliostaty musí být velmi tuhé, aby se zachovala potřebná přesnost i přes zatížení větrem. Větší odchylka odraženého paprsku by mohla znamenat, že paprsek přijímač mine. Jedná se tak o velmi nákladná zařízení. U heliostatů je také nutné uvažovat s potřebnou roztečí jejich rozmístění, aby se zabránilo vzájemnému stínění heliostatů či blokování odraženého světla na cestě k přijímači. Přesné rozmístění heliostatů však závisí na typu centrálního přijímače. [18]

Pro výrobu heliostatů jsou primárně využívány konvenční skla a oceli. Velikost heliostatů je velmi rozdílná a pohybuje se od 1 do 200 čtverečních metrů. Jejich povrch je však potřeba během provozu čistit. [18] [19]

### Přijímač

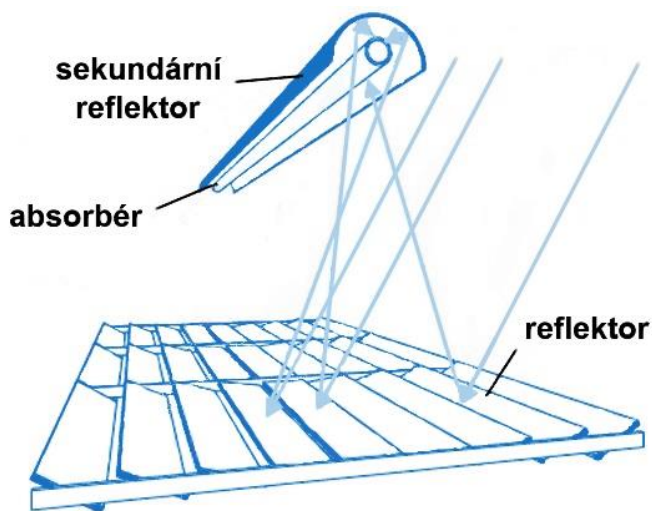
Věžový přijímač má hned několik základních konfigurací. První z nich je tvořena vnějším válcem. Absorpční plocha je tak patrná ze všech směrů, čemuž odpovídá i rozložení heliostatů. Nevýhodou této konfigurace je však vystavení zahřívaného povrchu vlivům prostředí. Hlavní alternativou této konfigurace je přijímač s dutinou, v níž se nachází absorpční plocha umístěná v izolovaném krytu. To způsobuje kuželové rozmístění heliostatů. Pro shromáždění stejného množství energie bude dutinová věž vyšší než věž s vnějším válcem. Mezi další alternativy patří například věž, využívající sekundárního hyperbolického zrcadla, jež směřuje paprsky dolů na vzhůru vyhlížející přijímač. [18]

### Projekty

Projekty využívající technologii centrálního věžového přijímače lze v současné době spatřit v USA, Chile, Španělsku, Řecku, Turecku, Jižní Africe, Číně, Indii, Austrálii a dokonce i v Německu. Mezi španělské projekty patří například projekt Planta Solar 20 se solárním polem o rozloze 150 000 m<sup>2</sup> a výkonem 20MW. [16]

## 3.4 Lineární Fresnelův reflektor

Lineární Fresnelův reflektor představuje řady rovinných zrcadel (reflektorů), které společně se sekundárním zakřiveným zrcadlem (reflektorem) soustřeďují sluneční záření na stacionární přijímač (absorbér), jenž je přivrácen dolů k rovinným zrcadlům a zároveň je umístěn pod sekundárním reflektorem. Uvnitř přijímače se nachází dané médium, které se právě díky koncentraci slunečního záření ohřívá na teplotu okolo 400 °C. Rovinná zrcadla jsou uložena na jedné ose tak, že je umožněno natáčení kteréhokoliv řady zrcadel nezávisle na ostatních. [12] [13]



Obrázek č. 8 – konstrukce lineárního Fresnelova reflektoru [20]

### Reflektor

Jedná se o rovinná či jen mírně zakřivená zrcadla připevněna na ocelovou konstrukci. Jedním ze základních nedostatků technologie lineárního Fresnelova reflektoru je stínění přichozího slunečního záření, ale i blokování již odraženého slunečního záření na cestě k přijímači z důvodů bližšího uspořádání reflektorů. Tomu lze zamezit buď použitím vyššího přijímače či vystavením druhého přijímače. Reflektory pak mohou být střídavě natáčeny bez většího stínění. [21] [22]

### Přijímač

Přijímač je složen z vnějšího potrubí vyrobeného z borosilikátového skla a vnitřního tlakového potrubí obsahujícího nejčastěji vodu o vysokém tlaku. Potrubí jsou vzájemně spojena pomocí radiálních a cylindrických vložek, jež tak zvětšují plochu pro lepší přenos tepla. Aby však nedocházelo k velkým tepelným ztrátám, je prostor mezi potrubím evakuován. Průměr vnějšího potrubí se pohybuje okolo 45 mm. [22]

### Projekty

Projekty využívající technologii lineárního Fresnelova reflektoru lze v současné době spatřit v USA, Španělsku, Francii, Itálii, Egyptě, Maroku, Číně, Indii a Austrálii. Mezi španělské projekty patří například projekt Puerto Errado 2 se solárním polem o rozloze 302 000 m<sup>2</sup> zahrnující 28 řad o délce 940m a výkonem 30MW. [16]

## 4 Současná technologie akumulace tepelné energie

Akumulace tepelné energie umožňuje provoz solární elektrárny i při nedostatku slunečního záření, tedy v době po západu slunce, brzkého rána či v době špatného počasí. [12]

Pro akumulaci tepelné energie se využívá tepelně izolovaných akumulčních nádrží. Ty jsou v závislosti na použité technologii naplněny nejrůznějšími médii. Velkou výhodou akumulace tepelné energie je uchovávání tepla v nádržích až s 98% účinností. [12]

V současné době existuje několik konfigurací v závislosti na velikosti zásobní nádrže a výkonu turbíny. Budeme-li uvažovat pouze velké nádrže z důvodů soběstačnosti, tak se nám nabízí hned tři možnosti v podobě základní, střední a špičkové zátěže. Základní zátěž umožňuje výrobu elektřiny po celý den, oproti tomu špičková zátěž vyrábí elektřinu pouze pár hodin denně v době největší poptávky a tím umožňuje prodej elektřiny za nejvyšší cenu. [12]

Dle použité kombinace média teplonosné tekutiny solárního pole a média akumulční nádrže lze ukládání tepelné energie dělit na přímé či nepřímé. Je-li médium teplonosné tekutiny shodné s médiem akumulční nádrže, jde o ukládání přímé. Nepřímé ukládání pak používá rozdílných médií pro teplonosnou tekutinu a akumulční nádrž. Z toho důvodu je zde zapotřebí přítomnost tepelných výměníků. [23]

Současná technologie akumulace tepelné energie se skládá ze čtyř základních typů, a to akumulace citelného tepla, latentního tepla, termochemického tepla a tepla sorpčního. [24]

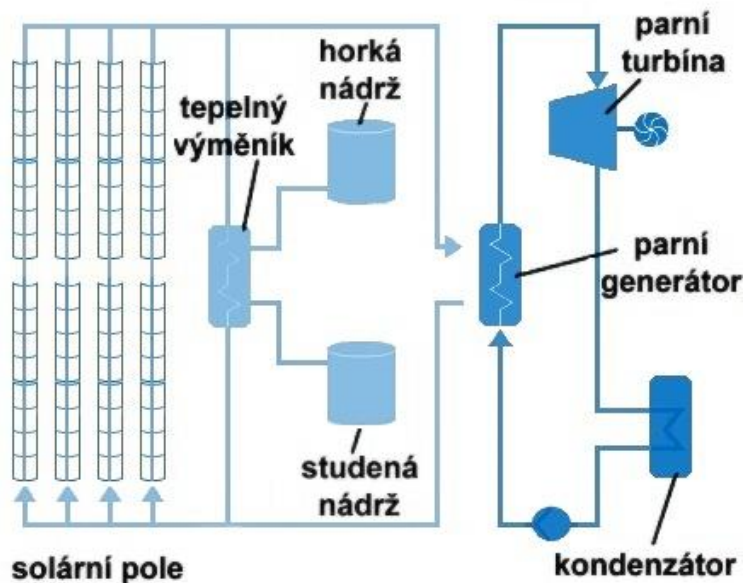
### 4.1 Akumulace citelného tepla

Při akumulaci citelného tepla se tepelná energie ukládá (uvolňuje) zvýšením (snížením) teploty akumulčního média, jímž mohou být jak kapaliny, tak i pevné látky. Jde o čistě fyzikální proces bez jakékoliv změny fáze. Z toho důvodu je množství akumulované energie závislé na množství média, měrné tepelné kapacitě média a na změně jeho teploty. Nevýhodou skladování citelného tepla je však omezená hustota tepelné energie, což způsobuje potřebu dostatečně velkého množství akumulčního média. [24]

#### Nádrže s kapalným médiem

Mezi kapalná média se řadí voda, minerální a syntetické oleje, směsi dusičnanů či roztavené soli. Právě zmiňované roztavené soli jsou považovány za jedno z nejlepších médií, a to pro jejich výbornou tepelnou stabilitu při vysokých teplotách, nízký tlak par a nízkou viskozitu. [24]

Jedním z konceptů nádrží s kapalným médiem je koncept dvou nádrží. Roztavené soli zde cyklicky obíhají mezi horkou a studenou nádrží, jež má, i přes svůj název, stále teplotu několik stovek stupňů celsia. Při přímém ukládání tepelné energie je během fáze nabíjení akumulční materiál ze studené nádrže čerpán přes solární pole, kde se ohřívá, a následně je uložen v horké nádrži. Při nepřímém ukládání tepelné energie je během fáze nabíjení akumulční materiál ze studené nádrže čerpán přes výměník tepla, kde se ohřívá, a následně je uložen v horké nádrži. Při vybijecí fázi je směr čerpání akumulčního materiálu opačný. Při přímém ukládání tepelné energie lze dosáhnout vyšších parametrů páry oproti nepřímému ukládání, což vede k vyšší efektivitě výroby energie. Nevýhodou přímého ukládání je však udržení roztavených solí v kapalném stavu z důvodu jejich nízké tepelné vodivosti, jež tak komplikuje jejich případné tání. Proto je zapotřebí určitého množství tepla, které udržuje teplotu roztavených solí nad teplotou tání i po západu slunce. [12] [23]



Obrázek č. 9 – schéma akumulace citelného tepla dvěma nádržemi s nepřímým ukládáním [25]

Dalším z konceptů nádrží s kapalným médiem je koncept s parním akumulátorem. Jedná se o zařízení zpočátku naplněné nasycenou vodou a párou. Během fáze nabíjení vstupuje do zásobníku nasycená voda, jež zvyšuje původní hladinu. Tlak a teplota zůstávají konstantní. Při vybíjecí fázi je nutné snížit tlak v akumulátoru. To má za následek výrobu nasycené páry, jež snižuje tlak v akumulátoru, a vybíjení tak může plynule pokračovat. Parní akumulátory jsou vhodné pro takové technologie, kde se vyrábí nasycená voda přímo v solárním poli. [26]

### Nádrže s pevným médiem

Mezi pevná média se řadí beton, keramika, grafit, kámen, ruda či písek. Pevná média mají obecně velkou tepelnou odolnost v širokém intervalu teplot, vysokou tepelnou vodivost a nízké náklady. [24]

Jedním z konceptů nádrží s pevným médiem je koncept s integrovaným tepelným výměníkem. Jedná se o trubkový výměník, jenž je uložen v betonu. Díky dobrému kontaktu mezi betonem a trubkami je umožněn rychlý přenos tepla. Výstupní teplota se zde však mění v závislosti na teplotě betonu. [24]

Dalším z konceptů nádrží s pevným médiem je koncept kontejnerů obsahujících kámen či rudu. Teplonosná tekutina protékající kontejnerem vytváří přímý kontakt s akumulacním médiem, což usnadňuje přenos tepla. [23]

Mezi koncepty nádrží s pevným médiem patří také koncept s pevnými částicemi. Jde o pevné zrnité částice, jež přímo absorbují koncentrované sluneční záření. Tyto částice dosahují vysokých teplot až nad 1 000°C a jsou dále skladovány v horkém akumulacním zásobníku. [24]

### Projekty

Projekty využívající technologii akumulace citelného tepla patří v současné době k nejhodnějším. Mezi projekty využívající nádrží s kapalným médiem, a to konkrétně s roztavenou solí, patří španělský projekt Manchasol-2 s výdrží při plné zátěži 7,5 hodin. Naopak mezi projekty využívající nádrží s pevným médiem, a to na bázi konceptu kontejnerů obsahující kámen, lze zařadit marocký projekt Baha Pilot Plant s výdrží při plné zátěži 5 hodin. [16]



