

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav energetiky**



**Základní porovnání flash a binární  
geotermální elektrárny**

**Bakalářská práce (2153985)**

Vypracoval: **Sobotka Lukáš**

Lukas.Sobotka@fs.cvut.cz

bakalářské prezenční studium

imatrikulační ročník 2011

skupina 2

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Kolovratník Michal, CSc.**

**Zadání bakalářské práce**

Vysoká škola: **ČVUT v Praze** Fakulta: **strojní**  
Ústav: **Ú12115 Ústav energetiky** Ak. rok: **2014/2015**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Jméno studenta(ky): **Lukáš SOBOTKA**  
Program: **Strojírenství**  
Obor: **Energetika a procesní technika**  
Název (česky): **Základní porovnání flash a binární  
geotermální elektrárny**  
Název (anglicky): **Basic comparison of flash vs. binary  
geothermal power plant**

**Zásady pro vypracování:**

Cílem práce je na základě rešerše problematiky geotermálních (GT) elektráren typu flash steam (F) a binary cycle (B) a s využitím bilančních výpočtů provést základní porovnání těchto GT technologií.

**Práce bude obsahovat:**

1. Rešerši stávajících řešení F, B a F-B GT elektráren se zaměřením na koncepci technologie, výhody a nevýhody takového využití GT energie pro energetické účely.
2. Přehled ve světě provozovaných F, B a F-B GT elektráren s uvedením dostupných parametrů primárního GT zdroje (především průtoků, tlaků, teplot,...). Vymezení rozsahů teplot primárního GT zdroje, pro které jsou F a B technologie nasazovány.
3. Návrh tepelného schématu F, B a F-B GT elektrárny a základní bilanční výpočty s dílčí optimalizací výkonu pro zvolený rozsah parametrů GT zdroje.
4. Základní analýzu problematiky nekondenzovatelných plynů.
5. Porovnání řešených variant GT elektráren.

Rozsah grafických prací: ---  
Rozsah průvodní zprávy: do 50 stran mimo obrázků, tabulek a příloh  
Seznam odborné literatury: DiPippo, R. Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.


Konzultant: Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 30. dubna 2015

Termín odevzdání bakalářské práce : 19. června 2015

  
-----  
doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.  
vedoucí Ú 12115



  
-----  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
děkan fakulty

V Praze ..... dne 30. dubna 2015 .....

### **Bibliografická citace práce**

SOBOTKA, Lukáš. *Základní porovnání flash a binární geotermální elektrárny*.

Praha, 2015, 82 s.

Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav energetiky.

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literatura, softwary) uvedené v závěru této bakalářské práce.

V Praze 20. 5. 2015

.....  
Příjmení a jméno studenta

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Kolovratníkovi Michalovi, CSc. za vstřícný přístup, účinnou metodiku, pedagogickou a odbornou pomoc i cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Zároveň bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni Musilové Veronice za finanční a materiálovou pomoc a psychickou podporu při řešení této bakalářské práce.

**Abstrakt**

V této bakalářské práci je řešena problematika geotermálních systémů používaných pro výrobu elektřiny.

V práci je řešen systém Flash steam a jeho modifikace systém Single Flash steam a systém Double Flash steam, dále systém Binary cycle a složený systém ze systému Single Flash steam a systému Binary cycle, který se označuje jako systém Combined Single Flash steam and Binary cycle.

V závěru práce je řešena problematika nekondenzovatelných plynů v systémech Flash steam.

**Klíčová slova:** Geotermální energie, Geotermální elektrárna, Flash steam, Binary cycle, Nekondenzovatelné plyny.

**Abstract**

In this bachelor thesis the issues of the geothermal systems are used for electricity production, and how they are deployed depending on the temperature of hot water from the well.

In the work is solved on the system Flash steam and its modifications. The systems of both the Single Flash steam and the Double Flash steam are explored. I will also focus on the system Binary cycle. Together the system Single Flash steam and the system Binary cycle these are known as the Combined Single Flash steam and Binary cycle. In conclusion, the issues of non-condensable gases in the systems Flash steam are settled.

**Key words:** Geothermal energy, Geothermal power plant, Flash steam, Binary cycle, Non-condensable gases.

**Obsah**

<b>Zadání bakalářské práce.....</b>	<b>2</b>
<b>Bibliografická citace práce.....</b>	<b>4</b>
<b>Čestné prohlášení.....</b>	<b>4</b>
<b>Poděkování .....</b>	<b>5</b>
<b>Abstrakt .....</b>	<b>6</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>7</b>
<b>Obsah .....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>13</b>
<b>Seznam zkratk .....</b>	<b>14</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>15</b>
<b>1. Využití geotermálních systémů pro výrobu elektřiny .....</b>	<b>17</b>
1.1 Geotermální energie ve světě pro výrobu elektřiny .....	17
1.2 Výhody a nevýhody geotermálních systémů při výrobě elektřiny.....	20
1.2.1 Výhody .....	20
1.2.2 Nevýhody .....	20
<b>2. Geotermální systémy pro výrobu elektřiny.....</b>	<b>21</b>
2.1 Princip suché páry – Dry steam .....	22
2.2 Princip mokré páry – Flash steam.....	22
2.3 Horkovodní princip – Binary cycle.....	22
<b>3. Princip mokré páry – Flash steam .....</b>	<b>23</b>
3.1 Single Flash steam.....	23
3.2 Double Flash steam .....	25
3.3 Triple Flash steam .....	27
3.4 Další možné modifikace systému Flash steam.....	27
3.5 Účinnost využití systému Flash steam .....	28
3.6 Ekologické aspekty systému Flash steam .....	28
3.7 Přehled geotermálních elektráren se systémem Flash steam .....	29
3.7.1 Taonga (Nga Awa Purua).....	29
3.7.2 Wayang Windu .....	30
3.7.3 Kawerau.....	31
3.7.4 Reykjanes .....	32
3.7.5 Miravalles .....	33
3.7.6 Olkaria I.....	34



3.7.7 Te Mihi .....	35
<b>4. Horkovodní princip – Binary cycle .....</b>	<b>36</b>
4.1 Binary cycle .....	36
4.2 Další možné modifikace systému Binary cycle .....	38
4.3 Účinnost využití systému Binary cycle.....	38
4.4 Ekologické aspekty systému Binary cycle .....	38
4.5 Přehled geotermálních elektráren se systémem Binary cycle .....	39
4.5.1 Casa Diablo .....	39
4.5.2 Raft River .....	39
4.5.3 Ribeira Grabde.....	40
4.5.4 Pico Vermelho B .....	40
4.5.5 Berlín .....	41
4.5.6 Los Azufres II.....	42
<b>5. Kombinace principu mokré páry a horkovodního principu – Combined Single Flash steam and Binary cycle .....</b>	<b>43</b>
5.1 Combined Single Flash steam and Binary cycle.....	43
5.2 Účinnost využití systému Combined Single Flash steam and Binary cycle .....	45
5.3 Ekologické aspekty systému Combined Single Flash steam and Binary cycle ....	45
5.4 Přehled geotermálních elektráren využívající systém Combined Single Flash steam and Binary cycle .....	45
5.4.1 Puna Venture .....	45
<b>6. Porovnání systémů SFS, DFS, TFS, BC a CSFS&amp;BC.....</b>	<b>46</b>
6.1 Rozdělení systémů podle teploty a měrné entalpie horké vody z vrtu.....	46
6.2 Porovnání výhod a nevýhod systémů.....	48
<b>7. Zadání, zjednodušení, účinností a vstupní parametry pro výpočet .....</b>	<b>49</b>
7.1 Zadání.....	49
7.2 Zjednodušení .....	49
7.3 Účinnosti .....	49
7.3.1 Mechanická účinnost – $\eta_{\text{Mech}} [1] [\%]$ .....	50
7.3.2 Termodynamická účinnost turbíny – $\eta_{\text{T}} [1] [\%]$ .....	50
7.3.3 Termodynamická účinnost čerpadla – $\eta_{\text{č}} [1] [\%]$ .....	50
7.3.4 Účinnost generátoru – $\eta_{\text{G}} [1] [\%]$ .....	50
7.3.5 Účinnost transformátoru – $\eta_{\text{Tr}} [1] [\%]$ .....	51
7.3.6 Účinnost potrubí z vrtu – $\eta_{\text{Pipe}} [1] [\%]$ .....	51
7.4 Vstupní hodnoty, konstanty a veličiny.....	51

<b>8. Postup výpočtu, použité rovnice a grafy .....</b>	<b>52</b>
8.1 Single Flash steam power plant.....	52
8.1.1 Přehled rovnic.....	52
8.1.2 Optimalizace tlaku $p_2$ .....	53
8.2 Double Flash steam power plant .....	55
8.2.1 Přehled rovnic.....	55
8.2.2 Optimalizace tlaků $p_2$ a $p_6$ .....	56
8.3 Binary cycle power plant – binární médium – voda .....	59
8.3.1 Přehled rovnic.....	59
8.3.2 Optimalizace tlaku $p_{aB}$ .....	60
8.4 Binary cycle power plant – binární médium – butan .....	62
8.4.1 Optimalizace tlaku $p_{aB}$ .....	62
8.5 Binary cycle power plant – binární médium – pentan .....	63
8.5.1 Optimalizace tlaku $p_{aB}$ .....	63
8.6 Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant – .....	64
binární médium – butan .....	64
8.6.1 Přehled rovnic.....	64
8.6.2 Optimalizace tlaku $p_2$ a $p_{aB}$ .....	66
8.7 Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant – .....	68
binární médium – pentan.....	68
8.7.1 Optimalizace tlaku $p_2$ a $p_{aB}$ .....	68
8.8 Grafické porovnání jednotlivých geotermálních systémů.....	70
<b>9. Problematika nekondenzovatelných plynů .....</b>	<b>71</b>
9.1 Parní ejektory – SJES.....	71
9.2 Vodokružné vývěvy – LRVP .....	71
9.3 Odstředivé kompresory – CS .....	72
9.4 Hybridní systémy – HS .....	72
9.5 Shrnutí způsobů (technologií) odstraňování NCGs .....	72
<b>10. Grafické porovnání.....</b>	<b>73</b>
10. 1 Vysvětlení ke grafům na Obr. 10.1, Obr. 10.2, Obr. 10.3 a Obr. 10.4.....	75
<b>Závěr .....</b>	<b>76</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>78</b>
<b>Použité softwary .....</b>	<b>82</b>

**Seznam obrázků**

*Obr. 1-1 – Vývoj instalovaného a plánovaného výkonu v geotermální energii pro výrobu elektřiny na světě [2]*

*Obr. 1-2 – Rozložení geotermálních systémů podle typu [2]*

*Obr. 1-3 – Výkon ve výstavbě a počet projektů ve světě [2]*

*Obr. 2-1 – Zjednodušená tepelná schémata systémů [3]*

*Obr. 2-2 –  $T-s$  diagramy systémů [3]*

*Obr. 3-1 – Schéma Single Flash steam power plant [3]*

*Obr. 3-2 –  $T-s$  diagram – systém Single Flash steam [3]*

*Obr. 3-3 – Schéma Double Flash steam power plant [3]*

*Obr. 3-4 –  $T-s$  diagram – systém Double Flash steam [3]*

*Obr. 4-1 – Schéma Binary cycle power plant [3]*

*Obr. 4.2 –  $p-h$  diagram a  $T-s$  diagram – systém Binary cycle [3]*

*Obr. 5-1 – Schéma Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant [3]*

*Obr. 5-2 –  $T-s$  diagram – systém Combined Single Flash steam and Binary cycle [3]*

*Obr. 6-1 – Rozložení geotermálních elektráren zapojených do výzkumu v závislosti na měrné entalpii vstupního média z vrtu [12]*

*Obr. 6-2 – Promítnutí jednotlivých geotermálních systémů do křivek, zapojených do výzkumu v závislosti na měrné entalpii vstupního média z vrtu [12]*

*Obr. 8-1 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 150 °C po 25 °C*

*Obr. 8-2 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 175 °C až 225 °C po 25 °C*

*Obr. 8-3 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 250 °C až 300 °C po 25 °C*

*Obr. 8-4 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_6$  a při optimálním tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 150 °C po 25 °C*

*Obr. 8-5 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_6$  a při optimálním tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 175 °C až 225 °C po 25 °C*

*Obr. 8-6 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_6$  a při optimálním tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 250 °C až 300 °C po 25 °C*

*Obr. 8-7 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 150 °C po 25 °C*

*Obr. 8-8 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 175 °C až 225 °C po 25 °C*

*Obr. 8-9 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 250 °C až 300 °C po 25 °C*

*Obr. 8-10 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 250 °C až 175 °C po 25 °C*

*Obr. 8-11 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 200 °C po 25 °C*

*Obr. 8-12 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 175 °C po 25 °C*

*Obr. 8-13 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 175 °C po 25 °C*

*Obr. 8-14 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 200 °C po 25 °C*

*Obr. 8-15 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 200 °C po 25 °C*

*Obr. 8-16 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému*

*Obr. 10-1 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému s 0 % NCGs*

*Obr. 10-2 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému s 1 % NCGs*

*Obr. 10-3 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému s 6 % NCGs*

*Obr. 10-4 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému s 17,5 % NCGs*

**Seznam tabulek**

*Tab. 3-1 – Základní parametry geotermální elektrárny Taonga (Nga Awa Purua) [4] [5]*

*Tab. 3-2 – Základní parametry geotermální elektrárny Wayang Windu [6]*

*Tab. 3-3 – Základní parametry geotermální elektrárny Kawerau [4] [7]*

*Tab. 3-4 – Základní parametry geotermální elektrárny Reykjanes [8]*

*Tab. 3-5 – Základní parametry geotermální elektrárny Miravalles – jednotka 3 [9]*

*Tab. 3-6 – Základní parametry geotermální elektrárny Olkaria I [10]*

*Tab. 3-7 – Základní parametry geotermální elektrárny Te Mihi [11]*

*Tab. 4-1 – Základní parametry geotermální elektrárny Casa Diablo [12]*

*Tab. 4-2 – Základní parametry geotermální elektrárny Raft River [13]*

*Tab. 4-3 – Základní parametry geotermální elektrárny Ribeira Grabde [14]*

*Tab. 4-4 – Základní parametry geotermální elektrárny Pico Vermelho B [14]*

*Tab. 4-5 – Základní parametry geotermální elektrárny Berlín [15]*

*Tab. 4-6 – Základní parametry geotermální elektrárny Los Azufres II [16]*

*Tab. 5-1 – Základní parametry geotermální elektrárny Puna Venture [17]*

*Tab. 9-1 – Způsoby (technologie) odstraňování NCGs podle koeficientů C a X [18]*

## **Seznam zkratk**

BC – Binary cycle

CSFS&BC – Combined Single Flash steam and Binary cycle

DFS – Double Flash steam

DS – Dry steam

FS – Flash steam

NCGs – Nekondenzovatelné plyny

SFS – Single Flash steam

TFS – Triple Flash steam

## Úvod

Žijeme v 21. století, kde používáme a vyvíjíme stále modernější a energeticky náročnější systémy, se kterými roste spotřeba elektřiny a tepla. Nevyplácí již tolik používat staré a osvědčené metody k výrobě elektřiny a tepla, proto stále hledáme nové systémy, které budou ekonomicky výhodnější. Proto se v poslední době začaly objevovat pojmy „zelená energie“ nebo „obnovitelné zdroje energie“. Mezi tyto obnovitelné zdroje můžeme zařadit zdroj využívající potenciál pod zemským povrchem. Potenciál je ukryt v geotermálních vodách, který se dá využít k ohřevu vody, vytápění nebo k výrobě elektřiny.

V úvodu práce se zabývám rozložením geotermálních elektráren ve světě, jejich současným i plánovaným stavem a výstavbou. Zaměřuji se i na výhody a nevýhody geotermální energetiky.

Dále popisuji jednotlivé systémy geotermálních elektráren, především jejich princip. Poté se detailně zabývám systémem Flash steam, u kterého popisuji především jeho princip, modifikace, výhody, nevýhody, možnosti, ekologické aspekty a realizaci.

Následně vypracuji přehled geotermálních elektráren ve světě využívající tento systém.

V přehledu uvádím základní parametry těchto elektráren, jako jsou například vstupní a výstupní teploty horké vody, pracovní tlaky horké vody, průtoky medií (horká voda a pára) a elektrický výkon.