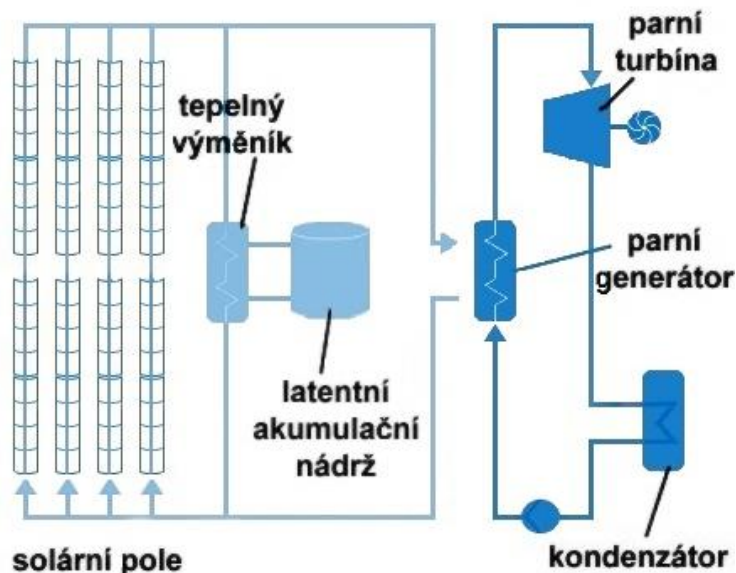
## 4.2 Akumulace latentního tepla

Při akumulaci latentního tepla se tepelná energie ukládá (uvolňuje) změnou fáze akumulčního média za konstantní teploty. Jde o čistě fyzikální proces bez jakékoliv chemické reakce. Výhodou skladování latentního tepla je vyšší hustota tepelné energie a také úzký rozsah teplot při nabíjení (vybíjení). Nevýhodou skladování latentního tepla je však nízká tepelná vodivost akumulčních médií. To má za následek velmi pomalý průběh nabíjecích (vybíjecích) procesů. [24]

Mezi akumulční média se řadí především roztavené soli, jako je eutektikum dusičnanu sodného či eutektikum dusičnanu draselného. Právě zmiňované roztavené soli jsou považovány za jedno z nejlepších médií pro jejich velké skupenské teplo tání, malé objemové změny fázové přeměny a pro reverzibilní cyklus tání (tuhnutí). Bohužel se potýkají s již zmíněnou nízkou tepelnou vodivostí. Některé přístupy však podporují zlepšení přenosu tepla a jsou založeny především na rozšíření teplosměnné plochy či přidání kompozitního materiálu. [23]

Jedním z přístupů rozšíření teplosměnné plochy je využívání žebrovaných trubek. Ty by měly odolávat nejen korozi, ale i termodynamickému namáhání způsobenému objemovou roztažností akumulčního materiálu při změně fáze. Žebrované trubky bývají nejčastěji vyrobeny z grafitu či hliníku. Oba tyto materiály vykazují vysokou tepelnou vodivost a nízké pořizovací náklady. Jejich použití společně s roztavenými solemi je však z důvodu korozivzdornosti teplotně limitováno. Dalším z přístupů rozšíření teplosměnné plochy je makro-zapouzdření akumulčního média. To se provádí pomocí kovových kapslí, jež jsou ukládány do tlakových nádob. Tento přístup je však ekonomicky nevýhodný z důvodu použití velkého množství oceli a zároveň pro požadavek vysoké kvality utěsnění kapslí kvůli možné kontaminaci. [23]

Jedním z přístupů přidání kompozitního materiálu je rozptýlení materiálu vykazujícího vysokou tepelnou vodivost v akumulčním médiu. V dalším přístupu je akumulční médium vloženo do matic z hliníku či grafitu. Tento přístup se zdá být nákladově přijatelný. Použití je však opět z důvodu korozivzdornosti teplotně limitováno. [23]



Obrázek č. 10 – schéma akumulace latentního tepla [25] [27]

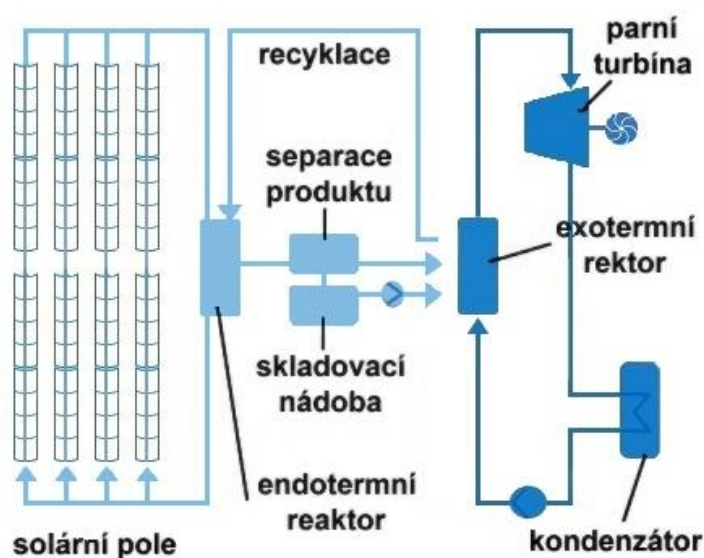
### Projekty

Projekty využívající technologii akumulace latentního tepla patří v současné době k již reálným. Ukázkou je španělský projekt Litoral of Endesa využívající žebrovaných trubek. [23]

### 4.3 Akumulace termochemického tepla

Při akumulaci termochemického tepla se tepelná energie ukládá (uvolňuje) pomocí zvrtných chemických reakcí. Výhodou skladování termochemického tepla je velmi vysoká hustota této energie, tudíž není zapotřebí velkého množství akumulčního média. Dále možnost skladování reakčních složek při okolní teplotě je též výhodou z důvodů minimalizace tepelných ztrát. Nevýhodou skladování termochemického tepla je však nízká tepelná vodivost akumulčních médií či neúplná vratnost některých reakcí. [24]

Akumulace termochemického tepla je založena na již zmíněné zvrtné chemické reakci, kdy endotermní reakcí z výchozích látek na produkty dochází k akumulaci přebytečného tepla. Výsledné reakční produkty jsou následně skladovány odděleně. Při jejich sloučení dojde k exotermní reakci. Tedy ke zpětné přeměně reakčních produktů na výchozí látky za uvolnění dříve absorbovaného přebytečného (reakčního) tepla. [23]



Obrázek č. 11 – schéma akumulace termochemického tepla s nepřímým ukládáním [25] [28]

#### Projekty

Projekty využívající technologii akumulace termochemického tepla není možné v současné době reálně spatřit, jelikož tato technologie teprve podléhá vývoji. [23]

### 4.4 Akumulace sorpčního tepla

Při akumulaci sorpčního tepla se tepelná energie ukládá (uvolňuje) pomocí desorpce (sorpce) vodní páry do daného sorbentu, jenž může být jak v pevném tak v kapalném stavu. U sorbentu v pevném stavu mluvíme o adsorpci natož u sorbentu v kapalném stavu o absorpci. Výhodou skladování sorpčního tepla je velmi vysoká hustota této energie. [23]

#### Projekty

Projekty využívající technologii akumulace sorpčního tepla opět není možné v současné době reálně spatřit z důvodu probíhajícího vývoje. [23]

## 5 Tepelné oběhy pro CSP

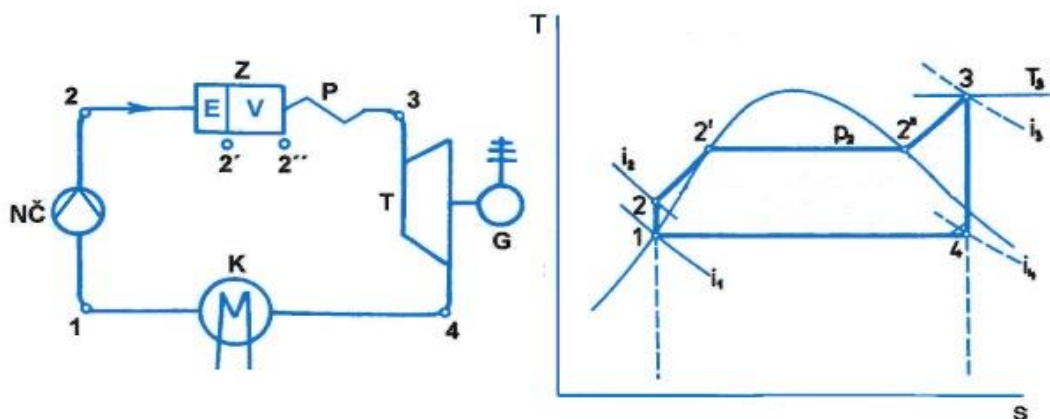
V tepelných obězích dochází k přeměně tepelné energie na energii mechanickou. Ta je následně za pomoci generátoru přeměněna na energii elektrickou. Důležitým parametrem každého oběhu je především jeho účinnost. Ta je dána množstvím přijatého a odevzdaného tepla, jež se pojí s druhým termodynamickým zákonem.

### 5.1 S parní turbínou

Parní turbína je využívána pro veškeré typy solárního pole. Musí umožnit pružný provoz znamenající rychlé snížení či zvýšení výkonu v závislosti na dopadu slunečního záření. Tepelný oběh s parní turbínou je také díky jednoduchosti přidružení nového zdroje tepla nejvyužívanějším oběhem pro přeměnu tepelné energie na energii mechanickou, jež je generátorem přeměněna na energii elektrickou. [5]

#### Parní Rankin-Clausiov oběh

Jedná se o oběh, jehož pracovním médiem je vodní pára. Oběh se skládá z adiabatické komprese, izobarického a izotermického přívodu tepla, adiabatické expanze a izobarického a zároveň izotermického odvodu tepla. Při adiabatické kompresi (1-2) dochází ke stlačení vody v napájecím čerpadle, která dále pokračuje ke zdroji tepla. Zde probíhá izobarický ohřev (2-2'), dále izobarické a zároveň izotermické vypařování (2'-2'') a následně izobarické přehřátí páry (2''-3). Při adiabatické expanzi (3-4) vstupuje přehřátá pára do parní turbíny, kde koná práci, jež vede k pohonu elektrického generátoru napojeného na hřídel parní turbíny a k výrobě elektrické energie. Pára dále vede do kondenzátoru. Zde probíhá izobarický a zároveň izotermický odvod tepla (4-1) v podobě kondenzace páry. Vzniklý kondenzát pokračuje do napájecího čerpadla. Tím se dostáváme zpět na začátek oběhu, který se neustále opakuje. [29]



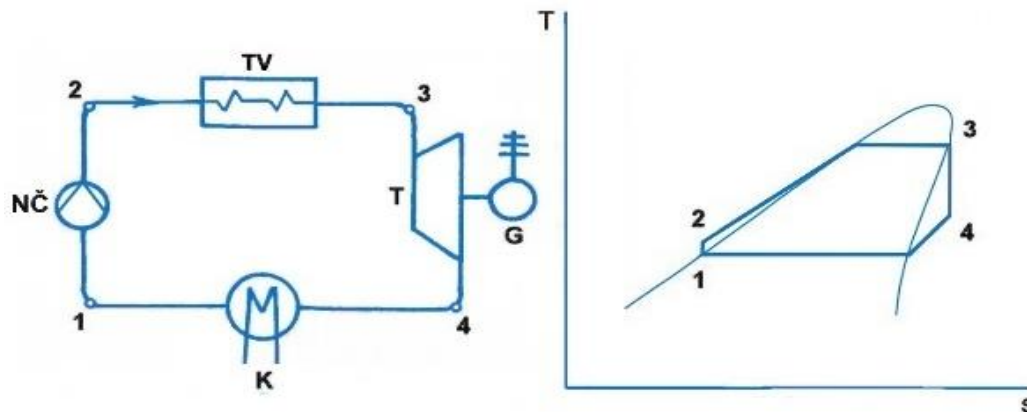
Obrázek č. 12 – schéma a T-s diagram parního Rankin-Clausiova oběhu [29]

Pro dosažení vyšší účinnosti oběhu je v praxi možnost realizace přehřívání páry či regenerativního ohřevu napájecí vody. Přehřívání zahrnuje rozdělení turbíny na vysokotlaký a nízkotlaký díl. Pára je tak po částečné expanzi ve vysokotlakém díle vedena zpět ke zdroji tepla, kde je přehřívána, a následně vedena do nízkotlakého dílu pro dokončení procesu expanze. Při regenerativním ohřevu napájecí vody je pára na vhodném místě odebrána z turbíny a použita pro předehřev napájecí vody vstupující do tepelného zdroje. Zvyšování účinnosti oběhu se nazývá Carnotizace, jež představuje snahu přiblížit se účinností ideálnímu tepelnému oběhu, kterým je Carnotův cyklus. [29]

Nízkoteplotní oběh s parní turbínou je nejčastěji využíván pro solární pole typu parabolického žlabu či lineárního Fresnelova reflektoru. Z důvodů dosahování nižších teplot bývají teplosnosnou tekutinou především minerální oleje. Vysokoteplotní oběh s parní turbínou je naopak využíván pro solární pole typu věžového přijímače s roztavenými solemi coby teplosnosnou tekutinou. [12]

### Organický Rankin-Clausiov oběh

Jedná se o oběh, jehož pracovním médiem je organická látka. Oběh se skládá z adiabatické komprese, izobarického a izotermického přívodu tepla, adiabatické expanze a izobarického a zároveň izotermického odvodu tepla. Při adiabatické kompresi (1-2) dochází ke stlačení organického média v napájecím čerpadle, které dále pokračuje ke zdroji tepla. Zde probíhá izobarický ohřev a dále izobarické a zároveň izotermické vypařování (2-3). Při adiabatické expanzi (3-4) vstupuje organická pára do parní turbíny, kde koná práci, jež vede k pohonu elektrického generátoru napojeného na hřídel parní turbíny a k výrobě elektrické energie. Organická pára dále vede do kondenzátoru. Zde probíhá nejprve izobarické ochlazení páry na mez sytosti a následně izobarický a zároveň izotermický odvod tepla (4-1) v podobě kondenzace páry. Vzniklý kondenzát pokračuje do napájecího čerpadla. Tím se dostáváme zpět na začátek oběhu, který se neustále opakuje. [30]



Obrázek č. 13 – schéma a T-s diagram organického Rankin-Clausiova cyklu s benzenem [30]

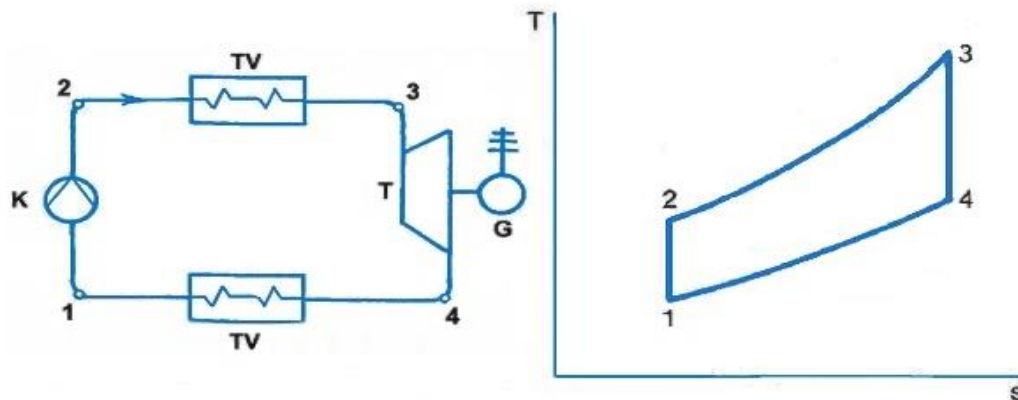
Mezi používané organické látky patří benzen, toluen, čpavek, fluorované uhlovodíky, rozvětvené uhlovodíky či silikonové deriváty. Velkou výhodou organických látek je nízký bod varu, jenž umožňuje využití nízkopotenciální zdroje tepla, a také sklon pravé mezní křivky, jenž zamezuje tvorbě kapalně fáze v turbíně a zabraňuje tak erozi koncových lopatek. Vyšší molekulární hmotnost organické látky představuje jak výhodu, v podobě potřeby nízkého počtu expanzních stupňů turbíny, tak nevýhodu, v podobě potřeby náročnější konstrukce turbíny kvůli dřívějšímu dosahu rychlosti zvuku. Dalšími nevýhodami organických látek jsou vysoké hodnoty potenciálu úbytku ozonové vrstvy (ODP) a potenciálu ke globálnímu oteplování (GWP). Z toho důvodu jsou kladeny vysoké nároky na těsnost oběhu. [30] [31]

Organický Rankin-Clausiov oběh je nejčastěji využíván pro solární pole typu parabolického žlabu či lineárního Fresnelova reflektoru.

## 5.2 S plynovou turbínou

Jedná se o Braytonův oběh, jehož pracovním médiem je obvykle dusík či helium. Oběh se skládá z adiabatické komprese, izobarického přívodu tepla, adiabatické expanze a izobarického odvodu tepla. Při adiabatické kompresi (1-2) dochází ke stlačení plynu v kompresoru.

Stlačený plyn dále pokračuje do tepelného výměníku. Zde probíhá izobarický přívod tepla (2-3) ze spalin vzniklých spalováním za podpory tepla ze solárního pole. Při adiabatické expanzi (3-4) vstupuje plyn do plynové turbíny, kde expanduje a koná tak práci, jež vede k pohonu elektrického generátoru napojeného na hřídel plynové turbíny a k výrobě elektrické energie. Plyn dále vede do výměníku tepla. Zde probíhá izobarický odvod tepla (4-1). Plyn dále pokračuje do kompresoru. Tím se dostáváme zpět na začátek oběhu, který se neustále opakuje. Je-li však pracovním médiem vzduch, je teplo místo v tepelném výměníku předáváno ve spalovací komoře společně se spalinami a odvod tepla probíhá do okolí, z čehož vyplývají nevhodné v podobě erozivních účinků spalin na turbínu a vysokých tepelných ztrát. [32]



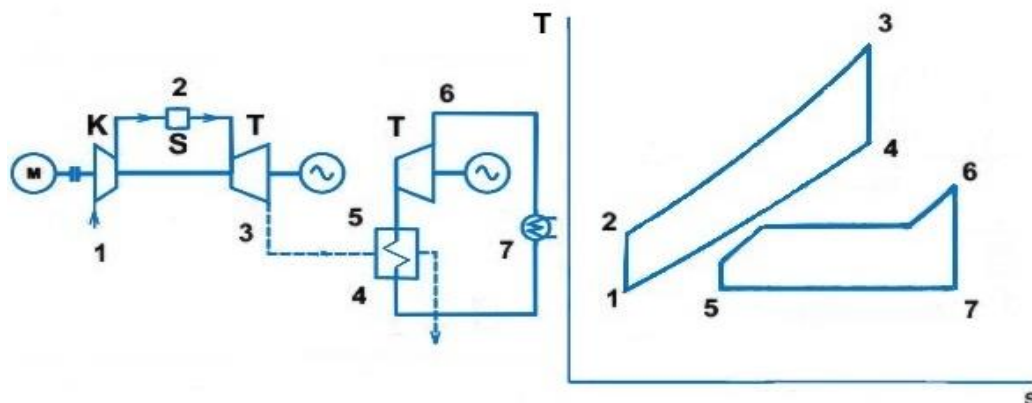
Obrázek č. 14 – schéma a T-s diagram uzavřeného Braytonova cyklu [29] [33]

Plynová turbína je využívána především pro solární pole typu věžového přijímače. Z důvodů potřeby dosáhnout vysokých teplot před expanzí se využívá konečného ohřevu za pomoci spalování zemního plynu. To zároveň poskytuje pružnou reakci na kolísání dopadu slunečního záření. [5]

### 5.3 Paroplynový oběh

Parní turbína je společně se spalovací turbínou využívána z důvodů snížení emisí a snížení odváděného tepla. Vysoká teplota spalin ze spalovací turbíny tak umožňuje zvýšení parametrů páry pro parní turbínu. Paroplynový oběh lze také realizovat kombinací parní turbíny s plynovou turbínou. [5]

Jedná se vlastně o paroplynový oběh s využitím tepla ze solárního pole, jež se podílí na generaci páry pro parní turbínu. [12]

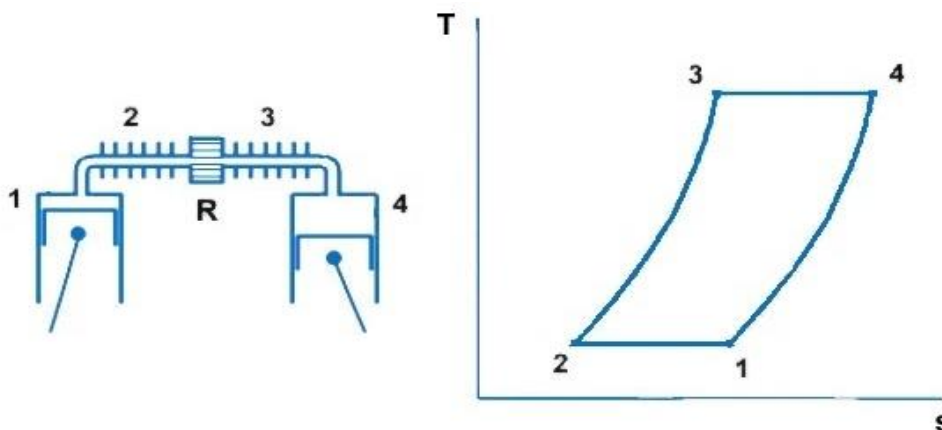


Obrázek č. 15 – schéma a T-s diagram paroplynového oběhu [29] [33] [34]



## 5.4 Se Stirlingovým motorem

Jedná se o oběh, jehož pracovním médiem je vodík či hélium. Oběh se skládá z izotermické komprese, izochorického přívodu tepla, izotermické expanze a izochorického odvodu tepla. Při izotermické kompresi (1-2) odevzdává plyn teplo do chladicího média a kvůli stlačení je nucen projít přes regenerátor. Zde probíhá izochorický přívod dříve absorbovaného tepla (2-3) regenerátorem plynu. Při izotermické expanzi (3-4) plyn přijímá teplo právě díky koncentraci slunečního záření a expandující plyn tak vykonává práci v podobě pohybu pístu. Následně pomocí připojeného elektrického generátoru je mechanická energie pístu přeměněna na již požadovanou elektrickou energii. Při vratném pohybu pístu je ohřátý plyn nucen projít zpět přes regenerátor, kde dochází k izochorickému odvodu tepla (4-1). Plyn pokračuje do chladného prostoru. Tím se dostáváme zpět na začátek oběhu, který se neustále opakuje. [17]



Obrázek č. 16 – schéma a T-s diagram oběhu se Stirlingovým motorem [35] [36]

Stirlingův motor je využíván pouze pro solární pole typu parabolického disku.

## 6 Návrh heliotechnického zařízení a tepelného uložště

Pro návrh bylo využito volně dostupného softwaru SAM neboli System Advisor Model, jenž byl vyvinut Národní laboratoří pro obnovitelné zdroje USA. Jedná se o technickoekonomický model určený pro osoby zapojené do odvětví obnovitelných zdrojů energie. [37]

Z technického hlediska umožňuje SAM návrh modelu od fotovoltaických elektráren, koncentračních solárních elektráren, větrných elektráren, přes geotermální elektrárny, až po elektrárny využívající spalování biomasy. Některé z těchto modelů se dále dělí na fyzikální a empirické. V případě fyzikálního modelu jsou části elektrárny charakterizovány fyzikálními zákony, oproti tomu empirický model využívá již naměřených dat. [37]

Z ekonomického hlediska umožňuje SAM návrh modelu od rezidenčních a komerčních projektů, přes projekty prodávající elektřinu na základě kupní smlouvy, až po projekty ve vlastnictví třetí strany. [37]

Pro vlastní návrh koncentrační solární tepelné elektrárny bude využita technologie parabolického žlabu na bázi fyzikálního modelu. Ekonomická stránka celého projektu bude zanedbána.