To samé opakuji pro systém Binary cycle a složený systém Combined Single Flash steam and Binary cycle. Následně provádím porovnání jednotlivých systémů mezi sebou.

Na základě získaných informací a znalostí získaných podrobným studiem jednotlivých systémů provádím zjednodušené bilanční výpočty pro jednotlivé systémy při zvolených (společných) parametrech. Mezi zvolené parametry mohu zařadit konstantní průtok horké vody z vrtu, rozsah teplot horké vody z vrtu a kondenzační teplotu. Bilanční výpočty se týkají systému Flash steam v modifikacích Single Flash steam a Double Flash steam, dále systému Binary cycle a složeného systému Combined Single Flash steam and Binary cycle. U systému Binary cycle používám nejdříve na straně sekundárního média vodu a posléze organická média a u složeného systému Combined Single Flash steam and Binary cycle používám na straně sekundárního média pouze organická média. V závěru práce se zabývám problematikou nekondenzovatelných plynů v systémech Flash steam, které v druhé fázi do bilančních výpočtů zahrnu. Cílem práce je ověřit zjednodušeným bilančním výpočtem obecné informace,

kdy se který systém používá z hlediska teploty horké vody z vrtu.



## 1. Využití geotermálních systémů pro výrobu elektřiny

Jeden ze způsobů využívání geotermální energie je výroba elektřiny. Pro výrobu elektřiny se využívají tři různé metody. První metoda je založená na principu suché páry – Dry steam (DS). Druhá metoda využívá principu mokré páry – Flash steam (FS). Třetí metoda je založená na horkovodním principu – Binary cycle (BC). První metoda využívá, jako primární médium plyn (páru), druhá a třetí metoda využívá, jako primární médium kapalinu (horkou vodu). Tyto metody a technologie prodělaly za 100 let své existence značné pokroky a inovace. Vždy však záleží na požadavcích, které od daného systému očekáváme.

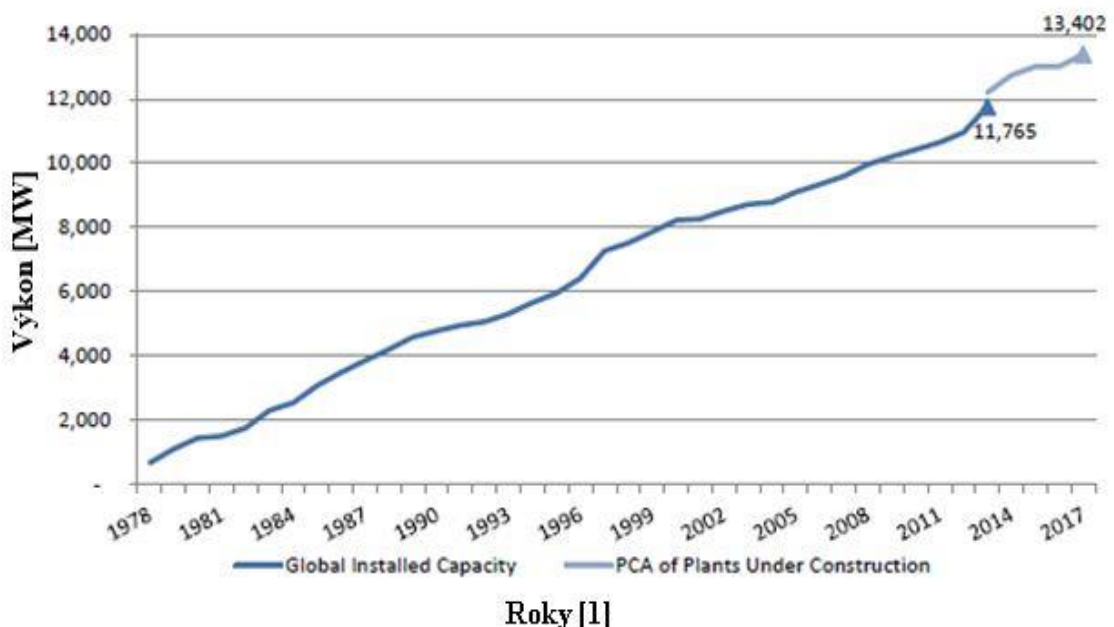
### 1.1 Geotermální energie ve světě pro výrobu elektřiny

V této kapitole jsou uvedena základní data o využívání geotermální energie pro výrobu elektřiny.

Data uvedená v grafech na Obr. 1-1, 1-2 a 1-3 jsou vztažena ke konci roku 2013.

Do konce roku 2013 bylo instalováno cca 12 GW. Celkem ve výstavbě bylo 1741 MW a 674 rozpracovaných projektů. Po dokončení všech projektů do konce roku 2017 by kapacita měla vzrůst k cca 14 GW. [1] [2]

**Obr. 1-1 – Vývoj instalovaného a plánovaného výkonu v geotermální energii pro výrobu elektřiny na světě [2]**



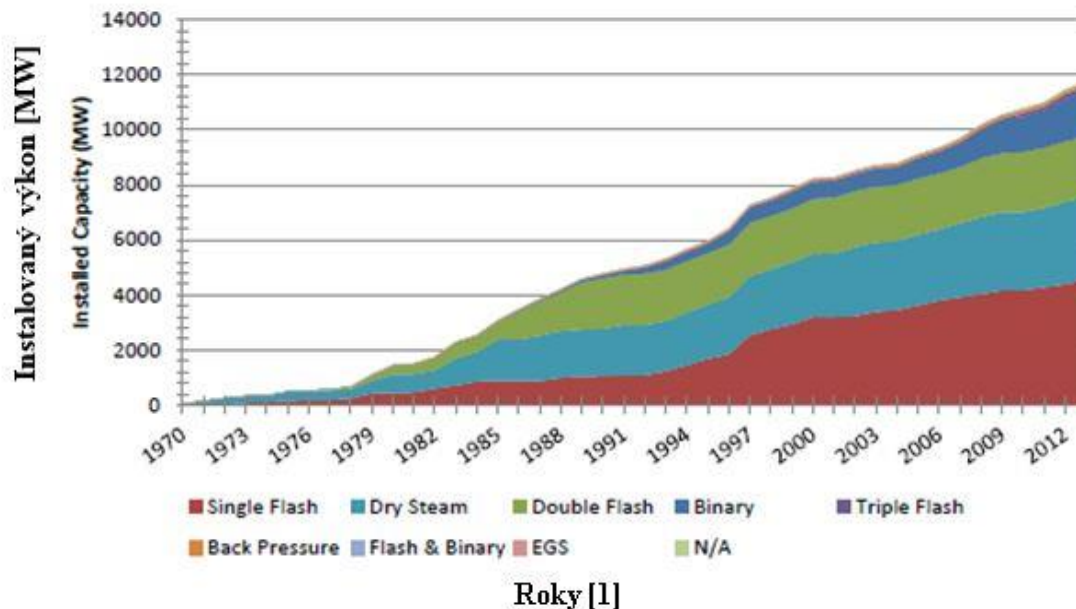
#### Legenda k Obr. 1-1

*Global Installed Capacity* – instalovaný výkon

*PCA of Plants Under Construction* – plánovaný výkon

Graf na Obr. 1-1 popisuje vývoj instalovaného výkonu do konce roku 2013 a průběh plánovaného výkonu do konce roku 2017 v závislosti na časové ose.

**Obr. 1-2 – Rozložení geotermálních systémů podle typu [2]**



### Legenda k Obr. 1-2

Typy geotermálních elektráren:

*Single Flash* – jednoduchý Flash systém

*Dry Steam* – princip suché páry

*Double Flash* – dvojitý Flash systém

*Binary* – horkovodní princip

*Triple Flash* – trojitý Flash systém

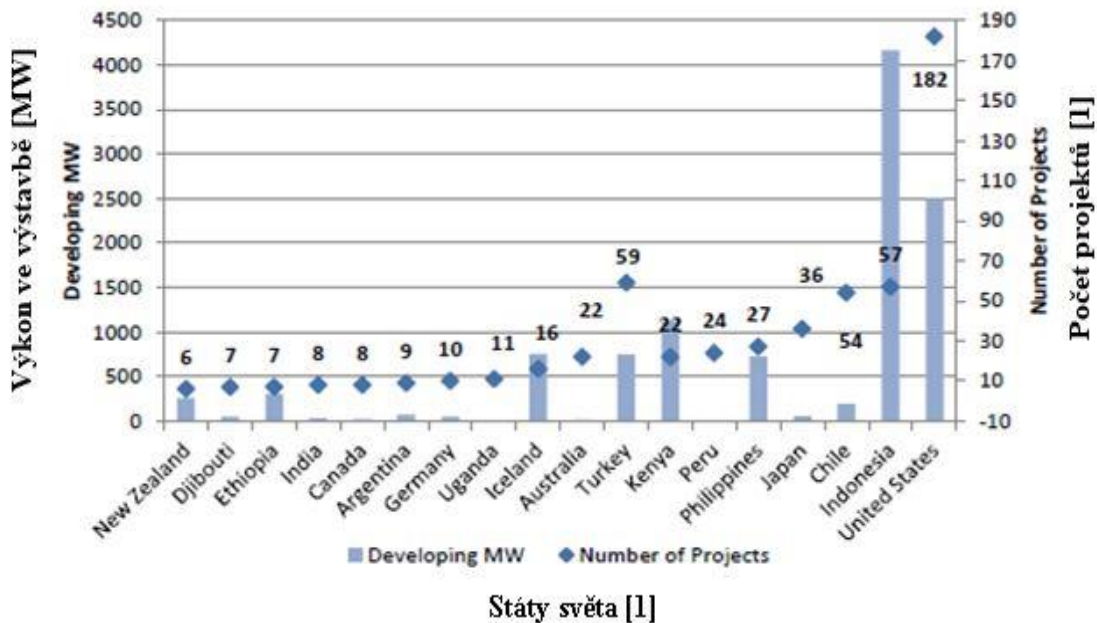
*Back Pressure* – systém s protitlakými turbínami

*Flash & Binary* – kombinovaný princip, horkovodní princip a princip mokré páry

*EGS* – pokročilé geotermální systémy

*N/A* – projekty s neuvedenými systémy

Graf na Obr. 1-2 popisuje vývoj podílu jednotlivých geotermálních systémů na výrobě elektřiny.

**Obr. 1-3 – Výkon ve výstavbě a počet projektů ve světě [2]****Legenda k Obr. 1-3***Developing MW – Výkon ve výstavbě**Number of Projects – Počet projektů*

Graf na Obr. 1-3 zobrazuje výkon ve výstavbě a počet projektů ve vybraných zemích světa do konce roku 2017. Z grafu vyplývá, že největší nárůst nově instalovaného výkonu můžeme očekávat v Indonésii, která chce přesáhnout hranici 4 GW a nejvíce rozpracovaných projektů v geotermální energii je v USA, která má rozpracováno 182 projektů. Data grafu na Obr. 1-3 jsou vztažena k září 2013.

## **1.2 Výhody a nevýhody geotermálních systémů při výrobě elektřiny**

V této podkapitole jsou vyjmenovány výhody a nevýhody geotermálních systémů při výrobě elektřiny.

### **1.2.1 Výhody**

Tyto systémy minimálně zatěžují životní prostředí. Nezanechávají po sobě téměř žádnou ekologickou stopu. Nezávislost na dodávkách paliva, vydrží v provozu při plném výkonu desítky let, téměř bezobslužný provoz a ve srovnání s jinými obnovitelnými zdroji i stálost výkonu. [1] [3]

### **1.2.2 Nevýhody**

Nejistota v geologických podmínkách, zda se skutečně podaří najít dostatečně velký zdroj geotermálních vod. Velkou ekonomickou zátěží je samotný geologický průzkum dané lokality, zda bude lokalita vyhovující anebo nevyhovující. Vysoké investice do potřebných průzkumů a vrtů. [1] [3]

## 2. Geotermální systémy pro výrobu elektřiny

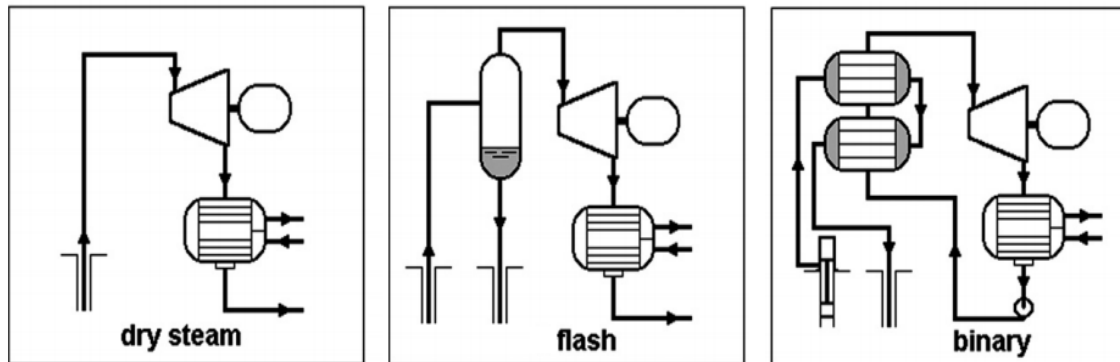
Momentálně se používají tři základní typy geotermálních systémů pro výrobu elektřiny.

Princip suché páry – Dry steam

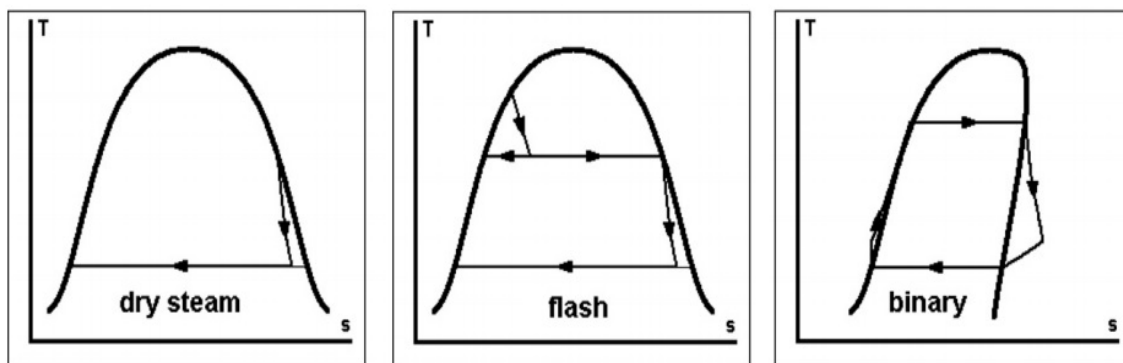
Princip mokré páry – Flash steam

Horkovodní princip – Binary cycle

**Obr. 2-1 – Zjednodušená tepelná schémata systémů [3]**



**Obr. 2-2 – T – s diagramy systémů [3]**



### 2.1 Princip suché páry – Dry steam

Používá se sytá pára v rozmezí teplot 180 °C až 300 °C. Pára se používá pro přímou expanzi v turbíně. Turbína následně pohání generátor. Jedná se o nejjednodušší a nejstarší princip, který se stále používá, protože jde o nejlevnější způsob výroby elektrické energie z geotermálních zdrojů. Účinnost využití, je definovaná jako podíl čisté mechanické práce a maximálního teoretického termodynamického výkonu nebo exergetického výkonu, tedy účinnost využití systému je 50 % až 65 %. Výhodou systému je jeho jednoduchost. Naopak nevýhodou je, že se dá použít jenom na určitých místech naší planety. Převážná část míst je již vyčerpána. [1] [3]

### 2.2 Princip mokré páry – Flash steam

Používá se horká voda z geotermálního rezervoáru, která má vysoký tlak. Při navrtání geotermálního rezervoáru začne horká voda samovolně proudit k zemskému povrchu v důsledku vyrovnávání tlakových rozdílů (zemský povrch a rezervoár). Část horké vody se v separátoru páry mění na páru, která expanduje v turbíně a turbína pohání generátor. Voda, která se nezměnila v páru, se vrací zpět do rezervoáru, aby se znovu použila. Většina stávajících geotermálních elektráren používá tento způsob, protože není těžké aplikovat tento systém. Účinnost využití, je definovaná jako podíl čisté mechanické práce a maximálního teoretického termodynamického výkonu nebo exergetického výkonu, tedy účinnost využití systému je 30 % až 50 %. Vždy záleží na typu použité modifikace – Single, Double, Triple Flash steam. [1] [3]