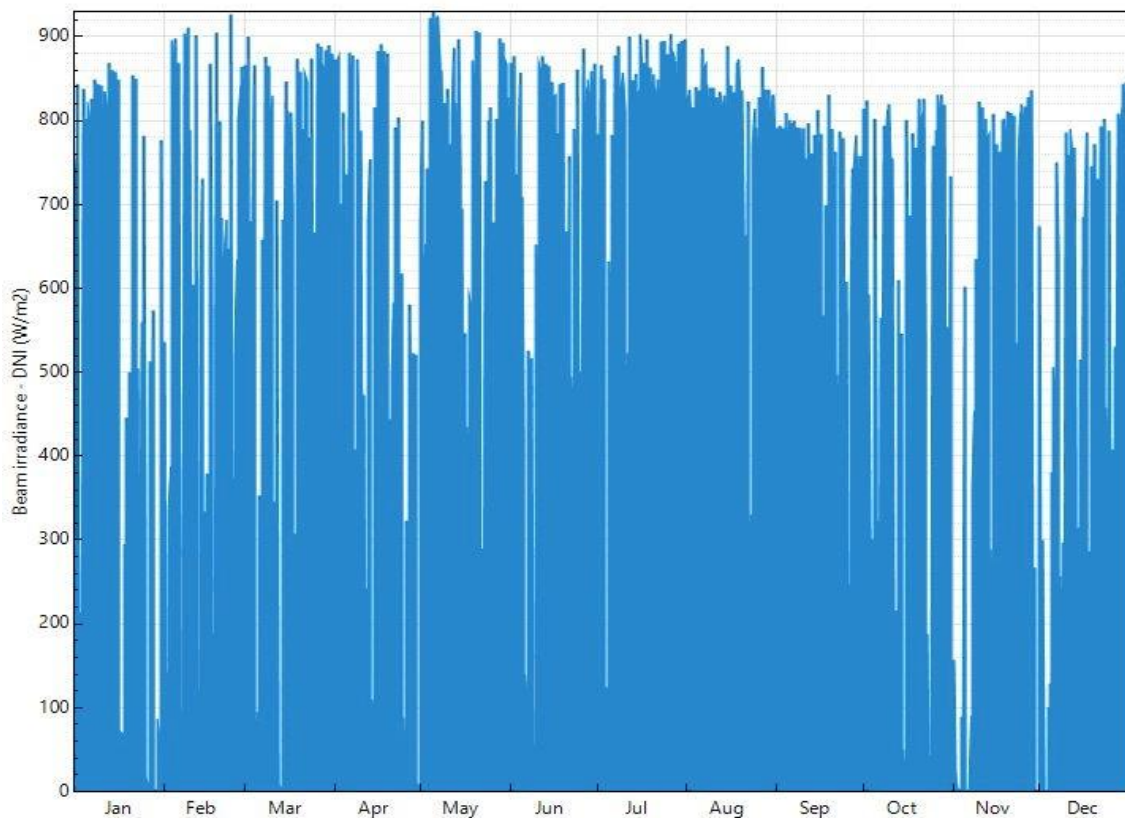
### 6.1 Umístění

Lokalita	
Město	Sevilla
Země	Španělsko
Nadmořská výška	31 m
Zeměpisná šířka	37,42°N
Zeměpisná délka	-5.9°E
Počasí	
Přímé záření (DNI)	4,86 kWh/m <sup>2</sup> /den
Difuzní záření (DHI)	1,75 kWh/m <sup>2</sup> /den
Průměrná rychlost větru	2,7 m/s
Průměrná teplota	18,4°C

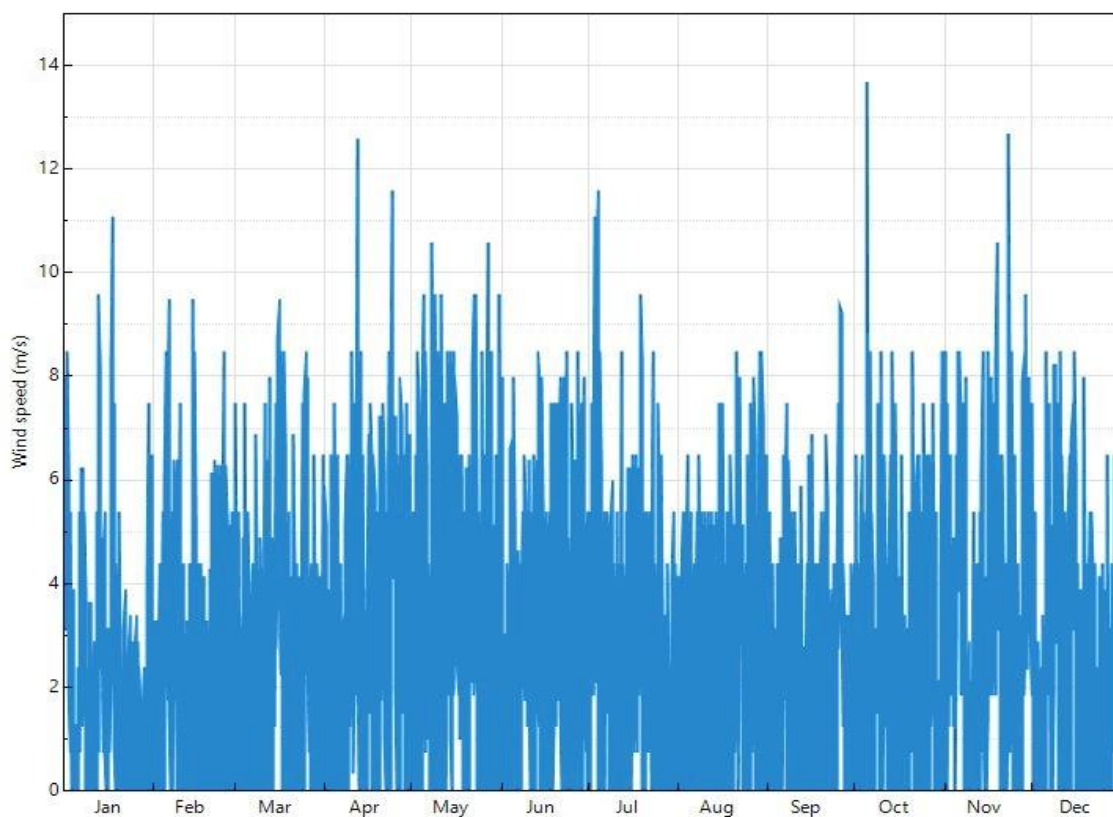
Tabulka č. 1 – zadané hodnoty pro umístění

Návrh heliotechnického zařízení s tepelným uložštěm bude proveden pro jižní oblast Španělska v okolí města Sevilla. Z dat o počasí pro uvedenou lokalitu byla zjištěna především hodnota o dopadu přímého slunečního záření a také hodnota rychlosti větru.

Průměrné množství dopadajícího přímého slunečního záření na jeden metr čtvereční povrchu Země činí 4,86 kWh za den, což představuje 1 774 kWh za rok. Průměrná rychlost větru činí 2,7 m/s. Dle Beaufortovy stupnice spadá tato rychlost do druhého stupně z celkových dvanácti a lze tak prohlásit uvedenou hodnotu rychlosti větru za nízkou. Nízká hodnota rychlosti větru je pro návrh heliotechnického zařízení přínosná především z důvodů nižších konvekčních ztrát a také z důvodů snížení požadavků na tuhost konstrukce rámu včetně sledovacího systému, jehož krouticí moment musí tuto rychlost překonat. [37]



Graf č. 1 – znázornění dopadu přímého slunečního záření za rok



Graf č. 2 – znázornění rychlosti větru za rok

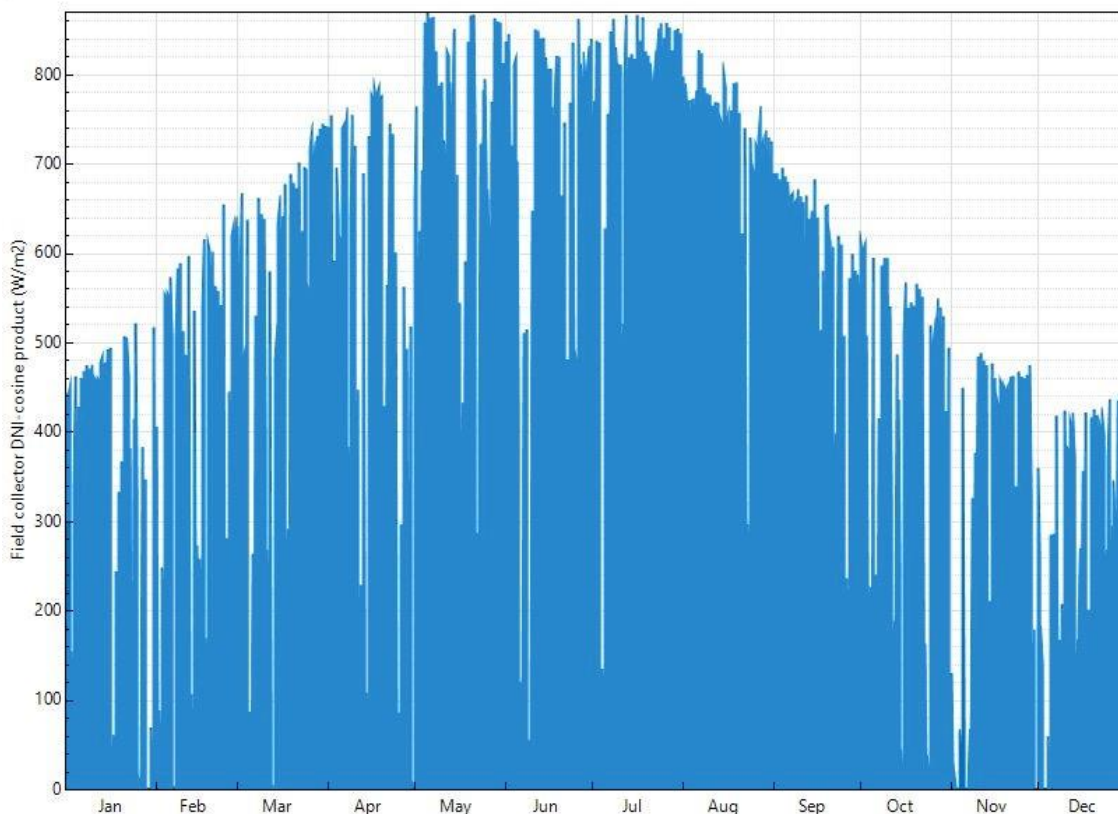


## 6.2 Solární pole

<b>Základní parametry</b>	
Záření v návrhu	870 W/m <sup>2</sup>
Solární koeficient	2
Ne-solární koeficient	1,4
Počet podsekcí	2
Počet kolektorů/absorbérů na smyčku	8
Řádkování	15 m
Úhel natočení	170°
Úhel nasazení	10°
Drsnost potrubí	4,57e <sup>-5</sup>
Částečné rozostření	Ano
Minimální přípustná teplota	150°C
<b>Teplonosná tekutina</b>	
Typ	Therminol VP-1
Minimální průtok	1 kg/s
Maximální průtok	12 kg/s
Minimální provozní teplota	12°C
Maximální provozní teplota	400°C
Vstupní teplota	293°C
Výstupní teplota	391°C
Účinnost čerpadla	0,85
<b>Čištění</b>	
Spotřeba vody na čištění	0,7 L/m <sup>2</sup>
Počet čištění za rok	63
<b>Setrvačnost potrubí</b>	
Na elektrickou kapacitu	0,2 kWh/K-MWt
Na jednotku délky	4,5 Wh/K-m

Tabulka č. 2 – zadané hodnoty pro solární pole

Hodnota intenzity záření v návrhu činí 870 W/m<sup>2</sup>. Její velikost byla určena na základě maximální roční hodnoty grafu, který znázorňuje množství přímého záření využitého solárním polem. V případě zvolení nižší hodnoty by došlo ke zvýšení velikosti pole, což by vedlo k předimenzování návrhu, a ztrátě tak velkého množství tepelné energie. V opačném případě by se velikost pole snížila a nebylo by možné dosáhnout požadovaného množství tepelné energie. [37]

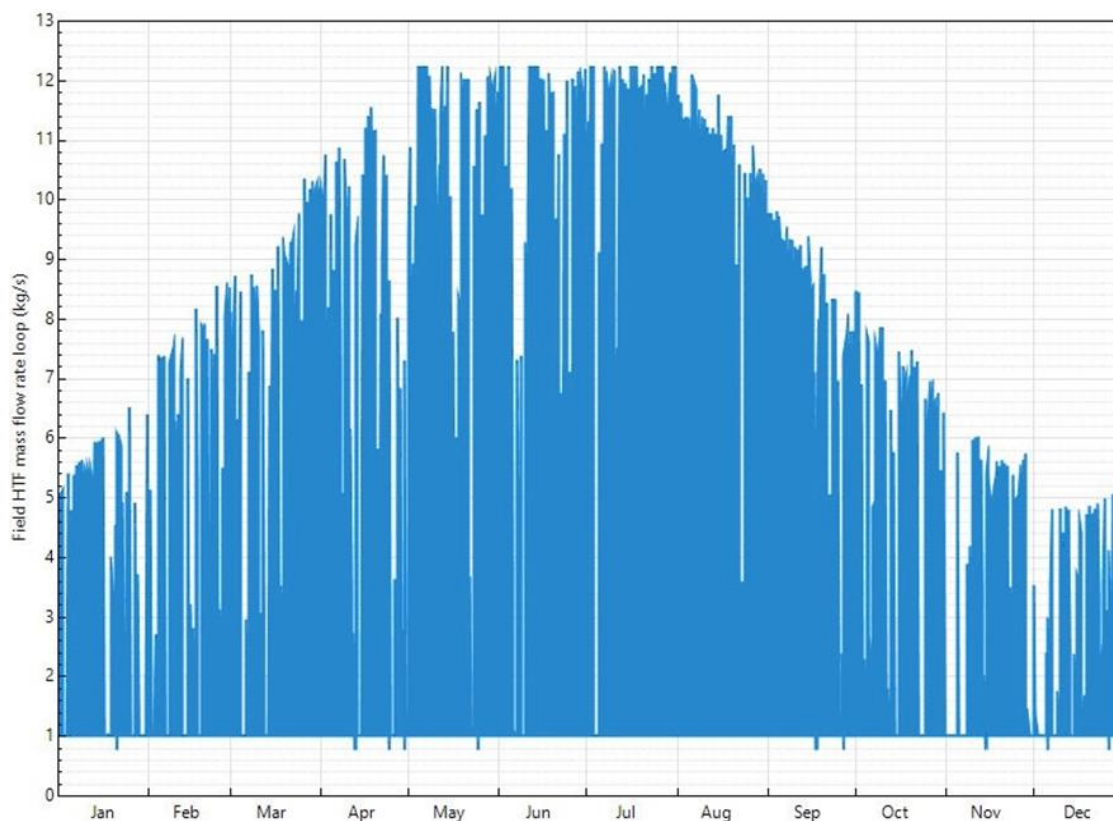


Graf č. 3 – znázornění množství přímého záření využitého solárním polem za rok

Solární koeficient o velikosti 2 představuje násobek hrubého konstrukčního výkonu bloku, jenž tak zajišťuje optimální plochu solárního pole na základě maximalizace času v roce, kdy pole generuje dostatek tepelné energie k pohonu výkonového bloku, a minimalizace nákladů na instalaci a provoz. Není to však jediný způsob výpočtu plochy solárního pole. Alternativou tohoto výpočtu je přímé zadání plochy solárního pole obsazené smyčkami. Při tomto způsobu je dobře patrné, že zadaná plocha je vždy menší než celková plocha zrcadlového povrchu smyček. [37]

Dále se návrh solárního pole skládá ze dvou podsekcí. Ty určují umístění a tvar potrubí, které vede teplotnosnou tekutinu do výkonového bloku, a ovlivňuje tak velikost tepelných ztrát. Podsekcce se poté skládají ze smyček, jež jsou tvořeny osmi shodnými sestavy kolektor/absorbér. [37]

Teplotnosnou tekutinou byl zvolen syntetický olej typu Therminol VP-1. Průtok tohoto oleje se pohybuje v rozmezí od 1 kg/s až po 12 kg/s v závislosti na dopadu záření, jenž ovlivňuje rychlost ohřevu uvedené tekutiny. Provozní teploty jsou dány výrobcem. Minimální provozní teplota je určena teplotou zamrznutí. V praxi však bývá ještě o několik stupňů vyšší za účelem snížení viskozity oleje. Na druhé straně maximální provozní teplota je určena teplotou degradace oleje. Vstupní a výstupní teplota se pak pohybuje v takto určeném teplotním rozmezí. [37]

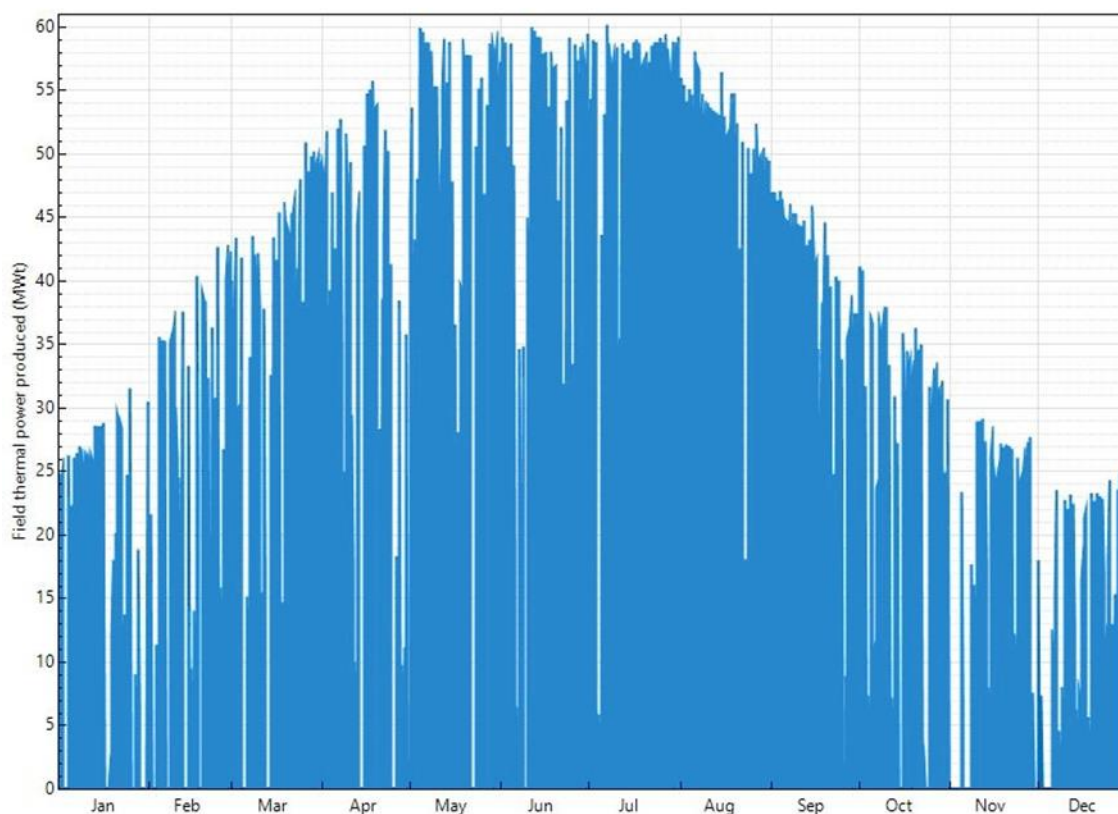


Graf č. 4 – znázornění průtoku teplotné tekutiny za rok

Čištění se provádí za účelem zajištění přijatelné hodnoty účinnosti smyček. Na jedno čištění jednoho metru čtverečního je zapotřebí 0,7 litru vody. Spotřeba na jeden metr čtvereční za rok při četnosti 63 čištění pak vychází 44,1 L, což při celkové vypočtené ploše smyček představuje přibližně 4 600 kubických metrů. [37]

<b>Vypočtené hodnoty</b>	
Plocha smyčky	5248 m <sup>2</sup>
Počet smyček	20
Minimální rychlost teplotné tekutiny	0,26856 m/s
Maximální rychlost teplotné tekutiny	3,74479 m/s
Celková odrazná plocha	104 960 m <sup>2</sup>
Plocha solárního pole	263 046 m <sup>2</sup>
Optická účinnost smyčky	0,72132
Celková účinnost smyčky	0,69118
Tepelný výkon	62,4157 MWt

Tabulka č. 3 – vypočtené hodnoty pro solární pole



Graf č. 5 – znázornění tepelného výkonu produkovaného solárním polem za rok

### 6.3 Kolektor

<b>Základní parametry</b>	
Typ kolektoru	SkyFuel SkyTrough
Šířka	6 m
Délka potrubí mezi sestavami	1 m
Délka smyčky	115 m
Průměrná vzdálenost povrchu a ohniska	2,15 m
Odrážná plocha	656 m <sup>2</sup>
<b>Optické parametry</b>	
Chyba sledování	0,988
Chyba geometrie	0,952
Odráživost zrcadla	0,93
Nečistoty na zrcadle	0,97
Obecná optická chyba	1

Tabulka č. 4 – zadané hodnoty pro kolektor

Pro návrh byl využit kolektor typu SkyFuel SkyTrough. Jedná se o jeden z největších možných typů kolektoru, o čemž vypovídá i jeho šířka dosahující 6 metrů.

Chyba sledování nabývá hodnoty 0,988 a zahrnuje například chyby algoritmu sledování. Další chybou je chyba geometrie o velikosti 0,952. Tato chyba popisuje například odchylku tvaru zrcadla od ideální paraboly. Ostatní chyby, jež nemají příčinu v chybném sledování či geometrii, lze zahrnout do chyb obecných. [37]

Odrazivost zrcadla nabývá hodnoty 0,93. Z této hodnoty vyplývá, že pouhých sedm procent dopadajících paprsků se neodrazí. Za takto vysokou hodnotu odrazivosti jsou zodpovědné především povrchové úpravy v podobě stříbření a leštění. [37]

Vypočtené hodnoty	
Délka jedné sestavy	14,375 m
Optická účinnost	0,84849

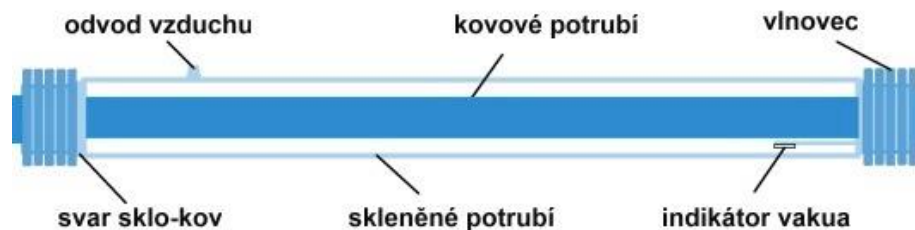
Tabulka č. 5 – vypočtené hodnoty pro kolektor

## 6.4 Absorbér

Základní parametry			
Typ absorbéru	Schott PTR80		
Typ absorpčního materiálu	304L		
Vnitřní průměr trubky	0,076 m		
Vnější průměr trubky	0,08 m		
Vnitřní průměr skla	0,115 m		
Vnější průměr skla	0,12 m		
Varianty			
Váhový zlomek	0,985	0,01	0,005
Pohltivost absorbéru	0,963	0,963	0,8
Vyzařování absorbéru	f(T)	0,65	0,65
Pohltivost skla	0,02	0,02	0
Vyzařování skla	0,86	0,86	1
Propustnost skla	0,964	0,964	1
Rozbité sklo	Ne	Ne	Ano
Plyn v prstenci	Vodík	Vodík	Vzduch
Tlak v prstenci	0,0001 torr	750 torr	750 torr
Odhadovaná tepelná ztráta	190 W/m	1270 W/m	1500 W/m
Stínění vlnovce	0,935	0,935	0,935
Nečistoty na přijímači	0,98	0,98	1

Tabulka č. 6 – zadané hodnoty pro absorbér

Pro návrh byl využit absorber typu Schott PTR80. Jedná se absorber složený ze dvou soustředných potrubí. Vnější potrubí je vyrobeno ze skla a vnitřní potrubí je oproti tomu vyrobeno z nerezové oceli typu 304L. [15]



Obrázek č. 17 – absorber typu Schott PTR80 [38]

Pohltivost vyjadřuje poměr pohlceného a dopadajícího záření. Oproti tomu propustnost vyjadřuje poměr prošlého a dopadajícího záření. V případě skla je pohltivost téměř nulová, ale propustnost dosahuje vysoké hodnoty 0,964. To způsobí bezproblémový průchod slunečního záření skleněnou vrstvou. V případě absorpčního materiálu kovového potrubí je to přesně naopak. Pohltivost dosahuje vysokých hodnot 0,963 a propustnost je téměř nulová. To má za následek zvýšení teploty a tak ohřátí protékající teplotonosné tekutiny. Následné vyzařování je v případě skla popsáno přímo hodnotou 0,86, ale v případě absorberu je vyzařování popsáno jako funkce teploty. Pro každou teplotu tak vyzařování nabývá jiných hodnot. [37]

Mezi další parametry patří například informace o tom, zda došlo k poškození skleněného potrubí a vystavení tak kovové trubky absorberu okolnímu vzduchu. [37]

Vypočtené hodnoty	
Tepelné ztráty	207,35 W/m
Optické ztráty	0,85012

Tabulka č. 7 – vypočtené hodnoty pro absorber

## 6.5 Tepelné uložení

Základní parametry	
Výdrž při plném zatížení	6 hod.
Typ akumulčního média	Hitec Solar Salt
Minimální provozní teplota média	238°C
Maximální provozní teplota média	593°C
Počet horkých/studených nádrží	1
Výška nádrže	20 m
Minimální výška akumulčního média	1 m
Minimální přípustná hodnota studené nádrže	250°C
Minimální přípustná hodnota horké nádrže	365°C
Počáteční teplota akumulčního média	300°C
Kapacita ohříváče	25 MWe

Účinnost ohřívače	0,98
Ztrátový koeficient	0,4 W/m <sup>2</sup> -K

Tabulka č. 8 – zadané hodnoty pro tepelné uložení

Pro návrh byla zvolena šestihodinová výdrž. Ta udává dobu, kdy systém dodává tepelnou energii výkonovému bloku. [37]

Tepelné uložení se bude skládat z horké a studené nádrže, jejichž výška dosahuje 20 metrů.