### 2.3 Horkovodní princip – Binary cycle

Voda, která se používá u binárního principu, je chladnější než, která se používá u principu mokré páry. U binárního principu se horká voda (primární médium) používá na ohřev kapaliny (sekundární médium nebo-li binární médium), která je převážně organického typu (uhlovodíky, ale dá se použít i voda). Kapalina se mění v páru při teplotě horké vody. Pára vstupuje do turbíny, kde expanduje a pohybuje generátorem. Účinnost využití, je definovaná jako podíl čisté mechanické práce a maximálního teoretického termodynamického výkonu nebo exergetického výkonu, tedy účinnost využití systému je 25 % až 45 %. Výhodou systému je dostupnost geotermálních rezervoárů, které jsou nezbytnou součástí systému. Další výhodou je úplná uzavřenost systému s ohledem na to, že se použitá voda vrací zpět do rezervoáru. [1] [3]

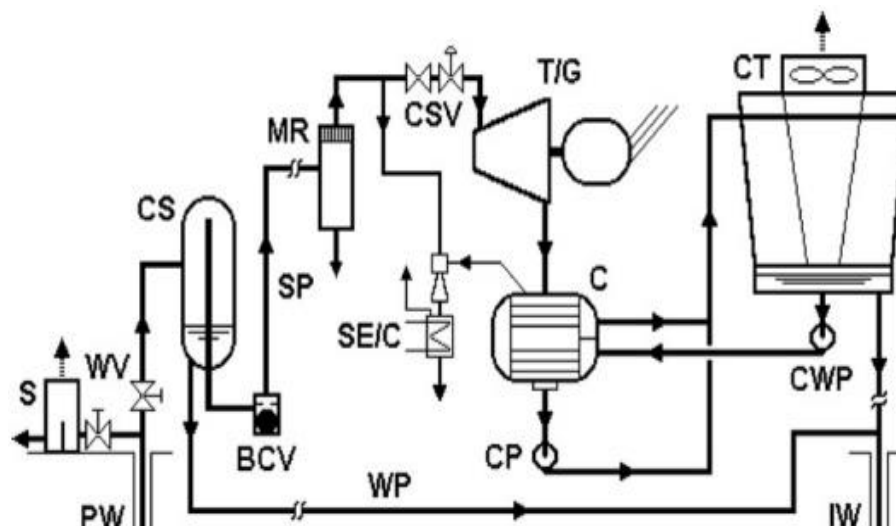
### 3. Princip mokré páry – Flash steam

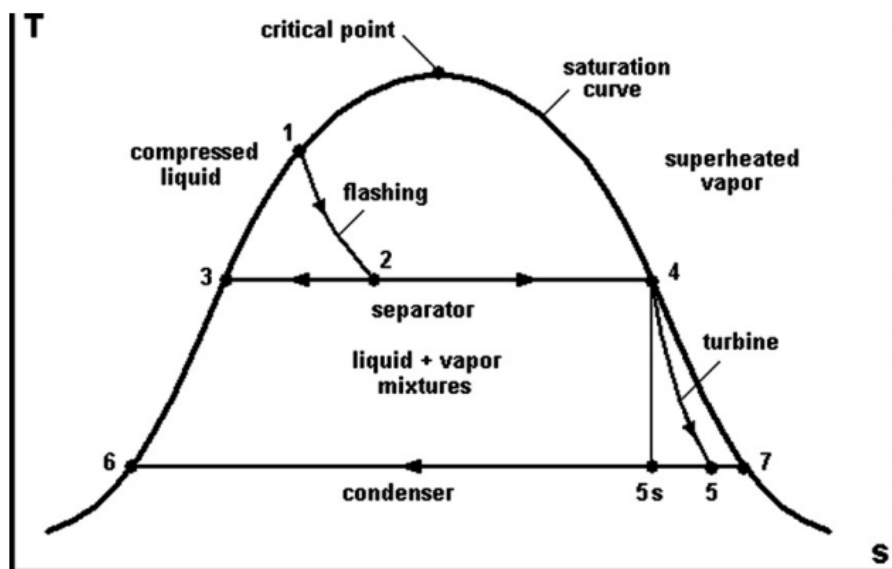
V této kapitole je detailní zaměření na geotermální systém založený na principu mokré páry – Flash steam a jeho modifikace. Základní popis systému je uveden v podkapitole 2.2.

#### 3.1 Single Flash steam

První modifikací systému FS je Single Flash steam (SFS). Jde o typ geotermální elektrárny, která funguje tak, že pod povrchem planety v zemské kůře se nacházejí ložiska (rezervoáry) horké vody. Můžeme říci hydrotermální zásobníky vody, mající vysokou teplotu a tlak, které se hledají pomocí geologických průzkumů. K takovému ložisku se vyhloubí minimálně dva vrty, produkční a injekční (vstříkovací). V praxi je ovšem velmi obtížné takové rezervoáry najít. Voda v těchto ložiscích dosahuje vysokých teplot a okolním tlakem hornin je stlačována a udržována ve formě kapalné horké vody. Jakmile se ovšem tlak ve vrtu uvolní, a hlubinné ložisko vody je spojeno přes vrt s nižším nebo atmosférickým tlakem, začne z tohoto vrtu voda stoupat na povrch. Voda se přivádí do separátoru páry, kde při poklesu tlaku syté kapaliny se část horké vody vypaří. Vzniklá pára začne přes redukční soustavu proudit do turbíny, kde expanduje, roztočí turbínu a ta generátor. Voda, která se nepřeměnila na páru, se injektuje zpět pod zemský povrch. Teplota na vstupu do turbíny je 155 °C až 165 °C a tlak je 0,5 MPa až 0,6 MPa. Spotřeba páry je zhruba okolo 8 kg/kWh. Poslední typy tohoto zařízení obsahují i demineralizační komoru, která slouží k odloučení minerálních látek z hydrotermálního pramene. Tyto minerální látky by mohly způsobovat korozi zařízení a tím i snižovat spolehlivost a životnost systému. Zásadní nevýhodou je ovšem to, že až 80 % primárního média se musí zpětně injektovat pod povrch a nedá se využít. [1] [3]

**Obr. 3-1 – Schéma Single Flash steam power plant [3]**



**Legenda k Obr. 3-1***BCV – zpětný kulový ventil**C – kondenzátor**CP – kondenzátní čerpadlo**CS – cyklonový separátor**CSV – rychlouzávěrný a regulační ventil**CT – chladicí věž**CWP – čerpadlo chladicí vody**IW – injekční vrt**MR – odstraňovač vlhkosti**PW – produkční vrt**S – kompenzátor objemu**SE/C – parní ejektor/kondenzátor**SP – parní potrubí**T/G – turbína s generátorem**WP – vodní potrubí**WV – hlavní uzavírací ventil***Obr. 3-2 –  $T - s$  diagram – systém Single Flash steam [3]****Legenda k Obr. 3-2***T – teplota [K]**s – měrná entropie [kJ/kg·K]**Critical point – kritický bod**Compressed liquid – kapalina*



*Flashing – odpařování kapaliny při škrcení*

*Saturation curve – horní mezní křivka syté páry*

*Superheated vapor – přehřátá pára*

*Separator – separátor*

*Liquid + vapor mixtures – mokrá pára*

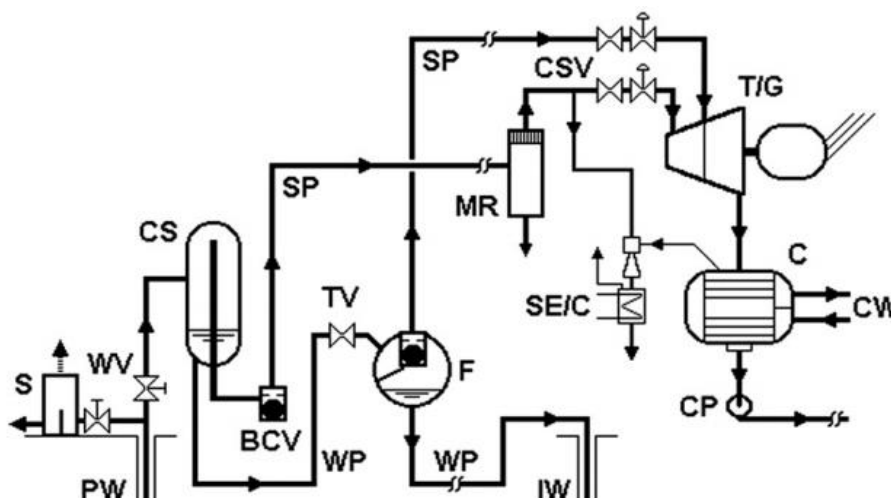
*Turbine – turbína*

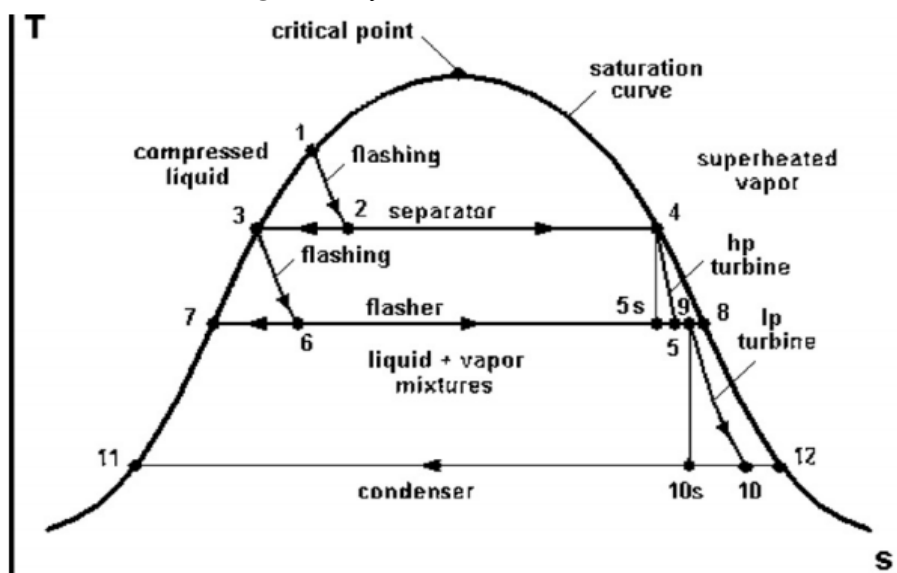
*Condenser – kondenzátor*

### 3.2 Double Flash steam

Druhou modifikací systému FS je Double Flash steam (DFS). Tato modifikace řeší problematiku lepšího využití odpadní vody ze separátoru páry. Technologie je topologicky velmi podobná SFS technologii, ale je vyvinuta pro vyšší využití geotermálních vod. Zařízení je rozšířeno o flash jednotku. Z produkčního vrtu se opět odnámá horká voda. Voda se přivádí do separátoru páry, kde při poklesu tlaku syté kapaliny se část horké vody vypaří. Vzniklá pára je hnána na první část turbíny. Separátor je brán spíše jako průtokový. Zbylá část horké vody, která se neodpařila, se ze separátoru přepouští do flash jednotky. Zde dochází k uvolnění další páry. Pára vycházející z flash jednotky má nižší tlak. Tato sekundární pára pohání nízkotlakou část turbíny. Celkově se u systému DFS generuje více páry než u systému SFS. Kondenzát je opět přes injekční vrt vstříkovan do země. Velkou výhodou tohoto systému je, že při zvýšení nákladů o 5 % až 10 % se zvedne účinnost celého zařízení o 20 % až 25 % oproti SFS. Elektrárna se tím stává výhodnější z hlediska většího využití vstupní horké vody z vrtu. [1] [3]

**Obr. 3-3 – Schéma Double Flash steam power plant [3]**



**Legenda k Obr. 3-3***BCV – zpětný kulový ventil**C – kondenzátor**CP – kondenzátní čerpadlo**CS – cyklonový separátor**CSV – rychlouzávěrný a regulační ventil**CW – chladicí voda**F – sálavá jednotka**IW – injekční vrt**MR – odstraňovač vlhkosti**PW – produkční vrt**S – kompenzátor objemu**SE/C – parní ejektor/kondenzátor**SP – parní potrubí**T/G – turbína s generátorem**TV – škrťací ventil**WP – vodní potrubí**WV – hlavní uzavírací ventil***Obr. 3-4 –  $T-s$  diagram – systém Double Flash steam [3]****Legenda k Obr. 3-4***T – teplota [K]**s – měrná entropie [kJ/kg·K]*

*Critical point – kritický bod*

*Compressed liquid – kapalina*

*Flashing – odpařování kapaliny při škrcení*

*Saturation curve – horní mezní křivka syté páry*

*Superheated vapor – přehřátá pára*

*Separator – separátor*

*Flasher – expandér*

*Liquid + vapor mixtures – mokrá pára*

*HP turbine – vysokotlaká část turbíny*

*LP turbine – nízkotlaká část turbíny*

*Condenser – kondenzátor*

### **3.3 Triple Flash steam**

Poslední základní modifikací systému FS je Triple Flash steam (TFS). Jedná se o nejpropracovanější systém z principů mokré páry. Využívá se z důvodu vysokého využití primárního média a vysokých hodnot účinnosti využití. Základní princip flash systému zůstává stejný. Rozdíl oproti předchozím systémům je, že má celkem jeden separátor páry a dvě flash jednotky pro různé zpracování horké tlakové vody, vícetlakou turbínu, která má tři části (vysokotlakou část, středotlakou část a nízkotlakou část) a ostatní potřebné vybavení zůstávají stejná. Princip systému spočívá v trojitém odpařování kapaliny při škrcení v jednom separátoru a ve dvou flash jednotkách páry. Vzniklá pára v separátoru a ve dvou flash jednotkách proudí postupně na vysokotlakou část, středotlakou část a nízkotlakou část turbíny. Horká voda, která se nepřeměnila v jednotlivé sekci, pokračuje do další následné sekce, kde se opět přemění na páru. Toto se opakuje celkem třikrát. Po poslední separaci zbylá horká voda a vzniklý kondenzát z jednotlivých částí turbíny pokračuje do injekčního vrtu, kde se vstříkují pod zemský povrch zpět do rezervoáru. Provádíme to, protože více využijeme vstupní médium. [1] [3]

### **3.4 Další možné modifikace systému Flash steam**

Neplatí, že se využívají jenom tři základní modifikace Single, Double, Triple Flash steam, ale používají se i jejich kombinace. Jako jsou například kombinace integrovaného systému SFS a DFS, připomínající dva závisle po sobě jdoucí SFS anebo kombinace kombinovaného systému SFS a DFS připomínající systém TFS. [1] [3]

### 3.5 Účinnost využití systému Flash steam

Účinnost využití SFS je 30 % až 35 %.

Účinnost využití DFS je 35 % až 45 %.

Účinnost využití TFS je 45 % až 50 %.

Účinnosti využití je definovaná jako podíl čisté mechanické práce a maximálního teoretického termodynamického výkonu nebo exergetického výkonu. [1] [3]

### 3.6 Ekologické aspekty systému Flash steam

Jako každý zdroj elektřiny nebo tepla i tento se sebou nese ekologické aspekty, jako jsou například znečištění vzduchu (emise  $H_2S$  a  $CO_2$ ), znečištění vody (odpadní voda, solanka), vzhled krajiny (potřebné budovy elektrárny, potrubní vedení) a hluk (samotná výstavba elektrárny, vrtání hlubinných vrtů). [1] [3]

### 3.7 Přehled geotermálních elektráren se systémem Flash steam

V této kapitole je vyjmenováno sedm různých světových geotermálních elektráren se systémem FS ve třech modifikacích SFS, DFS a TFS.