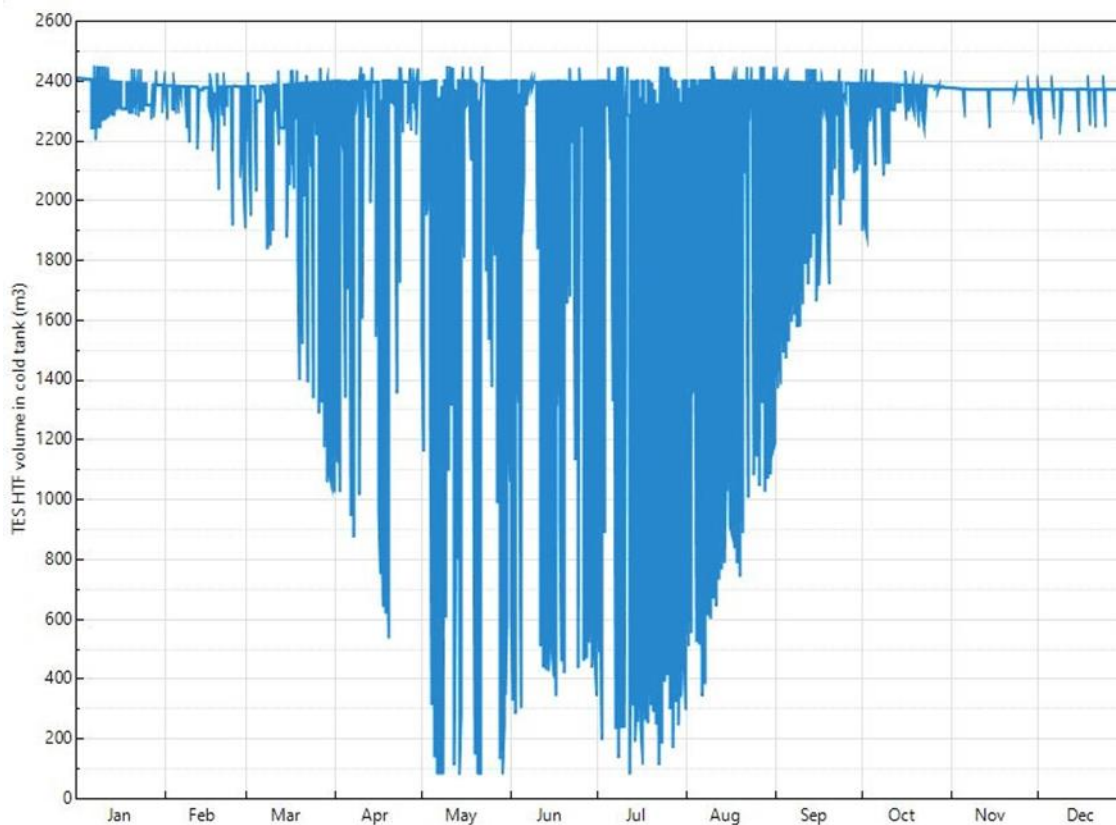
Akumulačním médiem byla zvolena sůl typu Hitec Solar Salt. Jedná se o roztavenou sůl, jejíž provozní teploty jsou dány výrobcem obdobně, jako tomu bylo u teplotně tekutiny. Minimální přípustná teplota studené nádrže je 250°C a horké nádrže 365°C. Aby však nenastal pokles pod uvedené přípustné hodnoty, je případně využíváno ohřívače. [37]

<b>Vypočtené hodnoty</b>	
Tepelná kapacita nádrží	187,25 MWht
Objem akumulčního média	2532,72 m <sup>3</sup>
Průměr nádrže	12,698 m
Minimální objem akumulčního média	126,636 m <sup>3</sup>
Odhadovaná tepelná ztráta	0,119072 MWt
Teplotní rozdíl studené stěny výměníku	5°C
Teplota média	342°C
Hustota média	1872,49 kg/m <sup>3</sup>
Specifické teplo média	1,50182 kJ/kg - K
Tepelná účinnost	0,966

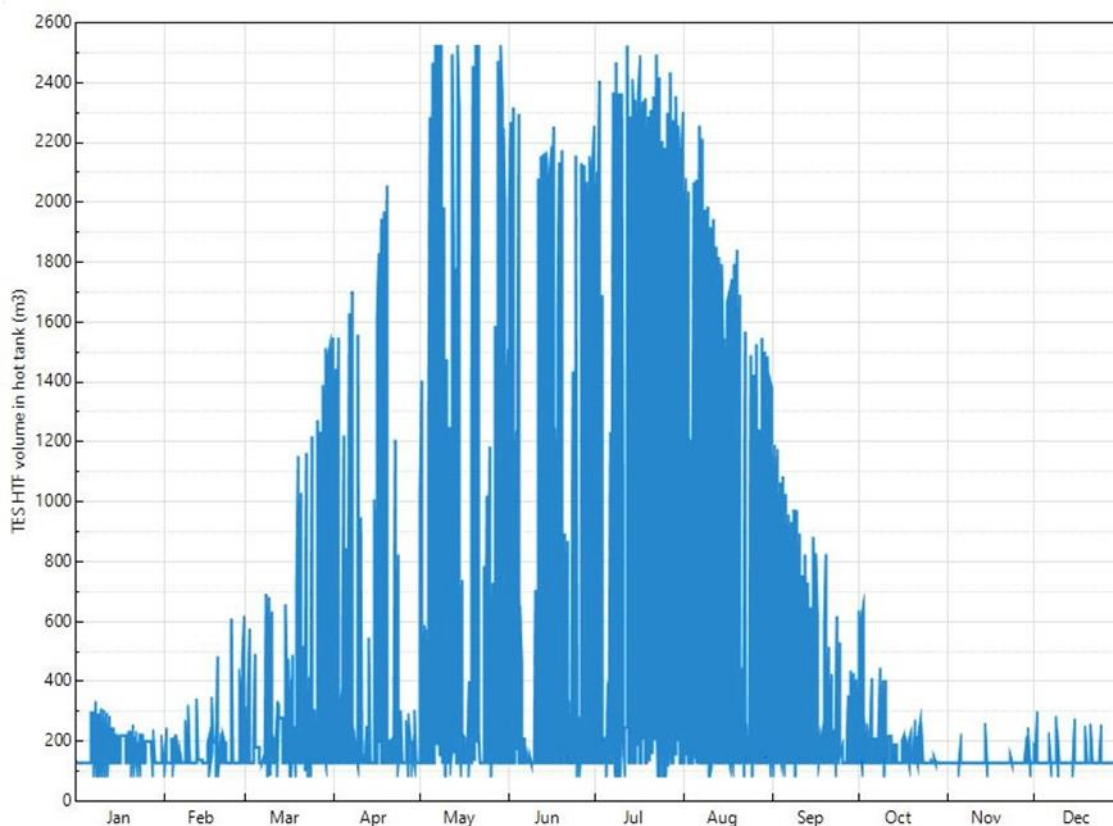
Tabulka č. 9 – vypočtené hodnoty pro tepelné uložení

Vypočtená tepelná kapacita nádrží nezahrnuje ztráty způsobené tepelným výměníkem, který je při nepřímém ukládání zapotřebí. Skutečná tepelná kapacita zahrnující tyto ztráty by tak při stejné hodnotě výdrže dosahovala vyšších hodnot. [37]





Graf č. 6 – znázornění objemu akumulčního média studené nádrže za rok



Graf č. 7 - znázornění objemu akumulčního média horké nádrže za rok



## 6.6 Tepelný oběh

<b>Základní parametry</b>	
Hrubý výkon	11,11 MWe
Konverzní faktor	0,9
Účinnost cyklu	0,356
Teplota na výstupu	391°C
Doba pohotovostního režimu	2 hod.
Doba spuštění	0,5 hod.
Minimální teplota spuštění	300°C
Maximální provozní zlomek	1,05
Minimální provozní zlomek	0,2
Záložní zdroj	Nevyužíván
Účinnost záložního kotle	0,9
<b>Parametry Rankin-Clausiova oběhu</b>	
Provozní tlak	100 bar
Typ kondenzátoru	Chlazený vzduchem
Teplota okolí	42°C
Teplotní rozdíl pára v kondenzátoru/okolí	16°C
Tlakový poměr kondenzátoru	1,0028
Minimální tlak kondenzátoru	0,0423 bar

Tabulka č. 10 – zadané hodnoty pro tepelný oběh

Doba pohotovostního režimu návrhu činí 2 hodiny. Jedná se o maximální počet hodin povolený pro pohotovostní režim, při němž je povolen studený start turbíny. Ta byla z důvodu předcházejícího nedostatku tepelného zdroje odstavena. Jeli však doba dosažení dostatečného tepelného zdroje delší než uvedená doba pohotovostního režimu, je třeba provést klasické spuštění trvající půl hodiny. [37]

Uvedená hodnota provozního zlomku udává podíl mezi aktuálním výkonem a výkonem uvedeným na štítku. Přesahuje-li tato hodnota uvedené maximum, dojde k záměrnému rozostření zlomku kolektorů za účelem omezení výkonu bloku na hodnotě maximálního zatížení. V případě, že hodnota provozního zlomku nedosahuje ani minimální hodnoty, není generována elektrická energie. [37]

<b>Vypočtené hodnoty</b>	
Čistý výkon	10 MWe
Vstupní teplota	391°C
Výstupní teplota	293°C

Tabulka č. 11 – vypočtené hodnoty pro tepelný oběh

## 7 Analýza možnosti vylepšení výkonu a účinnosti

Elektrárna navržená v předchozí kapitole se rozprostírá na celkové ploše 368 264 m<sup>2</sup> a produkuje 25 607 930 kWh elektrické energie za rok. Tato hodnota vypovídá o výkonu elektrárny. Jednoznačnou hodnotu vypovídající o účinnosti navržené elektrárny software SAM bohužel nevypočítává. Z toho důvodu budou zkoumány účinnosti jednotlivých celků, jelikož účinnost elektrárny je rovna násobku účinnosti jejích komponent. Z důvodu zajištění maximálních parametrů vypovídajících o výkonu a účinnosti bude provedena analýza s ohledem na volbu komponent a kontinuálnosti provozu.

### 7.1 S ohledem na volbu komponent

#### Změna typu teplotnosné tekutiny

	Parametr 1 [MWt]	Parametr 2 [bar]	Parametr 3 [MWt]
Therminol VP-1	10,3115	10,1238	1,7599
Therminol 59	10,2818	10,0861	1,8429
Dowtherm Q	10,3263	10,1508	1,6403
Hitec	8,6292	8,4722	1,6429

Tabulka č. 12 – hodnocené parametry zlomku teplotnosných tekutin

Při zkoumání účinnosti teplotnosné tekutiny byly hodnoceny tři parametry, a to tepelná energie absorbovaná solárním polem, tepelná energie vyprodukovaná solárním polem a tlaková ztráta teplotnosné tekutiny. Ze všech dostupných typů teplotnosné tekutiny dopadl nejlépe syntetický olej typu Dowtherm Q, jenž měl nejvyšší hodnoty prvních dvou hodnocených parametrů a nejnižší hodnotu třetího parametru. Oproti původnímu návrhu, jenž počítal s teplotnosnou tekutinou typu Therminol VP-1, došlo ke snížení minimální provozní teploty a ke zvýšení rychlosti tekutiny.

#### Změna typu kolektoru

	Parametr 1 [-]	Parametr 2 [MWt]
SkyFuel SkyTrough	0,2425	10,1238
Luz LS-3	0,2496	10,3409
Solargenix SGX-1	0,2563	10,2997
AlbiasaTrough AT150	0,2500	9,6954

Tabulka č. 13 - hodnocené parametry zlomku kolektorů

Při zkoumání účinnosti kolektoru byly hodnoceny dva parametry, a to optická účinnost kolektoru a tepelná energie vyprodukovaná solárním polem. Ze všech dostupných typů kolektorů dopadl z hlediska účinnosti nejlépe kolektor typu Solargenix SGX-1. Z hlediska druhého hodnoceného parametru byl však hned druhý, proto byl vybrán jako nejlepší varianta. Oproti původnímu návrhu, jenž počítal s kolektorem typu SkyFuel SkyTrough, došlo ke zvýšení celkové plochy elektrárny na 424 920 m<sup>2</sup>, a to z důvodu výběru kolektoru o menší šířce.

### Změna typu přijímače

	Parametr 1 [MWt]	Parametr 2 [MWt]	Parametr 3 [MWt]
Schott PTR80	10,3115	10,1238	2,2518
Schott PTR70 2008	10,7559	10,5003	2,0572
Solel UVAC 3	10,8900	10,6051	2,0254
Royal Tech RTUVR 70M4	10,7377	10,4180	1,9727

Tabulka č. 14 - hodnocené parametry zlomku přijímačů

Při zkoumání účinnosti přijímače byly hodnoceny tři parametry v podobě absorbované tepelné energie solárním polem, tepelné energie vyprodukované solárním polem a také tepelné ztráty přijímače. Ze všech dostupných přijímačů dopadl nejlépe přijímač typu Solel UVAC 3, jenž měl bezkonkurenčně nejvyšší hodnoty prvních dvou parametrů. Z hlediska třetího hodnoceného parametru se taktéž pohyboval mezi nejnižšími uváděnými hodnotami. Oproti původnímu návrhu, jenž počítal s přijímačem typu Schott PTR80, došlo ke snížení průměru vnitřní kovové trubky, avšak průměr vnější skleněné trubky nepatrně vzrostl. To je také důvod snížení tepelných ztrát oproti původnímu návrhu.

### Změna typu akumulčního média

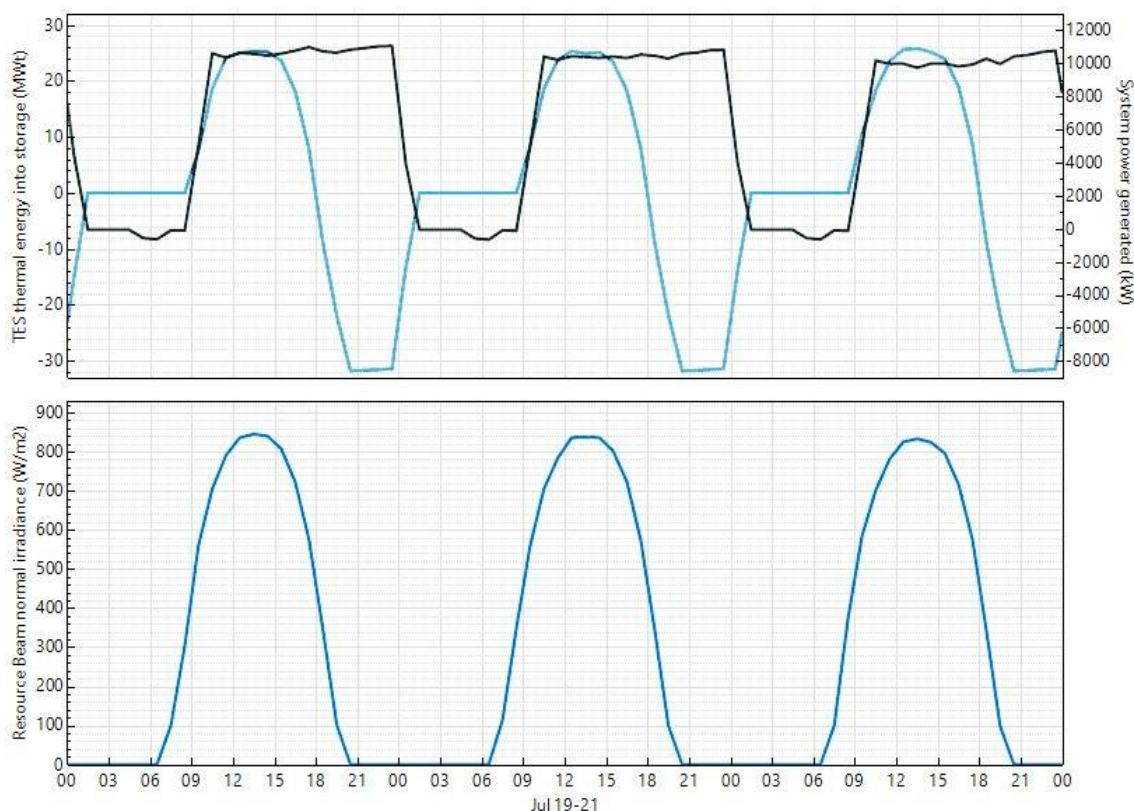
	Parametr 1 [MWt]	Parametr 2 [MWt]
Hitec Solar Salt	0,2256	0,1319
Hitex XL	0,2261	0,1290
Therminol VP-1	0,2781	0,1571
Hitec	0,2238	0,1300

Tabulka č. 15 - hodnocené parametry zlomku akumulčních médií

Při zkoumání účinnosti akumulčního média byly hodnoceny dva parametry, a to tepelná ztráta nádrže a tepelná energie uložště. Ze všech dostupných akumulčních médií dopadla nejlépe sůl typu Hitec, jež měla nejnižší hodnotu prvního hodnoceného parametru. Z hlediska druhého parametru byla z nabízených solí druhá. Oproti původnímu návrhu, jenž počítal s akumulčním médiem typu Hitec Solar Salt, došlo ke snížení průměru nádrže z důvodu nižší hustoty média. To je také důvod snížení tepelných ztrát oproti původnímu návrhu.

Z hlediska analýzy s ohledem na volbu komponent za účelem maximalizace účinnosti elektrárny byl vytvořen nový návrh elektrárny, jenž se skládá z teplotnosné tekutiny typu Dowtherm Q, kolektoru typu Solargenix SGX-1, přijímače typu Solel UVAC 3 a akumulčního média v podobě soli typu Hitec. Produkce elektřiny tohoto návrhu činí za rok 26 617 888 kWh, což je oproti původnímu návrhu přibližně o 1GWh hodinu více.

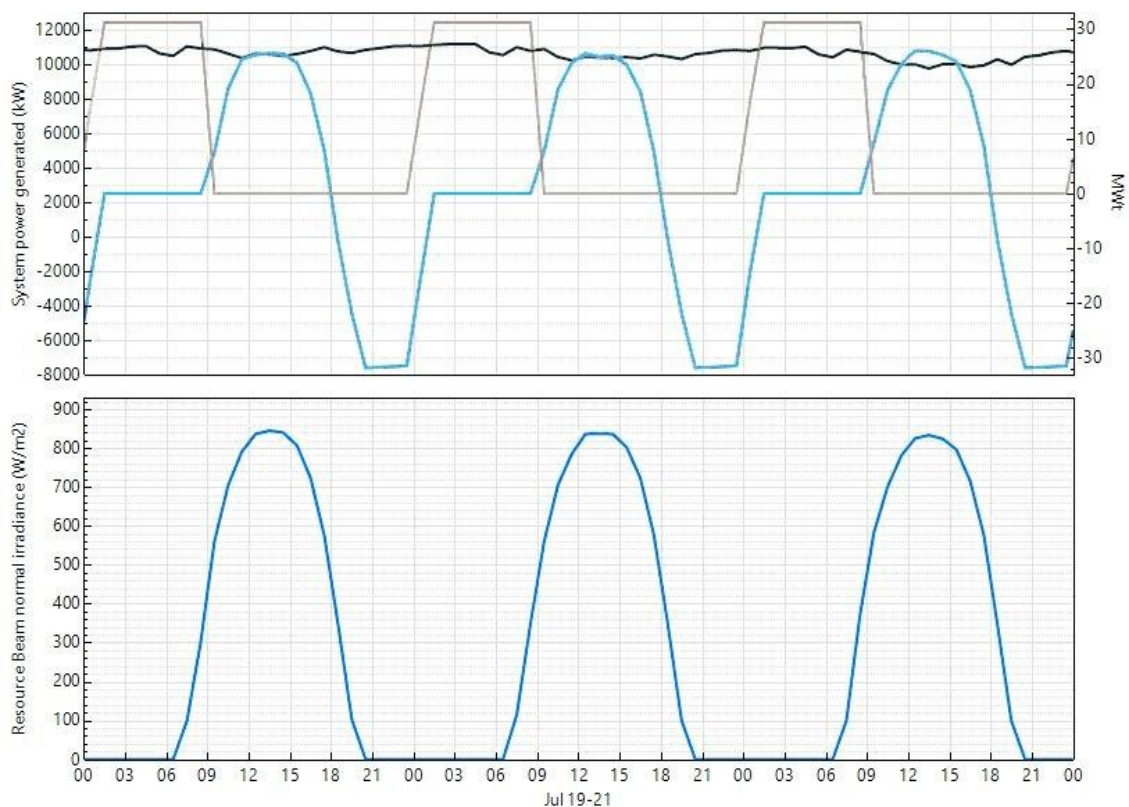
## 7.2 S ohledem na kontinuálnost provozu



Graf č. 8 – zobrazení výroby elektřiny nového návrhu

V grafu zobrazujícím výrobu elektřiny nového návrhu představuje tmavě modrá křivka dopad přímého slunečního záření, světle modrá křivka energii z tepelného uložení a černá křivka průběh výkonu elektrárny. Právě z poslední zmiňované černé křivky je patrné, že nový návrh elektrárny by produkoval elektrickou energii pouze od 9 hodin ráno do půlnoci. Energie ze solárního pole slouží k výrobě elektrické energie a nabití tepelného uložení přibližně do 18 hodin. Po dalších šest hodin je pak elektrická energie produkována právě pomocí nabitého tepelného uložení. Po půlnoci však již elektrárna nedisponuje žádným druhem energie, jež by mohla přeměnit na energii elektrickou. Z toho důvodu nastává blackout. Toto ale platí pouze pro letní období. V zimě je doba blackoutu mnohem delší, a to z důvodu nedostatku slunečního záření, jež ani nedocílí nabití tepelného uložení.

K zajištění kontinuálnosti výroby elektřiny se nabízejí hned dvě možnosti. První z nich je zvýšení výdrže tepelného uložení. Tato možnost však není v návrhových podmínkách realizovatelná, a to z důvodu nedostatku slunečního záření, jež by umožnilo větší tepelné uložení plně nabit. Proto přichází na řadu druhá varianta. Ta umožňuje kontinuálnost výroby pomocí přidružení záložního zdroje energie získávané prostřednictvím spalování fosilních paliv.