#### 3.7.1 Taonga (Nga Awa Purua)

Jedná se o nejmodernější geotermální elektrárnu s největším nainstalovaným výkonem 140 MW na světě, která využívá TFS – nejmodernější systém. Nachází se na Novém Zélandu. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-1. [4] [5]

**Tab. 3-1 – Základní parametry geotermální elektrárny Taonga (Nga Awa Purua) [4] [5]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Taupo, Auckland, Nový Zéland
Výkon elektrárny	140 MW
Rok spuštění	2010
Cena	300 mil. dolarů
<b>Parní turbína</b>	
Typ	Jednotělesová, dvouproudá kondenzační parní turbína s přetlakovým lopatkováním
Technologie	TFS
Jmenovitý výkon	140 MW
Maximální výkon	147 MW
Roční produkce	1100 GWh/rok
Vstupní tlak páry	Vysokotlaká část: 2,35 MPa
	Středotlaká část: 0,84 MPa
	Nízkotlaká část: 0,23 MPa
Výstupní tlak páry	0,0085 MPa
Vstupní teplota páry	Vysokotlaká část: 221 °C
	Středotlaká část: 172 °C
	Nízkotlaká část: 125 °C
Průtok páry	Vysokotlaká část: 171,38 kg/s
	Středotlaká část: 31,38 kg/s
	Nízkotlaká část: 28,61 kg/s
Otáčky	3000 ot/min
<b>Generátor</b>	
Typ	Uzavřené vodní chlazení, chlazené vzduchem
Zdánlivý výkon	173 MVA
Napětí	11 kV
Jmenovitý účinník	0,85
Otáčky	3000 ot/min

### 3.7.2 Wayang Windu

Tato geotermální elektrárna se nachází v Indonésii. Celkový výkon elektrárny je 110 MW za použití systému FS, konkrétně využívající typ SFS. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-2. [6]

**Tab. 3-2 – Základní parametry geotermální elektrárny Wayang Windu [6]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Wayang Windu, Indonésie
Výkon elektrárny	110 MW
Rok spuštění	1999
<b>Parní turbína</b>	
Technologie	SFS
Jmenovitý výkon	110 MW
Vstupní tlak páry	1,02 MPa
Výstupní tlak páry	0,012 MPa
Vstupní teplota páry	181 °C
Otáčky	3 000 ot/min
<b>Generátor</b>	
Zdánlivý výkon	137,5 MVA
Napětí	13,8 kV
Jmenovitý účinník	0,8
Otáčky	3000 ot/min

### 3.7.3 Kawerau

Geotermální elektrárnu nacházející se na Novém Zélandu. Celkový výkon elektrárny je 95 MW za použití systému FS, konkrétně využívající typ DFS. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-3. [4] [7]

**Tab. 3-3 – Základní parametry geotermální elektrárny Kawerau [4] [7]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Kawerau, Nový Zéland
Výkon elektrárny	95 MW
Rok spuštění	2008
Cena	211,4 mil. dolarů
<b>Parní turbína</b>	
Typ	Jednotělesová, dvouproudá kondenzační parní turbína s přetlakovým lopatkováním
Technologie	DFS
Jmenovitý výkon	95 MW
Maximální výkon	113 MW
Roční produkce	800 GWh/rok
Vstupní tlak páry	Vysokotlaká část: 1,13 MPa Nízkotlaká část: 0,18 MPa
Výstupní tlak páry	0,008 MPa
Vstupní teplota páry	Vysokotlaká část: 185 °C Nízkotlaká část: 118 °C
Průtok páry	Vysokotlaká část: 129,16 kg/s Nízkotlaká část: 50,00 kg/s
Otáčky	3000 ot/min
<b>Generátor</b>	
Typ	Uzavřené vodní chlazení, chlazené vzduchem
Zdánlivý výkon	130 MVA
Napětí	11 kV
Jmenovitý účinník	0,85
Otáčky	3000 ot/min

### 3.7.4 Reykjanes

Na Islandu nalezneme geotermální elektrárnu Reykjanes, která má celkový výkon 150 MW za použití systému FS, konkrétně využívající typ SFS. Elektrárna je tvořena třemi jednotkami o výkonu 50 MW. Společně s geotermální elektrárnou Svartsengi produkují 18 % elektrické energie na Islandu a 90 % tepelné energie pro obytná zařízení na Islandu. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-4. [8]

**Tab. 3-4 – Základní parametry geotermální elektrárny Reykjanes [8]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Reykjanes, Island
Výkon elektrárny	150 MW
Rok spuštění	2006, 2010
Teplota vody	210 °C
<b>Parní turbína</b>	
Technologie	SFS
Jmenovitý výkon	50 MW
Vstupní tlak páry	1,9 MPa
Výstupní tlak páry	0,001 MPa
Vstupní teplota páry	210 °C
Průtok páry	80,3 kg/s
Otáčky	3000 ot/min



### 3.7.5 Miravalles

Kostarika patří mezi země, která má též geotermální elektrárnu pro výrobu elektrické energie, jejíž celkový výkon je 144 MW za použití systému FS, konkrétně využívající typ SFS. V tabulce Tab. 3-5 jsou uvedeny informace k nejnovější jednotce elektrárny, která byla nainstalována v roce 2000. [9]

**Tab. 3-5 – Základní parametry geotermální elektrárny Miravalles – jednotka 3 [9]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Miravalles, Kostarika
Výkon elektrárny	29 MW
Rok spuštění	2000
Teplota vody	240 °C
Tlak vody	3,347 MPa
Průtok vody	320,6 kg/s
<b>Parní turbína</b>	
Technologie	SFS
Jmenovitý výkon	29 MW
Maximální výkon	29,45 MW
Roční produkce	240 GWh/rok
Vstupní tlak páry	0,57 MPa
Výstupní tlak páry	0,009 MPa
Vstupní teplota páry	156,8 °C
Průtok páry	57,7 kg/s
Otáčky	3600 ot/min
<b>Generátor</b>	
Proud	1374 A
Napětí	13,8 kV
Jmenovitý účinník	0,9
Otáčky	3600 ot/min

### 3.7.6 Olkaria I

Další geotermální elektrárna se nachází v Keni. Celkový výkon elektrárny je 45 MW za použití systému FS, konkrétně využívající typ SFS. Elektrárna je tvořena třemi jednotkami o 15 MW. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-6. [10]

**Tab. 3-6 – Základní parametry geotermální elektrárny Olkaria I [10]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Olkaria I, Keňa
Výkon elektrárny	45 MW
Rok spuštění	1981 až 1985
Teplota vody	230 °C až 260 °C
<b>Parní turbína</b>	
Technologie	SFS
Jmenovitý výkon	15 MW
Vstupní tlak páry	0,573 MPa
Výstupní tlak páry	0,0127 MPa
Vstupní teplota páry	157,71 °C
Průtok páry	118,0 kg/s
Otáčky	3000 ot/min
<b>Generátor</b>	
Zdánlivý výkon	18,75 MVA
Napětí	11 kV
Jmenovitý účinník	0,8
Otáčky	3000 ot/min

### 3.7.7 Te Mihi

Plánovaná geotermální elektrárna nacházející se na Novém Zélandu. Celkový výkon elektrárny by měl být 235 MW za použití systému FS, konkrétně využívající typ DFS. Elektrárna bude tvořena třemi jednotkami o 78,3 MW. Podle dostupných informací by se elektrárna měla stát největší, co do velikosti instalovaného výkonu na světě se systémem FS. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-7. [11]

**Tab. 3-7 – Základní parametry geotermální elektrárny Te Mihi [11]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Te Mihi, Nový Zéland
Výkon elektrárny	235 MW
<b>Parní turbína</b>	
Technologie	DFS
Jmenovitý výkon	78,3 MW
Vstupní tlak páry	Vysokotlaká část: 0,535 MPa
	Nízkotlaká část: 0,12 MPa
Výstupní tlak páry	0,009 MPa
Vstupní teplota páry	Vysokotlaká část: 158 °C
	Nízký stupeň: 102 °C
Otáčky	3000 ot/min

## 4. Horkovodní princip – Binary cycle

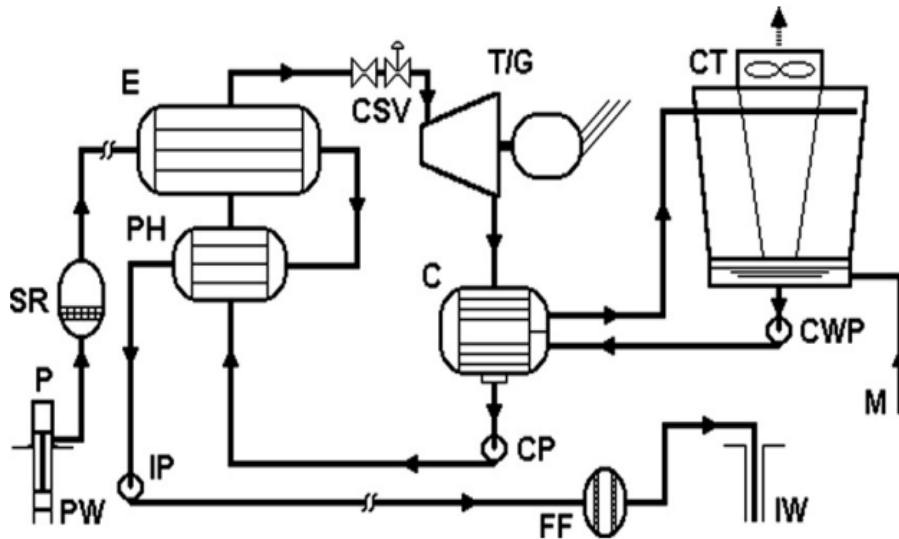
V této kapitole je detailní zaměření na geotermální systém založený na horkovodním principu – Binary cycle. Základní popis systému je uveden v podkapitole 2.3.

### 4.1 Binary cycle

Jedná se o technologii, která je odlišná od systému FS. Podstatný rozdíl je v tom, že tento systém je uzavřený. To znamená, že po vyhloubení a propojení geotermálního vrtu, není vrt propojen s nižším nebo atmosférickým tlakem. Uzavření systému na povrchu je řešeno tepelným výměníkem. Tlak v celém systému je konstantní, nedochází k expanzi horké vody na páru, tedy v primárním okruhu stále proudí horká voda. Primární okruh je tvořen produkčním a injekčním vrtem, primární stranou tepelného výměníku, který se skládá z výparníku a přehříváku. Sekundární okruh je tvořen sekundární stranou tepelného výměníku, turbínou na organické páry, kondenzátorem a oběhovým čerpadlem. V sekundárním okruhu proudí kapalina (sekundární médium nebo-li binární médium), která je převážně organického typu (uhlovodíky, ale dá se použít i voda), která má výrazně nižší teplotu varu. Kapalina se mění v páru při teplotě horké vody ve výparníku. Přehřívák má v systému za úkol přehřívát sekundární médium před vstupem do výparníku. Vzniklá pára vstupuje do turbíny, kde se zpracovává a pohybuje generátorem.

Je-li sekundárním médiem organické médium, jedná o tzv. Organický Rankinův cyklus. Mezi pracovní látky můžeme zařadit celou řadou organických látek, jako jsou butan ( $C_4H_{10}$ ), isobutan ( $i-C_4H_{10}$ ), pentan ( $C_5H_{12}$ ), isopentan ( $i-C_5H_{12}$ ), silikonový olej, ale dá se použít i voda ( $H_2O$ ).

Výhodou celého systému je, že můžeme použít i geotermální zdroje, které mají nižší teploty. Systém má i nevýhody, tou největší je vysoká nákladovost. [1] [3]

**Obr. 4-1 – Schéma Binary cycle power plant [3]**

**Legenda k Obr. 4-1**

*C – kondenzátor*

*CP – kondenzátní čerpadlo*

*CSV – rychlouzávěrný a regulační ventil*

*CT – chladicí věž*

*CWP – čerpadlo chladící vody*

*E – výparník*

*FF – konečný filtr*

*IP – injekční čerpadlo*

*IW – injekční vrt*

*M – úpravna vody*

*P – čerpadlo*

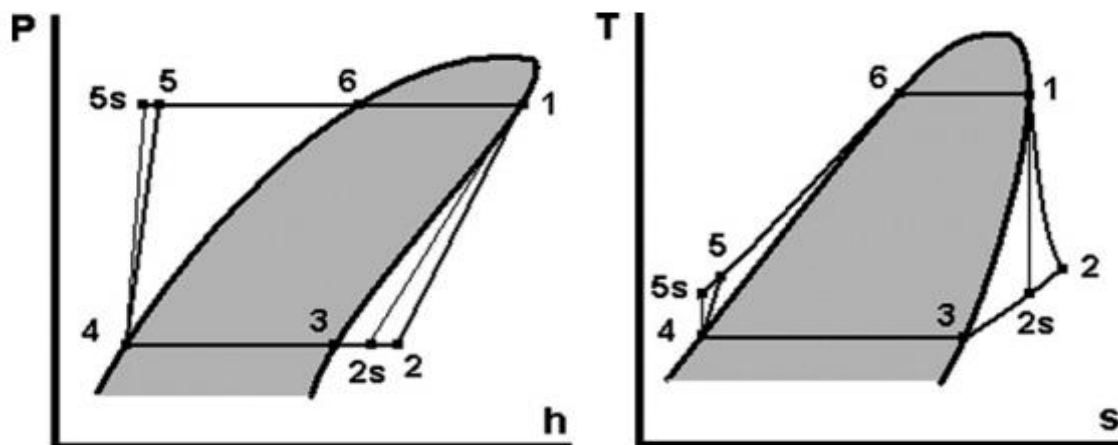
*PH – předehřívák*

*PW – produkční vrt*

*SR – odstraňovač písku*

*T/G – turbína s generátorem*

*WP – vodní potrubí*

Obr. 4.2 –  $p-h$  diagram a  $T-s$  diagram – systém Binary cycle [3]

Legenda k Obr. 4-2

$p$  – tlak [MPa]

$h$  – měrná entalpie [kJ/kg]

$T$  – teplota [K]

$s$  – měrná entropie [kJ/kg·K]

#### 4.2 Další možné modifikace systému Binary cycle

Neplatí, že se využívá jenom základní modifikace Binary cycle, ale používá se i systém dvojitého BC, připomínající dva závisle po sobě jdoucí BC, není moc rozšířený, protože je technicky složitý. [1] [3]

#### 4.3 Účinnost využití systému Binary cycle

Účinnost využití BC je 25 % až 45 %.

Účinnosti využití je definovaná jako podíl čisté mechanické práce a maximálního teoretického termodynamického výkonu nebo exergetického výkonu. [1] [3]

#### 4.4 Ekologické aspekty systému Binary cycle

Jako každý zdroj elektřiny nebo tepla i tento se sebou nese ekologické aspekty, ale oproti systému FS jsou minimální, protože systém je zcela uzavřený a geotermální médium nepřijde za běžného provozu do kontaktu se vzduchem a okolím. Takže zůstávají jenom aspekty spojené se vzhledem krajiny (potřebné budovy elektrárny, potrubní vedení) a hlukem (samotná výstavba elektrárny, vrtání hlubinných vrtů). [1] [3]

#### 4.5 Přehled geotermálních elektráren se systémem Binary cycle

V této kapitole je vyjmenováno šest různých světových geotermálních elektráren se systémem BC.