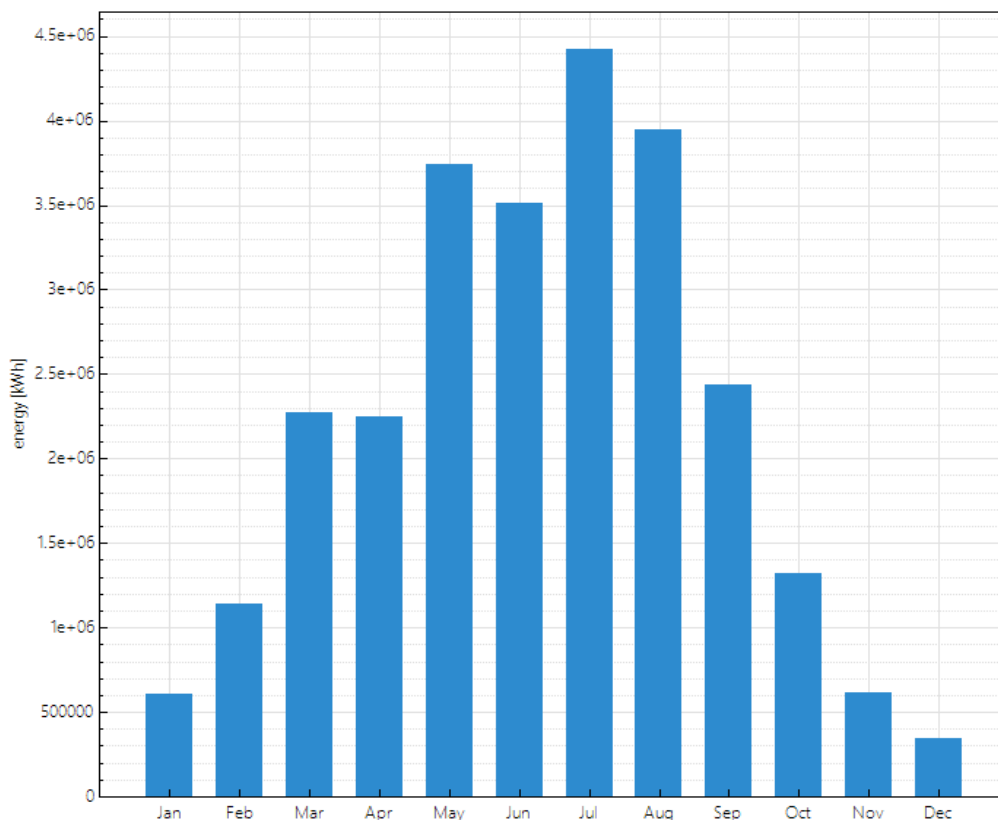


Graf č. 9 - zobrazení výroby elektřiny konečného návrhu

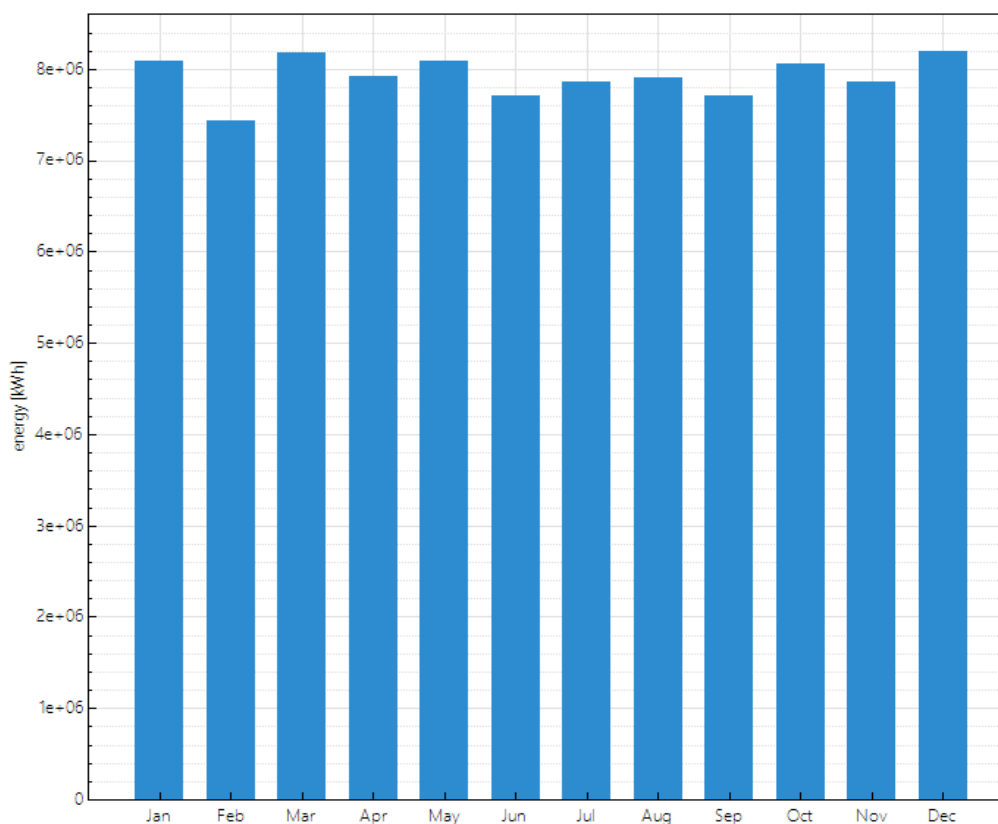
V grafu zobrazující výrobu elektřiny konečného návrhu představuje tmavě modrá křivka dopad přímého slunečního záření, světle modrá křivka energii z tepelného uložení, šedá křivka energii ze spalování fosilních paliv a černá křivka průběh výkonu elektrárny. Pomocí spalování fosilních paliv je možno docílit odstranění původního blackoutu v časovém intervalu mezi půlnocí a 9 hodinou ráno a zajistit tak plynulou výrobu elektřiny po celých 24 hodin.

Tento záložní zdroj může být však využit i k eliminaci rozdílnosti dopadu slunečního záření napříč rokem. Kontinuita produkce elektřiny je tak zajištěna i po celý rok.

Přidružení spalování fosilních paliv zvýšilo celkové množství energie vyprodukované za rok na hodnotu 95 007 144 kWh. To představuje přibližně čtyřnásobek původní hodnoty. To však na úkor spotřeby 698 889 MMBTU, která odpovídá 19 750 603 m<sup>3</sup> zemního plynu za rok.



Graf č. 10 - zobrazení produkované energie nového návrhu za rok



Graf č. 11 - zobrazení produkované energie konečného návrhu za rok

## 8 Závěr

Práce byla věnována koncentraci solární energie s důrazem na akumulaci tepelné energie. První část práce zkoumala základní fyzikální zákony využívané v této oblasti a také shrnula současné technologie pro koncentraci solární energie a ukládání tepelné energie. Druhá část se zabývala samotným návrhem koncentrační solární tepelné elektrárny zahrnující jak heliotechnické zařízení tak i tepelné uložení. Následně byly zkoumány možnosti vylepšení výkonu a účinnosti samozřejmě s ohledem na kontinuálnost provozu.

V rámci první části bylo při zaobírání se fyzikálními zákony zjištěno, že ideálními lokalitami pro umístění koncentrované solární elektrárny jsou rovníkové oblasti s minimem oblačnosti. Z fyzikální podstaty o tom nemůže být sebemenší pochyb, ovšem reálný svět je mnohem komplexnější. Pouze zahrnutí ekonomického aspektu států rozprostírajících se na těchto lokalitách je důvodem, proč se koncentrační solární elektrárny ve většině těchto míst nevyskytují ve větším měřítku. Dále z hlediska akumulace energie se práce věnovala pouze akumulaci tepelné energie. Má to však velmi racionální odůvodnění. Při akumulaci stejného druhu energie, jaká je vyráběna solárním polem a dále využívána výkonovým blokem, nedochází ke ztrátám při její případné přeměně. Jedná se tak o nejefektivnější způsob akumulace energie, jaký může být koncentrační solární tepelnou elektrárnou využíván.

V druhé části byl proveden návrh tohoto typu elektrárny. Pro heliotechnické zařízení bylo využito technologie parabolického žlabu se syntetickým olejem coby teplonosnou tekutinou a pro tepelné uložení technologie akumulace citelného tepla využívající horkou a studenou nádrž s roztavenými solemi. Takto navržená elektrárna o výkonu 10 MW byla umístěna do oblasti jižního Španělska v okolí města Sevilla, kde dopadající množství přímého slunečního záření činí za rok 1 774 kWh. Většina odborných publikací však uvádí za minimální až hodnotu 2 000 kWh kvůli ekonomické návratnosti. Z toho důvodu by stálo za zvážení pro uvedenou lokalitu využití spíše fotovoltaického systému s možností akumulace energie například v podobě bateriového uložení, který by mohl představovat udržitelnější výsledky i z toho důvodu, že vývoj bateriových systémů v poslední době výrazně pokročil a stává se ekonomicky dosažitelný. Jiným řešením by pak byla možnost přesunutí lokality návrhu blíže k rovníku, abychom její provoz nemuseli podporovat spalováním fosilních paliv, jemuž se chceme vlastně od začátku vyhnout.

Pravděpodobnost nahrazení jen zlomku elektráren spalujících fosilní paliva elektrárnami koncentračními není zcela nereálná. Větší procento nahrazení v současné době však nelze očekávat, a to především z důvodu možností ideálních lokalit. Naděje ale vězí ve vývoji technologií tepelného uložení. Záporom těchto elektráren je však i poměr samotné rozlohy k výkonu. Při stejném výkonu dalších alternativ v zastání elektráren spalujících fosilní paliva je rozloha těchto koncentračních solárních tepelných elektráren nesrovnatelná a způsobuje tak zabránění velkého množství často jinak využitelné půdy.

## Seznam odborné literatury

1. **J. Reichl.** První Keplerův zákon. [Online] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/74-prvni-kepleruv-zakon>.
2. **M. Vrtek.** Sluneční energie. [Online] 2012. [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/21\\_-Krajina-a-ZP\\_54-55/54\\_IUT/140\\_Slunecni-energie---Vrtek---P3.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/21_-Krajina-a-ZP_54-55/54_IUT/140_Slunecni-energie---Vrtek---P3.pdf).
3. **J. Reichl.** Druhý Keplerův zákon. [Online] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/75-druhy-kepleruv-zakon>.
4. —. Třetí Keplerův zákon. [Online] <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/77-treti-kepleruv-zakon>.
5. **K. Lovegrove a J. Pye.** Fundamental principles of concentrating solar power systems. *Concentrating solar power technology*. 2012.
6. Radiation. [Online] <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/empiricalevidence.php>.
7. Odraz a lom světla. [Online] <http://polar-peza.euweb.cz/svetlo.html>.
8. **M. Holeček.** Výklad termodynamiky na fakultě strojní. Plzeň : autor neznámý.
9. **M. Králová.** Záření černého tělesa. [Online] <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/kvanta/zareni-cerneho-telesa>.
10. **J. Kleczek.** *Sluneční energie - úvod do helioenergetiky*. 1981.
11. **Brož, Karel a Šourek, Bořivoj.** Sluneční energie. *Alternativní zdroje energie*. 2003.
12. **Kučera, Jiří.** [Online] 2018. [http://home.zcu.cz/~kuceraj/ATC/ATC\\_Prezentace/old\\_2018/](http://home.zcu.cz/~kuceraj/ATC/ATC_Prezentace/old_2018/).
13. **Lovegrove, Keith a Wes Stein.** Introduction to concentrating solar power technology. *Concentrating solar power technology*. 2012.
14. **Odeillo a spol.** Solární kolektory. [Online] ČEZ. <https://www.cez.cz/ede/content/microsites/solarni/k23.htm>.
15. **Moya, Eduardo Zarza.** Parabolic-trough concentrating solar power systems. *Concentrating solar power technology*. 2012.
16. **NREL.** Concentrating Solar Power Projects. [Online] <https://solarpaces.nrel.gov/>.
17. **W. Schiel a T. Keck.** Parabolic dish concentrating solar power systems. *Concentrating solar power technology*. 2012.
18. **L.L.Vant-Hull.** Central tower concentrating solar power systems. *Concentrating solar power technology*. 2012.
19. **J. B. Blackmon.** Heliostat size optimization for central receiver solar power plants. *Concentrating solar power technology*. 2012.
20. **K. Gouthamraj, K. Rani a G. Satyanarayana.** Design and analysis of rooftop linear Fresnel reflector solar concentrator. [Online] 2013. <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-Analysis-of-Rooftop-Linear-Fresnel-Solar-Gouthamraj-Rani/6771c01a265a0b2e975e29edfd0371057a308cf3>.



21. **D.R.Mills.** Linear Fresnel reflector technology. *Concentration solar power technology*. 2012.
22. **D. R. Mills a G. L. Morrison.** Compact linear Fresnel reflector solar thermal. *Solar energy*. 2010.
23. **W.D.Steinmann.** Thermal energy storage systems for concentrating solar power plants. *Concentrating solar power technology*. 2012.
24. **U. Pelay, a další, a další.** Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017.
25. **CHIYODA** . Concentrated Solar Power (CSP). [Online] 2017. <https://www.chiyodacorp.com/en/service/solar-energy/>.
26. **S. Kuravi, a další, a další.** Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power. 2013.
27. **K. Nithyanandam, J. Stekli a R. Pitchumani.** High-temperature latent heat storage for concentrating solar thermal systems. *Advances in concentrating solar thermal research and technology*. 2017.
28. **L. Irwin, a další, a další.** Thermochemical energy storage for concentrating solar thermal systems. *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*. 2017.
29. Parní oběhy. [Online] <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-04.pdf>.
30. **Š. Staněk.** Porovnání stupně axiální parní turbíny pro různá proudící média. [Online] [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=148241](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148241).
31. **L. Richter.** ORC test rig with a screw expander; design and expectations. [Online] 2018. <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5081652?class=pdf>.
32. **S.M. Besarati a D.Y. Goswami.** Supercritical CO<sub>2</sub> and other advanced power cycles for concentrating solar thermal systems. *Advances in concentrating solar thermal research and technology*. 2017.
33. **Kumar, Ritu Raj.** Brayton Cycle. [Online] 2017. <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-Diesel-and-Brayton-cycle>.
34. Elektrárne. [Online] [http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/elektroenergetika1/ELEN2007/EENERGETIKA/ELEN-3\\_2.htm](http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/elektroenergetika1/ELEN2007/EENERGETIKA/ELEN-3_2.htm).
35. **Sarkar, Swapan Chandra.** Stirling refrigeration cycle. [Online] 2017. [https://www.researchgate.net/figure/Stirling-Refrigeration-Cycle-a-P-V-diagram-b-T-S-diagram\\_fig1\\_321529125](https://www.researchgate.net/figure/Stirling-Refrigeration-Cycle-a-P-V-diagram-b-T-S-diagram_fig1_321529125).
36. **Škorpík, J.** Stirlingův motor. [Online] 2013. <http://www.transformacni-technologie.cz/33.html>.
37. **National Renewable Energy Laboratory.** System Advisor Model (SAM). [Online] 2018. <https://sam.nrel.gov/>.
38. **G. Espinosa-Rueda, a další, a další.** Vacuum evaluation of parabolic trough receiver tubes in a 50 MW concentrated solar power plant. [Online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16304236>.