##### 4.5.1 Casa Diablo

Jedná se o největší geotermální elektrárnu s největším nainstalovaným výkonem 40 MW na světě, která využívá BC. Nachází se v USA. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-1. [12]

**Tab. 4-1 – Základní parametry geotermální elektrárny Casa Diablo [12]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Casa Diablo, Kalifornie, USA
Výkon elektrárny	40 MW
Technologie	BC
Rok spuštění	1984
Teplota vody	175 °C
Průtok vody	900 kg/s

##### 4.5.2 Raft River

Tato geotermální elektrárna se nachází v USA. Celkový výkon elektrárny je 13 MW za použití systému BC. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-2. [13]

**Tab. 4-2 – Základní parametry geotermální elektrárny Raft River [13]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Raft River, Idaho, USA
Výkon elektrárny	13 MW
Rok spuštění	1981
Teplota vody	140 °C
Průtok vody	400 kg/s
<b>Parní turbína</b>	
Technologie	BC
Vstupní teplota páry	163 °C
Otáčky	8000 ot/min
<b>Generátor</b>	
Typ	Synchronní
Zdánlivý výkon	7,579 MVA
Napětí	4,16 kV
Jmenovitý účinník	0,9
Otáčky	1200 ot/min

### 4.5.3 Ribeira Grabde

Geotermální elektrárnu nacházející se v Portugalsku. Celkový výkon elektrárny je 13 MW za použití systému BC. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-3. [14]

**Tab. 4-3 – Základní parametry geotermální elektrárny Ribeira Grabde [14]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Ribeira Grabde, Portugalsko
Výkon elektrárny	13 MW
Rok spuštění	1994
Teplota vody	152 °C
Průtok vody	125,6 kg/s
<b>Parní turbína</b>	
Technologie	BC
Jmenovitý výkon	5 MW
Maximální výkon	5,08 MW
Vstupní tlak páry	0,0516 MPa
Průtok páry	12,3 kg/s

### 4.5.4 Pico Vermelho B

V Portugalsku nalezneme geotermální elektrárnu Pico Vermelho B, která má celkový výkon 10 MW za použití systému BC. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-4. [14]

**Tab. 4-4 – Základní parametry geotermální elektrárny Pico Vermelho B [14]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Pico Vermelho B, Portugalsko
Výkon elektrárny	10 MW
Rok spuštění	1980
Teplota vody	161,3 °C
Průtok vody	96,3 kg/s
<b>Parní turbína</b>	
Technologie	BC
Jmenovitý výkon	10 MW
Maximální výkon	10 MW
Vstupní tlak páry	0,05 MPa
Průtok páry	20,8 kg/s



#### 4.5.5 Berlín

El Salvador patří mezi země, která má též geotermální elektrárnu pro výrobu elektrické energie, jejíž celkový výkon je 9,3 MW za použití systému BC. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-5. [15]

**Tab. 4-5 – Základní parametry geotermální elektrárny Berlín [15]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Berlín, El Salvador
Výkon elektrárny	9,3 MW
Rok spuštění	2008
Teploty vody	185 °C
Průtok vody	282,8 kg/s
<b>Parní turbína</b>	
Typ	Jednotělesová, jednoproudá kondenzační parní turbína
Technologie	BC
Jmenovitý výkon	5,0 MW
Vstupní tlak páry	0,95 - 1,06 MPa
Výstupní tlak páry	0,01 MPa
Průtok páry	50,0 - 55,6 kg/s
Otáčky	3600 ot/min
<b>Generátor</b>	
Typ	3 fázový, synchronní
Zdánlivý výkon	37,05 kVA
Napětí	13,8 kV
Jmenovitý účinník	0,85
Otáčky	3600 ot/min

#### 4.5.6 Los Azufres II

Další geotermální elektrárna se nachází v Mexiku. Celkový výkon elektrárny je 3 MW za použití systému BC. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-6. [16]

**Tab. 4-6 – Základní parametry geotermální elektrárny Los Azufres II [16]**

<b>Základní parametry</b>	
Lokalita	Los Azufres II, Mexiko
Výkon elektrárny	3 MW
Rok spuštění	1993
Teploty vody	180 °C
Průtok vody	77,7 kg/s
<b>Parní turbína</b>	
Typ	Jednotělesová, jednoproudá kondenzační parní turbína
Technologie	BC
Vstupní tlak páry	0,8 MPa
Výstupní tlak páry	0,008 MPa
Průtok páry	7,8 kg/s
Otáčky	3600 ot/min
<b>Generátor</b>	
Typ	Vzduchem chlazený, synchronní
Napětí	4160V
Jmenovitý účinník	0,85
Otáčky	3600 ot/min

## 5. Kombinace principu mokré páry a horkovodního principu – Combined Single Flash steam and Binary cycle

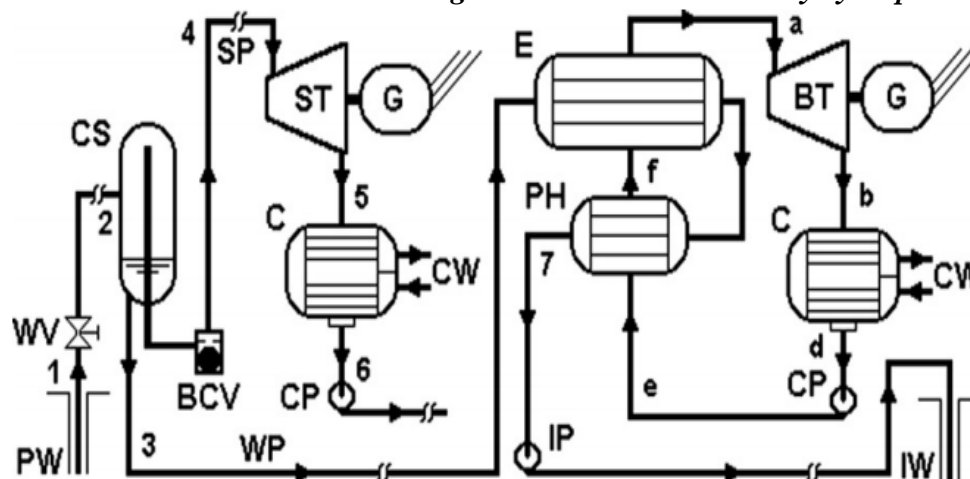
V této kapitole je detailní zaměření na geotermální systém založený na kombinaci principu mokré páry a horkovodním principu – Combined Single Flash steam and Binary cycle (CSFS&BC).

### 5.1 Combined Single Flash steam and Binary cycle

Jedná se o možnou kombinaci dvou geotermálních systémů pro výrobu elektřiny.

Primárním systémem zůstává klasický SFS, který je rozšířený o sekundární systém a to o BC. Zjednodušeně můžeme říci, že se horká voda (primární médium) separuje v jednom stupni. Zbylé primární médium má ještě vysoký nevyužitý potenciál na další zpracování, jinak by se zpět vracelo pod zem. Toto zbylé primární médium proudí do tepelného výměníku, kde předá jinak nevyužitě teplo kapalině (sekundární médium nebo-li binární médium), která je převážně organického typu (uhlovodíky, ale dá se použít i voda), pak zbylé primární médium se vrací pod zem. Z primárního systému vzniklá pára se zpracovává v turbíně, kondenzuje v kondenzátoru a vzniklý kondenzát se zpět vrací pod zemský povrch. Při předávání tepla ve výměníku tepla se sekundární médium z kapalné fáze (organické médium nebo voda), přemění na plynnou fázi (pára), která se zpracuje v turbíně, zkondenzuje v kondenzátoru a proudí do napájecí nádrže. Provádíme to, protože více využijeme vstupní médium. Systém má i nevýhody, tou největší je vysoká nákladovost. [1] [3]

*Obr. 5-1 – Schéma Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant [3]*



*Legenda k Obr. 5-1*

*BCV – zpětný kulový ventil*

*BT – turbína pro sekundární (binární) médium*

*C* – kondenzátor

*CP* – kondenzátní čerpadlo

*CS* – cyklonový separátor

*CW* – chladicí voda

*E* – výparník

*G* – generátor

*IP* – injekční čerpadlo

*IW* – injekční vrt

*PH* – předehřívák

*PW* – produkční vrt

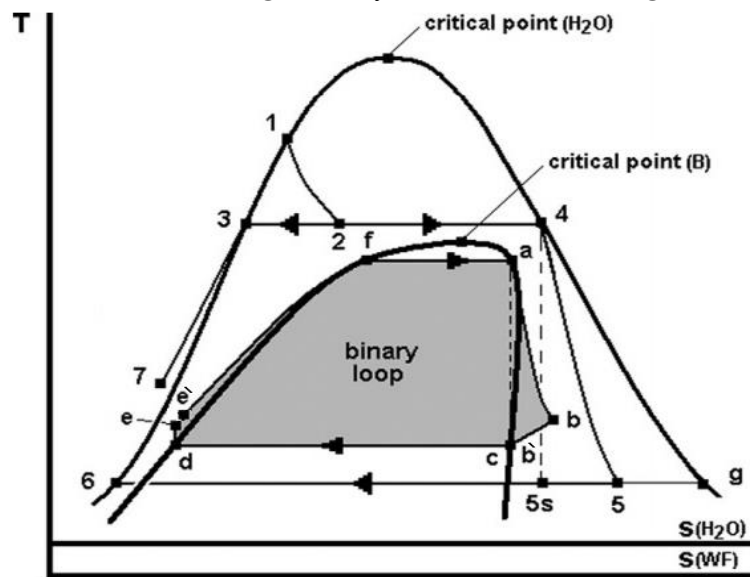
*SP* – parní potrubí

*ST* – turbína pro primární médium

*WP* – vodní potrubí

*WV* – hlavní uzavírací ventil

**Obr. 5-2 – *T* – *s* diagram – systém Combined Single Flash steam and Binary cycle [3]**



**Legenda k Obr. 5-2**

*T* – teplota [K]

*s* ( $H_2O$ ) – měrná entropie vody [kJ/kg·K]

*s* (WF) – měrná entropie sekundárního média Binárního cyklu [kJ/kg·K]

Critical point ( $H_2O$ ) – kritický bod vody

Critical point (B) – kritický bod sekundárního média Binárního cyklu

Binary loop – Binární cyklus

## 5.2 Účinnost využití systému Combined Single Flash steam and Binary cycle

Jelikož tento systém se minimálně používá, tak nalézt jeho účinnost využití, je nemožné. Ale můžeme vycházet ze znalosti systémů, ze kterých je složen.

Tedy systémů SFS a BC.

Účinnost využití SFS je 30 % až 35 %.

Účinnost využití BC je 25 % až 45 %.

Dále víme, že systém je řazen, a tak jako u paroplynového cyklu bez přívodu tepla do parní části se účinnost využití počítá, jako součet částí (parní část plus plynná část) a od toho se odečítá součin těchto částí (parní část krát plynná část). Z toho to vztahu by účinnost využití pro CSFS&BC vycházela 47,5 % až 64,25 %.

Účinnost využití CSFS&BC je teoreticky 47,5 % až 64,25 %.

Účinnosti využití je definovaná jako podíl čisté mechanické práce a maximálního teoretického termodynamického výkonu nebo exergetického výkonu. [1] [3]

## 5.3 Ekologické aspekty systému Combined Single Flash steam and Binary cycle

Jelikož tento systém se minimálně používá, tak nalez jeho ekologické aspekty, je nemožné.

Proto vycházíme z ekologických aspektů ze systémů, ze kterých je složen. Tedy systémů SFS a BC. Jejichž ekologické aspekty jsou uvedeny v podkapitolách 3.6, 4.4.

## 5.4 Přehled geotermálních elektráren využívající systém Combined Single Flash steam and Binary cycle

V této kapitole je vyjmenovaná pouze jedna světová geotermální elektrárna využívající systém CSFS&BC.

### 5.4.1 Puna Venture

Jedná se o největší geotermální elektrárnu s největším instalovaným výkonem 35 MW na světě, která využívá CSFS&BC. Nachází se na Havaii. Jednotlivé informace jsou uvedeny v tabulce Tab. 5-1. [17]

**Tab. 5-1 – Základní parametry geotermální elektrárny Puna Venture [17]**

Základní parametry	
Lokalita	Puna Venture, Havaii
Výkon elektrárny	35 MW
Roční produkce	229,9 GWh/rok
Technologie	CSFS&BC
Rok spuštění	1992

## 6. Porovnání systémů SFS, DFS, TFS, BC a CSFS&BC

V této kapitole jsou porovnány jednotlivé geotermální systémy SFS, DFS, TFS, BC a CSFS&BC z hlediska nasazení podle teploty horké vody z vrtu a dále podle jejich výhodnosti a nevýhodnosti.

### 6.1 Rozdělení systémů podle teploty a měrné entalpie horké vody z vrtu

V této podkapitole jsou uvedeny přibližné hodnoty teplot horké vody z vrtu, kdy se který ze systémů používá. Hodnoty nemají ostré hranici, vždy záleží na dané lokalitě, složení geotermální vody a dalších parametrech.

Pro teplotu horké vody z vrtu v rozsahu 80 °C až 175 °C se používá systém BC.

Pro teplotu horké vody z vrtu v rozsahu 150 °C až 300 °C se používají systémy DFS, TFS.

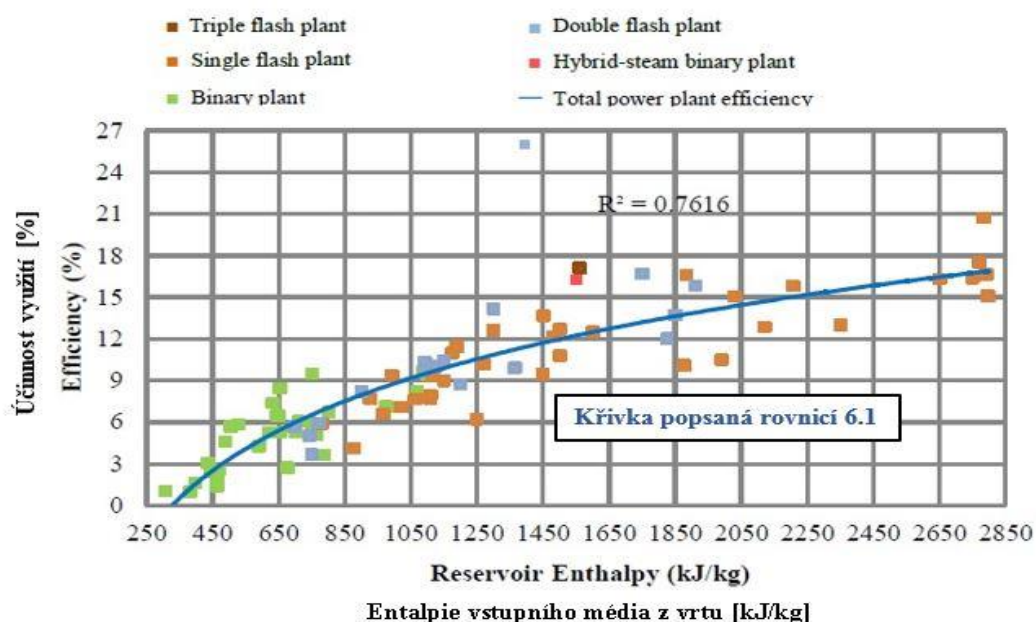
Pro teplotu horké vody z vrtu v rozsahu 175 °C až 350 °C se používá systém SFS.

CSFS&BC – nebyl zařazen z důvodu jeho minimálního nasazení.

Další možnost, jak určit, kdy který geotermální systém použít, je pomocí skutečné účinnosti využití daného geotermálního systému. Skutečná účinnost využití je funkcí entalpie primárního média z vrtu, které odpovídá teplota média z vrtu. Bohužel výpočtové vzorce pro tuto skutečnou účinnost využití byly získány na základě zpracování velkého množství dat existujících geotermálních elektráren na světě.

Do výzkumu bylo zapojeno celkem 94 geotermálních elektráren. Výzkumu odpovídají grafy na Obr. 6-1 a Obr. 6-2 a z nich získané rovnice (výpočtové vzorce) 6.1 až 6.4. [12]

**Obr. 6-1 – Rozložení geotermálních elektráren zapojených do výzkumu v závislosti na měrné entalpii vstupního média z vrtu [12]**



**Legenda k Obr. 6-1**

Triple flash plant – Geotermální elektrárny se systémem TFS

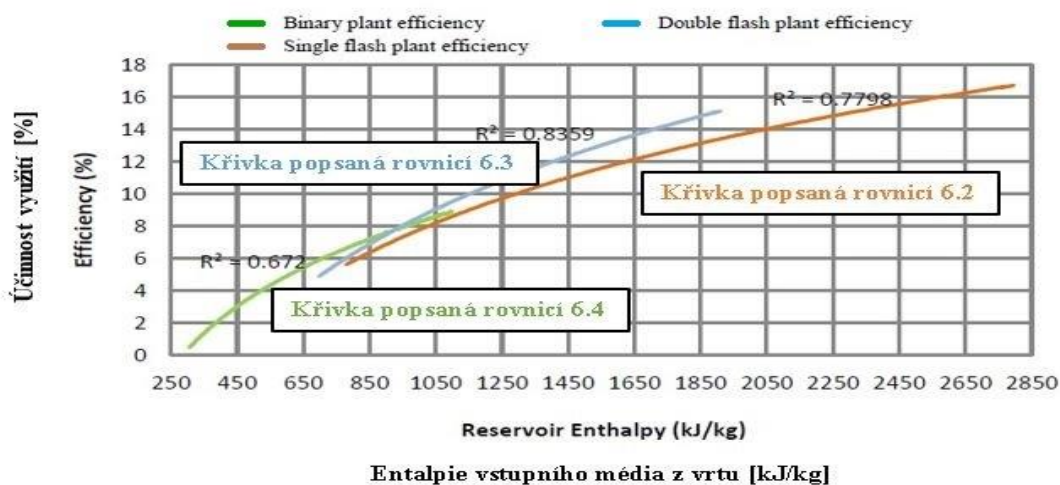
Double flash plant – Geotermální elektrárny se systémem DFS

Single flash plant – Geotermální elektrárny se systémem SFS

Hybrid - steam binary plant – Geotermální elektrárny se systémem CSFS&amp;BC

Binary plant – Geotermální elektrárny se systémem BC

Total power plant efficiency – Křivka popisující účinnost využití

**Obr. 6-2 – Promítnutí jednotlivých geotermálních systémů do křivek, zapojených do výzkumu v závislosti na měrné entalpii vstupního média z vrtu [12]****Legenda k Obr. 6-2**

Binary plant efficiency – Účinnost využití geotermálních elektráren se systémem BC

Single flash plant efficiency – Účinnost využití geotermálních elektráren se systémem SFS

Double flash plant efficiency – Účinnost využití geotermálních elektráren se systémem DFS

$$\eta_{Act} = 7,8795 \cdot \ln(h_{in}) - 45,651 \quad (6.1)$$

$$\eta_{Act} = 8,7007 \cdot \ln(h_{in}) - 52,335 \quad (6.2)$$

$$\eta_{Act} = 10,166 \cdot \ln(h_{in}) - 61,680 \quad (6.3)$$

$$\eta_{Act} = 6,6869 \cdot \ln(h_{in}) - 37,930 \quad (6.4)$$

 $\eta_{Act}$  – skutečná účinnost využití geotermálního systému [1] $h_{in}$  – entalpie vstupního média z vrtu [kJ/kg]

Rovnice 6.1 – použitelná pro: Geotermální elektrárny: obecně

Rovnice 6.2 – použitelná pro: Geotermální elektrárny se systémy: SFS

Rovnice 6.3 – použitelná pro: Geotermální elektrárny se systémem: DFS, TFS

Rovnice 6.4 – použitelná pro: Geotermální elektrárny se systémem: BC

## 6.2 Porovnání výhod a nevýhod systémů

V této podkapitole jsou vyjmenovány pro každý systém jeho výhody a nevýhody. Můžu říci, že to co některý systém má za výhodu, jiný systém mám za nevýhodu a naopak. Vždy záleží na podrobnější specifikaci problému.

### SFS

Výhody - nasazení při vysokých teplotách vody z vrtu,  
- jednoduchost systému oproti systémům DFS, TFS.

Nevýhody - vysoké nevyužití primárního média oproti SFS, DFS, CSFS&BC,  
- problematika nekondenzovatelných plynů.

### DFS

Výhody - vyšší využití primárního média oproti SFS,  
- nasazení při vysokých teplotách vody z vrtu, ale nižších než u SFS.

Nevýhody - složitost systému oproti SFS,  
- problematika nekondenzovatelných plynů.

### TFS

Výhody - největší využití primárního média z principů mokré páry,  
- nasazení při vysokých teplotách vody z vrtu, ale nižších než u SFS.

Nevýhody - nejsložitější systém z principů mokré páry,  
- problematika nekondenzovatelných plynů.

### BC

Výhody - nasazení při nízkých teplotách vody z vrtu, ze všech geotermálních systémů,  
- minimální problematika nekondenzovatelných plynů oproti FS.

Nevýhody - problematika Organického Rankinova cyklu,  
- toxické a hořlavé sekundární médium.

### CSFS&BC

Výhody - vysoké využití primárního média oproti BC,  
- nasazení při ani nízkých ani vysokých teplotách vody z vrtu.

Nevýhody - problematika Organického Rankinova cyklu,  
- minimum podkladů a znalostí o systému,  
- toxické a hořlavé sekundární médium,  
- nejsložitější geotermální systém  
- částečná problematika nekondenzovatelných plynů.



## 7. Zadání, zjednodušení, účinnosti a vstupní parametry pro výpočet

V této kapitole je uvedeno zadání, jednotlivá zjednodušení, definice možných účinností a vstupní parametry (vstupní hodnoty a volené konstanty) pro výpočet.

### 7.1 Zadání

Cílem výpočtu je zjistit použitelnost dvou různých a jednoho složeného systémů v geotermální energetice a to systém FS v modifikacích SFS a DFS, systém BC a složený systém CSFS&BC v závislosti na stejném zdroji horké vody v rozsahu teplot 100 °C až 300 °C po 25 °C a stejném počátečním hmotnostním toku z vrtu. Hlavním důvod, proč se zabývám touto problematikou, je zjistit, kdy je výhodnější použít systém FS v modifikacích SFS a DFS, kdy systém BC a složený systém CSFS&BC z hlediska počáteční teploty horké vody z vrtu. U systému BC a CSFS&BC je uvažováno na straně sekundárního média organické médium butan ( $C_4H_{10}$ ) a pentan ( $C_5H_{12}$ ). Voda ( $H_2O$ ) je uvažována jenom pro systém BC.

### 7.2 Zjednodušení

Výpočty jsou prováděny s velkým množstvím zjednodušení. Pro systémy FS jsou zanedbány tlakové ztráty v dopravě vody z vrtu do separátoru a do flasheru. Další zjednodušení je, že pára vyseparovaná v separátoru a ve flasheru neobsahuje žádné kapičky vody. Zjednodušení týkající se systému BC jsou takové, že nejsou uvažovány tlakové ztráty v dopravě vody z vrtu do tepelného výměníku. Další zjednodušení je, že pára vzniklá v tepelném výměníku, neobsahuje žádné kapičky vody, vznikla čistá sytá pára. Poslední zjednodušení je, že přeměna vody na páru se děje bez tlakových ztrát. Pro systém CSFS&BC platí kombinace výše uvedených zjednodušení.

### 7.3 Účinnosti

Mezi základní ztráty, ze kterých vyplývají jednotlivé účinnosti, jsou zařazeny:

- : mechanické ztráty => mechanická účinnost,
- : ztráty v turbíně => termodynamická účinnost turbíny,
- : ztráty v čerpadle => termodynamická účinnost čerpadla,
- : ztráty v generátoru => účinnost generátoru,
- : ztráty v transformátoru => účinnost transformátoru.

Mnohem důležitější ztráty pro výpočet geotermálních systémů jsou:

: ztráty při dopravě média z vrtu => účinnost potrubí z vrtu,

: ztráty nekondenzovatelnými plyny => účinnost média. Do prvotních bilancí nejsou tyto ztráty zahrnuty. Řešeno v samostatné kapitole 9.

### 7.3.1 Mechanická účinnost – $\eta_{\text{Mech}}$ [1] [%]

Do této účinnosti se řadí veškeré mechanické ztráty a ztráty způsobené třením (převody, ložiska,...). Ve výpočtech není uvažována.

Platí pro: SFS, DFS, BC a SFS&BC.

### 7.3.2 Termodynamická účinnost turbíny – $\eta_T$ [1] [%]

Jedná se o schopnost, v jakém rozsahu může expandovat plynné (parní) médium v turbíně, jaké nastanou při expanzi média ztráty. Pro turbíny v geotermální energetice se účinnosti pohybují v rozsahu 81 % až 85 %. [12]

Pro výpočet je zvolena horní hranice tedy 85 %.

Platí pro: SFS, DFS, BC a SFS&BC.

### 7.3.3 Termodynamická účinnost čerpadla – $\eta_c$ [1] [%]

Jedná se o schopnost, v jakém rozsahu může stlačit kapalné (vodní, organické) médium v čerpadle, jaké nastanou při stlačení média ztráty. Pro čerpadla v geotermální energetice se účinnosti pohybují v rozsahu 70 % až 80%. [12]

Pro výpočet je zvolena prostřední hranice 75 %.

Platí pouze pro: BC a SFS&BC.

### 7.3.4 Účinnost generátoru – $\eta_G$ [1] [%]

Další účinnost je vztažena ke ztrátám v generátoru. Pro generátory v geotermální energetice se účinnosti pohybují v rozsahu 95,7 % až 99,0 %. [12]

Do výpočtu je tato účinnost zahrnuta a zvolena 100 %.

Platí pro: SFS, DFS, BC a SFS&BC.

### 7.3.5 Účinnost transformátoru – $\eta_{Tr}$ [1] [%]

Tato účinnost je vztažena ke ztrátám v transformátoru a transformaci elektrického napětí na požadované hodnoty. Pro transformátory v geotermální energetice se účinnosti pohybují v rozsahu 90 % až 99 %. [12]

Ve výpočtech není uvažována.

Platí pro: SFS, DFS, BC a SFS&BC.

### 7.3.6 Účinnost potrubí z vrtu – $\eta_{Pipe}$ [1] [%]

Tato účinnost je závislá na délce přívodního potrubí z vrtu, dá se spočítat podle rovnice (7.1). [12]

Do výpočtu není zahrnuta.

Platí pro: SFS, DFS, BC a SFS&BC.

$$\eta_{Pipe} = 1 - 0,003 \cdot L_p \quad (7.1)$$

$L_p$  – délka přívodního potrubí [km]

## 7.4 Vstupní hodnoty, konstanty a veličiny

V této podkapitole jsou uvedeny všechny vstupní hodnoty, volené konstanty a použité veličiny.

Teplota horké vody z vrtu:  $t_{in} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  po  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Celkový hmotnostní průtok:  $m_{Total} = 100 \text{ kg/s}$

Teplota kondenzace:  $t_K = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Pinch Point:  $t_{PP} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Účinnost čerpadla:  $\eta_c = 0,75$  (75%)

Účinnost turbíny:  $\eta_T = 0,85$  (85 %)

Účinnost generátoru:  $\eta_G = 1$  (100 %)

$p_1$  – tlak vody z vrtu na mezi sytosti kapaliny,  $p_1$  je funkcí  $t_{in}$  [MPa]

$p_2$  – tlak vody v separátoru pro SFS, DFS a SFS&BC [MPa]

$p_6$  – tlak vody ve flasheru = tlak ve flash jednotce pro DFS [MPa]

$p_{aB}$  – admisní tlak pro BC a SFS&BC [MPa]

$t_{aB}$  – admisní teplota pro BC a SFS&BC [ $^\circ\text{C}$ ]

## 8. Postup výpočtu, použité rovnice a grafy

V této kapitole jsou uvedeny použité rovnice pro zjednodušený bilanční výpočet a získané grafické závislosti pro jednotlivé systémy.

### 8.1 Single Flash steam power plant

Detailnější popis systému je uveden v podkapitole 3.1. Cílem je pomocí zjednodušeného bilančního výpočtu, ke kterému byly použity rovnice (8.1 až 8.5) a T – s diagram na Obr. 3-2, získat grafickou závislost maximálního elektrického výkonu na teplotách z rozsahu 100 °C až 300 °C po 25 °C, graf je uveden na Obr. 8-16 v podkapitole 8.8. Než byl získán maximální elektrický výkon pro danou teplotu, byla vždy provedena optimalizace tlaku  $p_2$ .

#### 8.1.1 Přehled rovnic

$$h_1 = h_2 \quad (8.1)$$

$h_1$  – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny před separováním pro SFS [kJ/kg]

(Bod 1 v Obr. 3-2)

$h_2$  – entalpie mokré páry při tlaku v separátoru pro SFS [kJ/kg] (Bod 2 v Obr. 3-2)

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} \quad (8.2)$$

$x_2$  – suchost mokré páry pro SFS [%]

$h_3$  – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny při tlaku v separátoru pro SFS [kJ/kg]

(Bod 3 v Obr. 3-2)

$h_4$  – entalpie páry na mezi sytosti páry při tlaku v separátoru pro SFS [kJ/kg]

(Bod 4 v Obr. 3-2)

$$m_4 = m_{Total} \cdot x_2 \quad (8.3)$$

$m_4$  – hmotnostní průtok páry expandující v turbíně pro SFS [kg/s]

$m_{Total}$  – celkový hmotnostní průtok pro SFS [kg/s]

$$h_5 = -\eta_T \cdot (h_4 - h_{5s}) + h_4 \quad (8.4)$$

$h_5$  – reálná entalpie páry po expanzi v turbíně pro SFS

[kJ/kg] (Bod 5 v Obr. 3-2)

$h_{5s}$  – entalpie páry po izoentropické expanzi při emisním tlaku  
(při tlaku v kondenzátoru) pro SFS [kJ/kg] (Bod 5s v Obr. 3-2)

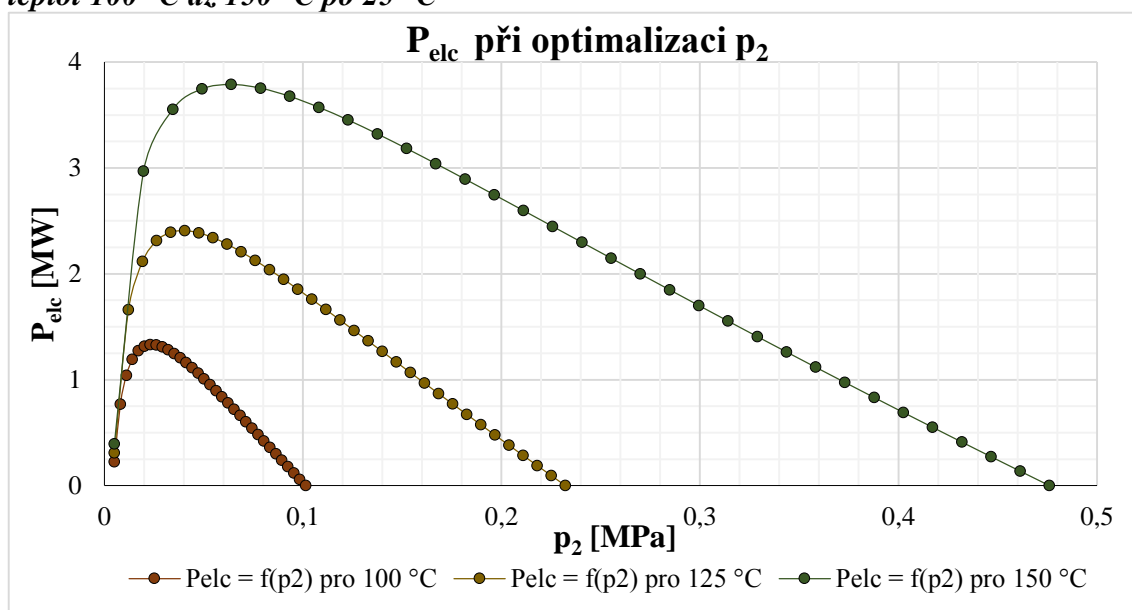
$$P_{elc} = m_4 \cdot (h_4 - h_{5s}) \cdot \eta_G \quad (8.5)$$

$P_{elc}$  – elektrický výkon z SFS [kW]

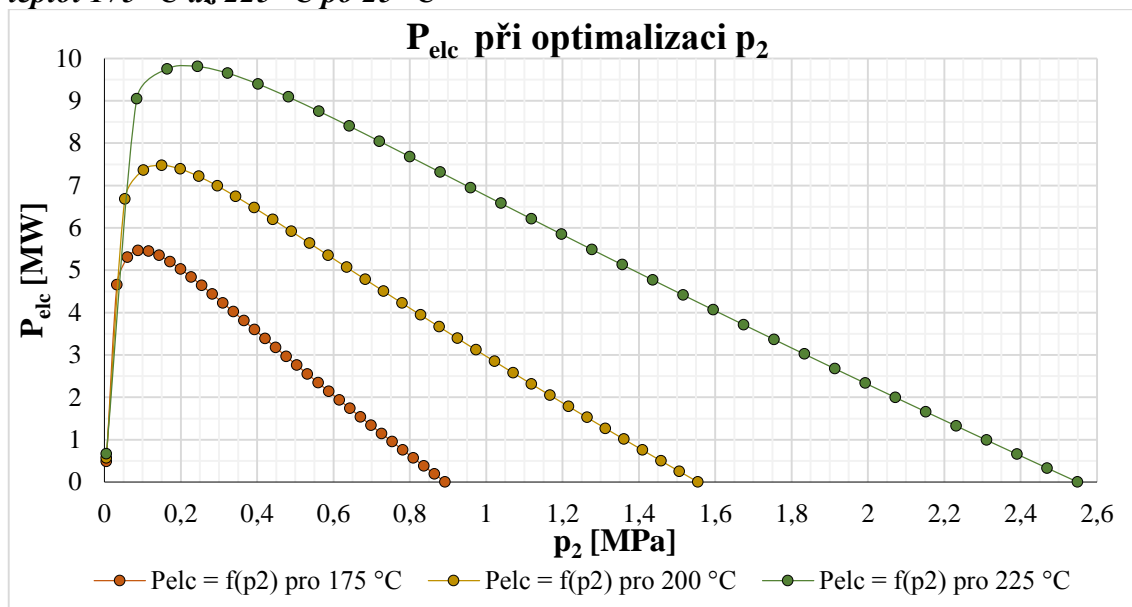
### 8.1.2 Optimalizace tlaku $p_2$

Grafy na Obr. 8-1, Obr. 8-2 a Obr. 8-3 zobrazují průběh elektrického výkonu při optimalizaci tlaku  $p_2$ . Tlak  $p_2$  můžeme označit za optimální, když elektrický výkon dosáhne svého maxima. Platí pro rozsah teplot 100 °C až 300 °C po 25 °C.

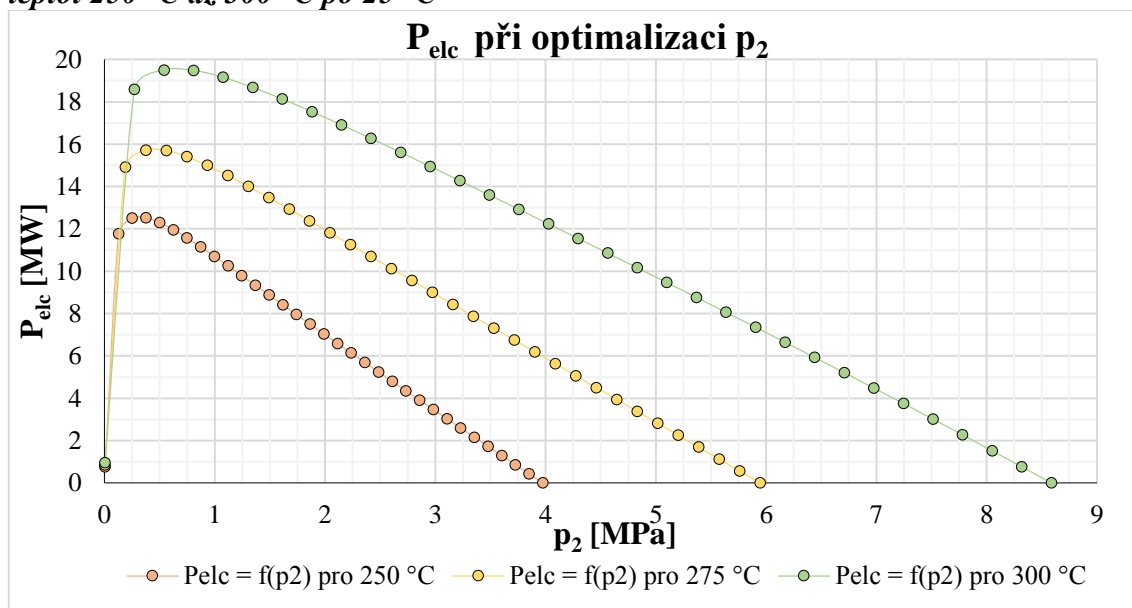
**Obr. 8-1 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 150 °C po 25 °C**



Obr. 8-2 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 175 °C až 225 °C po 25 °C



Obr. 8-3 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 250 °C až 300 °C po 25 °C



## 8.2 Double Flash steam power plant

Detailnější popis systému je uveden v podkapitole 3.2. Cílem je pomocí zjednodušeného bilančního výpočtu, ke kterému byly použity rovnice (8.6 až 8.15) a T – s diagram na Obr. 3-4, získat grafickou závislost maximálního elektrického výkonu na teplotách z rozsahu 100 °C až 300 °C po 25 °C, graf je uveden na Obr. 8-16 v podkapitole 8.8. Než byl získán maximální elektrický výkon pro danou teplotu, byla vždy provedena optimalizace tlaků  $p_2$  a  $p_6$ .

### 8.2.1 Přehled rovnic

$$h_1 = h_2 \quad (8.6)$$

$$h_3 = h_6 \quad (8.7)$$

$h_1$  – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny před separováním pro DFS [kJ/kg]

(Bod 1 v Obr. 3-4)

$h_2$  – entalpie mokré páry při tlaku v separátoru pro DFS [kJ/kg] (Bod 2 v Obr. 3-4)

$h_3$  – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny při tlaku v separátoru pro DFS [kJ/kg]

(Bod 3 v Obr. 3-4)

$h_6$  – entalpie mokré páry při tlaku ve flasheru pro DFS [kJ/kg] (Bod 6 v Obr. 3-4)

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} \quad (8.8)$$

$$x_6 = \frac{h_3 - h_7}{h_8 - h_7} \quad (8.9)$$

$x_2$  – suchost mokré páry pro DFS [%]

$x_6$  – suchost mokré páry pro DFS [%]

$h_4$  – entalpie páry na mezi sytosti páry při tlaku v separátoru pro DFS [kJ/kg]

(Bod 4 v Obr. 3-4)

$h_7$  – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny při tlaku ve flasheru pro DFS [kJ/kg]

(Bod 7 v Obr. 3-4)

$h_8$  – entalpie páry na mezi sytosti páry při tlaku ve flasheru pro DFS [kJ/kg]

(Bod 8 v Obr. 3-4)

$$\mathbf{m}_4 = m_{Total} \cdot x_2 \quad (8.10)$$

$$\mathbf{m}_8 = (1 - x_2) \cdot x_6 \cdot m_{Total} \quad (8.11)$$

$m_4$  – hmotnostní průtok páry expandující ve VT dílu turbíny pro DFS [kg/s]

$m_8$  – hmotnostní průtok páry expandující v NT dílu turbíny pro DFS [kg/s]

$m_{Total}$  – celkový hmotnostní průtok pro DFS [kg/s]

$$\mathbf{h}_5 = -\eta_T \cdot (h_4 - h_{5s}) + h_4 \quad (8.12)$$

$h_5$  – reálná entalpie páry po expanzi v turbíně při tlaku ve flasheru pro DFS [kJ/kg]

(Bod 5 v Obr. 3-4)

$h_{5s}$  – entalpie páry po izoentropické expanzi při tlaku ve flasheru pro DFS [kJ/kg]

(Bod 5s v Obr. 3-4)

$$\mathbf{h}_9 = \frac{x_2 \cdot h_5 + (1 - x_2) \cdot x_6 \cdot h_8}{x_2 + (1 - x_2) \cdot x_6} \quad (8.13)$$

$h_9$  – entalpie páry před expanzí při tlaku ve flasheru pro DFS [kJ/kg]

(Bod 9 v Obr. 3-4)

$$\mathbf{h}_{10} = -\eta_T \cdot (h_9 - h_{10s}) + h_9 \quad (8.14)$$

$h_{10}$  – reálná entalpie páry po expanzi v turbíně pro DFS

[kJ/kg] (Bod 10 v Obr. 3-4)

$h_{10s}$  – entalpie páry po izoentropické expanzi při emisním tlaku

(při tlaku v kondenzátoru) pro DFS [kJ/kg] (Bod 10s v Obr. 3-4)

$$\mathbf{P}_{elc} = [m_4 \cdot (h_4 - h_5) + m_8 \cdot (h_9 - h_{10})] \cdot \eta_G \quad (8.15)$$

$P_{elc}$  – elektrický výkon z DFS [kW]

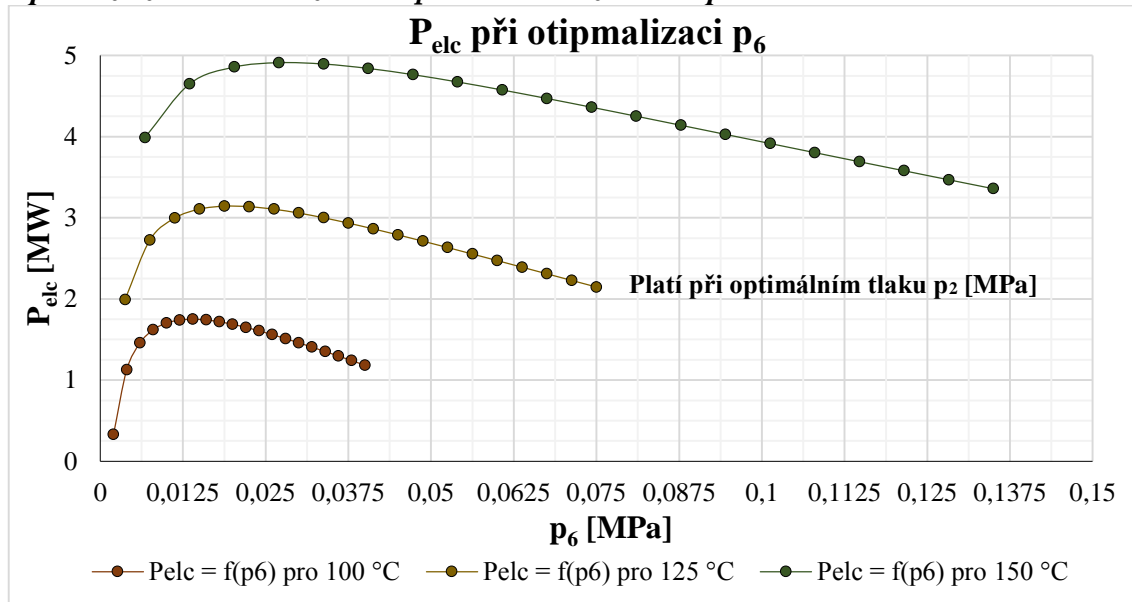
### 8.2.2 Optimalizace tlaků $p_2$ a $p_6$

Grafy na Obr. 8-4, Obr. 8-5 a Obr. 8-6 zobrazují průběh elektrického výkonu při optimalizaci tlaku  $p_6$  a při optimálním tlaku  $p_2$ . Zde byla provedena sousledná optimalizace tlaků  $p_2$  a  $p_6$ . Neplatí, že maximální elektrický výkon dostaneme při optimálním tlaku  $p_2$  a posléze optimalizací tlaku  $p_6$ . Optimalizace probíhala současně, jak pro tlak  $p_2$ , tak pro tlak  $p_6$ . Pro každou tlakovou hladinu  $p_2$  ( $p_1 > p_2 > p_6$ ) byla provedena optimalizace tlaku  $p_6$  ( $p_2 > p_6 > p_K$ ) a tyto kombinace jsou funkcí elektrického výkonu. Tlak  $p_6$  můžeme označit za optimální, když elektrický výkon

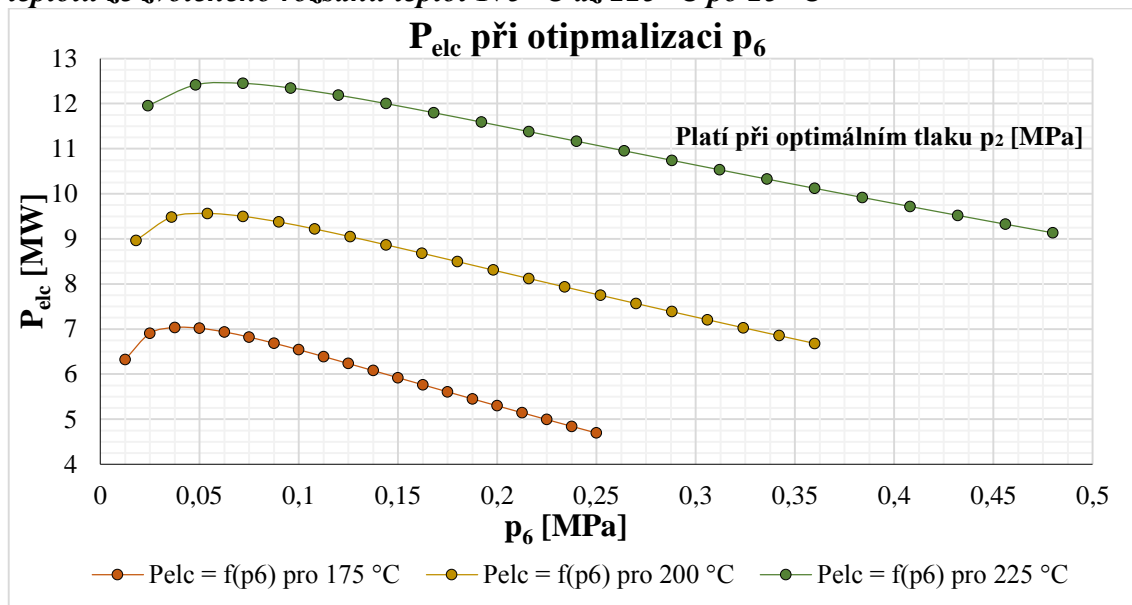


dosáhne svého maxima a zároveň platí, že tlak  $p_2$  je optimální. Platí pro rozsah teplot 100 °C až 300 °C po 25 °C.

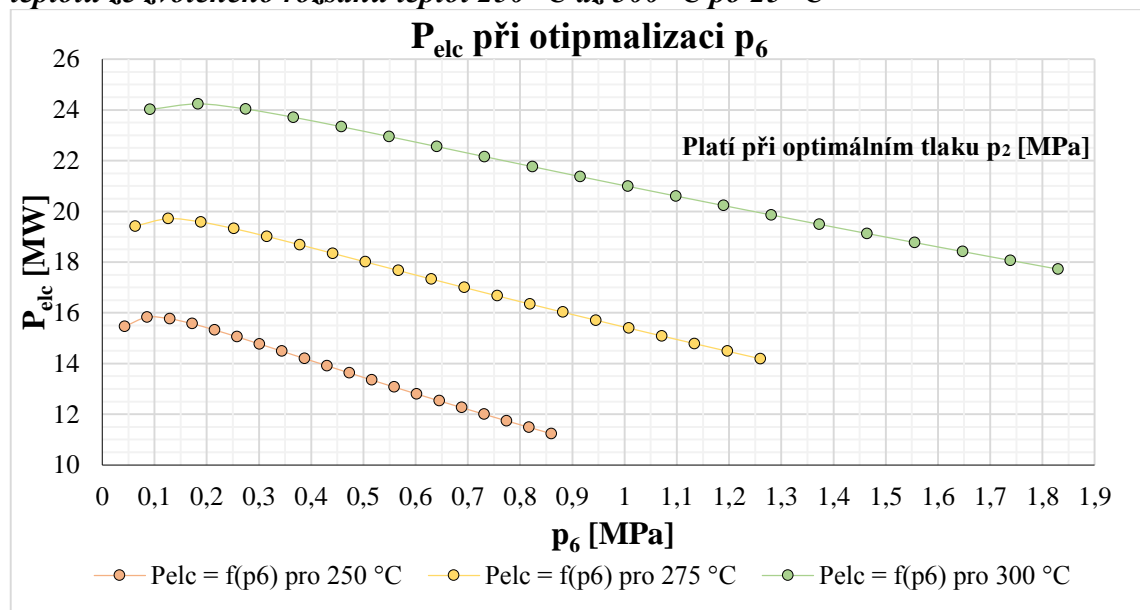
**Obr. 8-4 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_6$  a při optimálním tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 150 °C po 25 °C**



**Obr. 8-5 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_6$  a při optimálním tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 175 °C až 225 °C po 25 °C**



Obr. 8-6 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_6$  a při optimálním tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 250 °C až 300 °C po 25 °C



### 8.3 Binary cycle power plant – binární médium – voda

Detailnější popis systému je uveden a popsán v podkapitole 4.1. Cílem je pomocí zjednodušeného bilančního výpočtu, ke kterému byly použity rovnice (8.16 až 8.20) a  $p-h$  diagram a  $T-s$  diagram na Obr. 4-2, získat grafickou závislost maximálního elektrického výkonu na teplotách z rozsahu 100 °C až 300 °C po 25 °C, graf je uveden na Obr. 8-16 v podkapitole 8.8. Než byl získán maximální elektrický výkon pro danou teplotu, byla vždy provedena optimalizace tlaku  $p_{aB}$ . V tomto případě sekundární médium byla voda ( $H_2O$ ).

#### 8.3.1 Přehled rovnic

$$Q_A = m_{Total} \cdot (h_{Ain} - h_{Aout}) \quad (8.16)$$

$Q_A$  – tepelný výkon primárního média s uvažováním  $t_{PP} = 10$  °C pro BC [kW]

$m_{Total}$  – celkový hmotnostní průtok pro BC [kg/s]

$h_{Ain}$  – entalpie vody (vstupující kapalina do systému) primárního média na mezi sytosti kapaliny pro teploty ze zvoleného rozsahu teplot pro BC [kJ/kg]

$h_{Aout}$  – entalpie vody (vystupující kapalina ze systému) primárního média na mezi sytosti kapaliny při emisním tlaku (při tlaku v kondenzátoru) pro BC [kJ/kg]

$$h_{B2} = \frac{(h_{B2s} - h_{B1})}{\eta_{\dot{c}}} + h_{B1} \quad (8.17)$$

$h_{B2}$  – reálná entalpie kapaliny po stlačení v čerpadle pro různý admisní tlak pro BC [kJ/kg] (Bod 5 v Obr. 4-2)

$h_{B1}$  – entalpie syté kapaliny při emisním tlaku pro BC [kJ/kg] (Bod 4 v Obr. 4-2)

$h_{B2s}$  – entalpie kapaliny po izoentropickém stlačení v čerpadle pro různý admisní tlak pro BC [kJ/kg] (Bod 5s v Obr. 4-2)

$$m_B = \frac{Q_A}{h_{B3} - h_{B2}} \quad (8.18)$$

$m_B$  – hmotnostní průtok vzniklé páry, množství sekundárního média pro BC [kg/s]

$h_{B3}$  – entalpie na mezi sytosti páry pro různý admisní tlak nebo různou admisní teplotu pro BC [kJ/kg] (Bod 1 v Obr. 4-2)

$$h_{B4} = -\eta_T \cdot (h_{B3} - h_{B4s}) + h_{B3} \quad (8.19)$$

$h_{B4}$  – reálná entalpie páry po expanzi při emisním tlaku pro BC [kJ/kg]

(Bod 2 v Obr. 4-2)

$h_{B4s}$  – entalpie páry po izoentropické expanzi při emisním tlaku pro BC [kJ/kg]

(Bod 2s v Obr. 4-2)

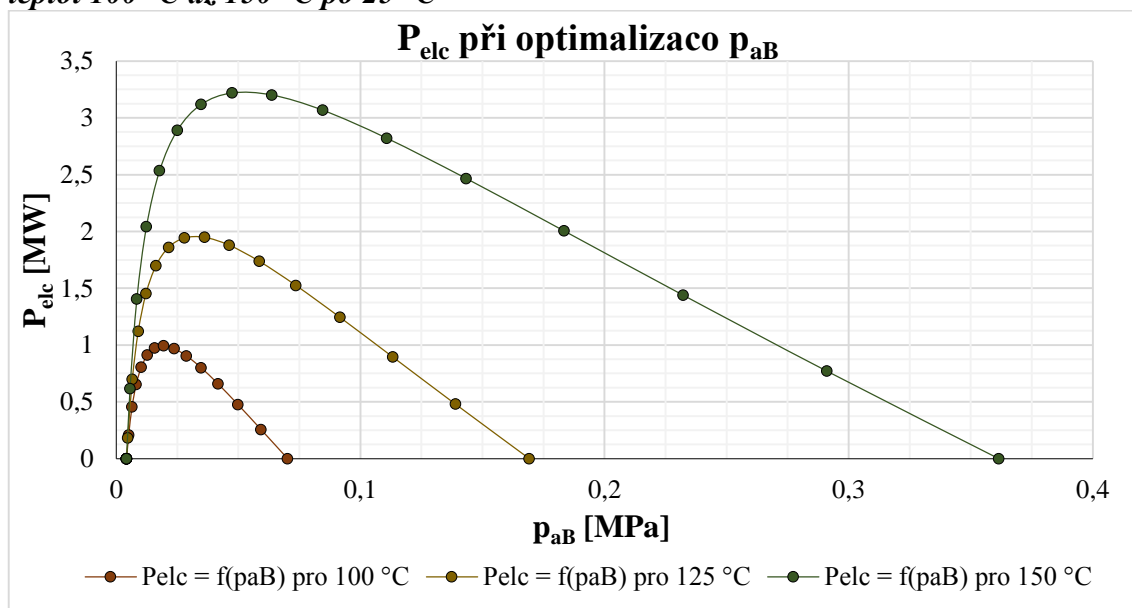
$$P_{elc} = m_B \cdot \eta_G \cdot (h_{B3} - h_{B4}) \quad (8.20)$$

$P_{elc}$  – elektrický výkon z BC [kW]

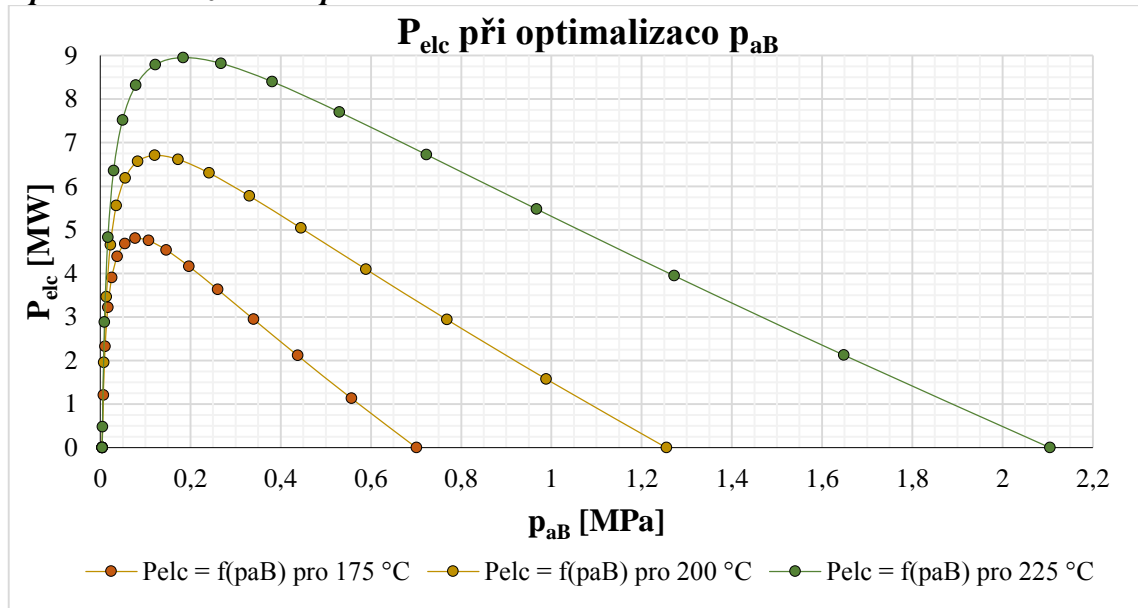
### 8.3.2 Optimalizace tlaku $p_{aB}$

Grafy na Obr. 8-7, Obr. 8-8 a Obr. 8-9 zobrazují průběh elektrického výkonu při optimalizaci tlaku  $p_{aB}$ . Tlak  $p_{aB}$  můžeme označit za optimální, když elektrický výkon dosáhne svého maxima. Platí pro rozsah teplot 100 °C až 300 °C po 25 °C.

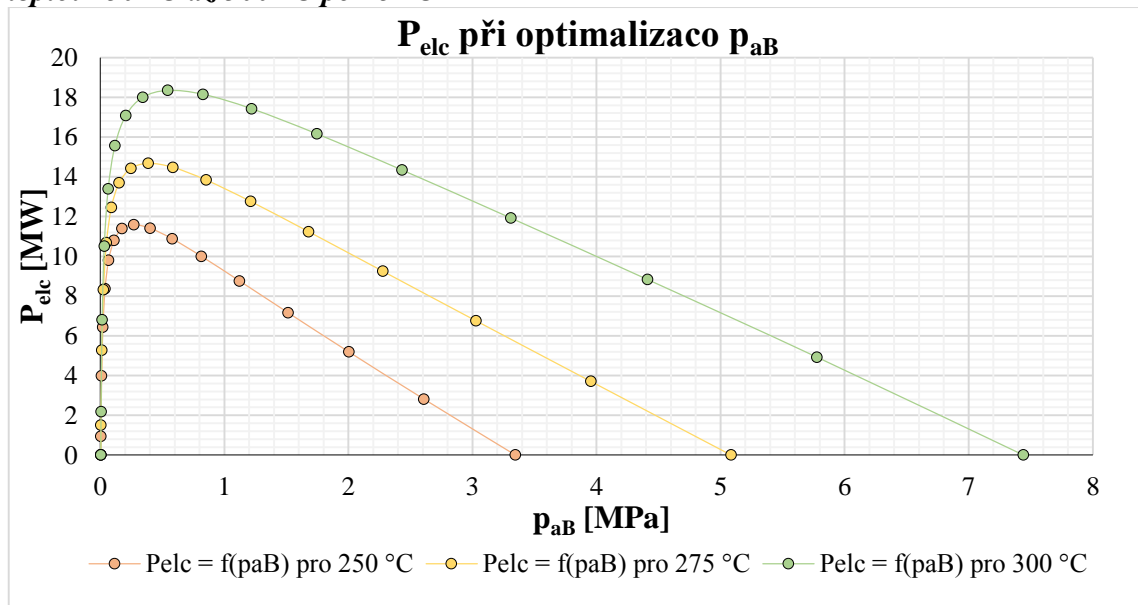
**Obr. 8-7 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 150 °C po 25 °C**



**Obr. 8-8 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 175 °C až 225 °C po 25 °C**



**Obr. 8-9 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 250 °C až 300 °C po 25 °C**



### 8.4 Binary cycle power plant – binární médium – butan

Zde jsem provedl zjednodušený výpočet, který se shoduje postupem výpočtu a i cílem jako v podkapitole 8.3, ale rozsah teplot je jenom 100 °C až 175 °C po 25 °C. V tomto případě byl sekundárním médiem butan ( $C_4H_{10}$ ).

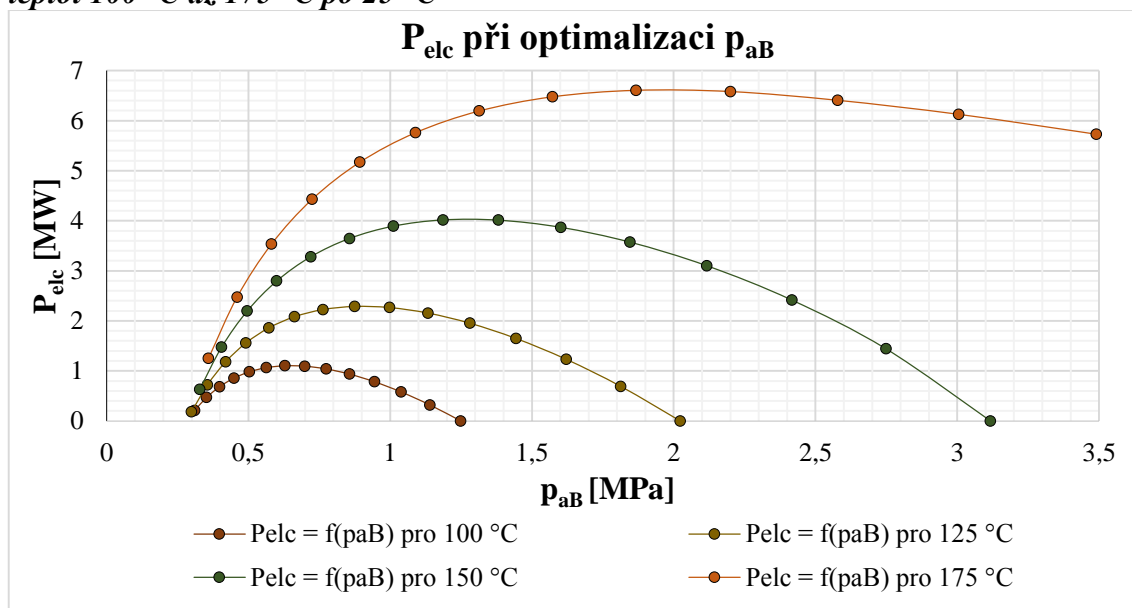
#### 8.4.1 Optimalizace tlaku $p_{aB}$

Graf na Obr. 8-10 zobrazuje průběh elektrického výkonu při optimalizaci tlaku  $p_{aB}$ .

Tlak  $p_{aB}$  můžeme označit za optimální, když elektrický výkon dosáhne svého maxima.

Platí pro rozsah teplot 100 °C až 175 °C po 25 °C.

**Obr. 8-10 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 175 °C po 25 °C**



### 8.5 Binary cycle power plant – binární médium – pentan

Zde jsem též provedl zjednodušený výpočet, který se shoduje postupem výpočtu a i cílem jako v podkapitole 8.3, ale rozsah teplot je jenom 100 °C až 200 °C po 25 °C.

V tomto případě byl sekundárním médiem pentan ( $C_5H_{12}$ ).

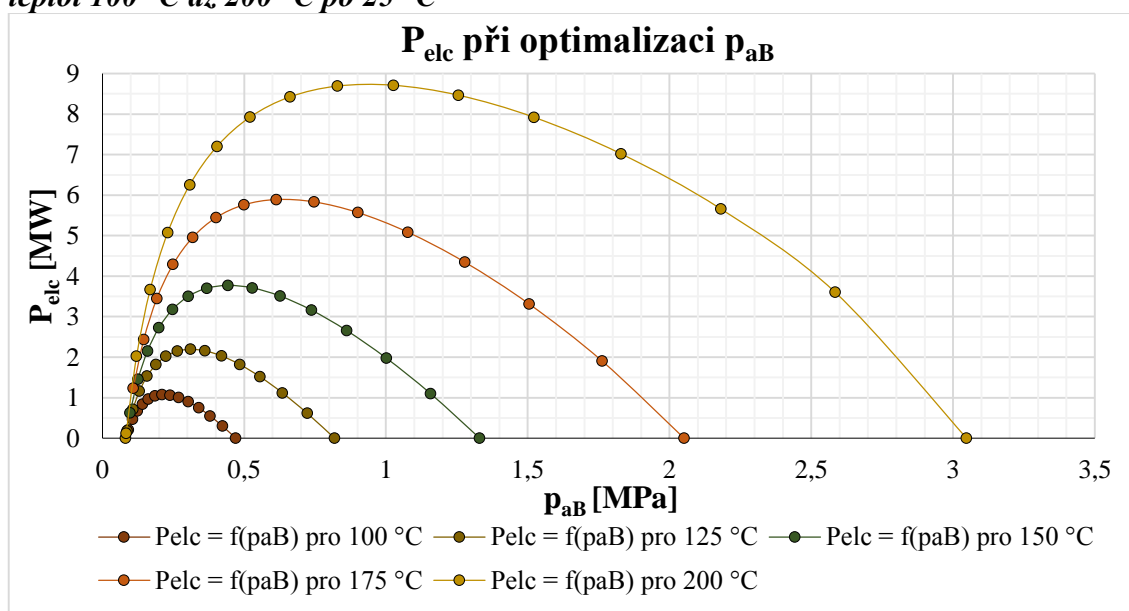
#### 8.5.1 Optimalizace tlaku $p_{aB}$

Graf na Obr. 8-11 zobrazuje průběh elektrického výkonu při optimalizaci tlaku  $p_{aB}$ .

Tlak  $p_{aB}$  můžeme označit za optimální, když elektrický výkon dosáhne svého maxima.

Platí pro rozsah teplot 100 °C až 200 °C po 25 °C.

**Obr. 8-11 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 200 °C po 25 °C**



## 8.6 Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant – binární médium – butan

Detailnější popis systému je uveden a popsán v podkapitole 5.1. Cílem je pomocí zjednodušeného bilančního výpočtu, ke kterému byly použity rovnice (8.21 až 8.32) a T – s diagram na Obr. 5-2, získat grafickou závislost maximálního elektrického výkonu na teplotách z rozsahu 100 °C až 175 °C po 25 °C, graf je uveden na Obr. 8-16 v podkapitole 8.8. Než byl získán maximální elektrický výkon pro danou teplotu, byla vždy provedena optimalizace tlaku  $p_2$  a  $p_{aB}$ . V tomto případě sekundární médium byl butan ( $C_4H_{10}$ ).

### 8.6.1 Přehled rovnic

$$h_1 = h_2 \quad (8.21)$$

$h_1$  – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny před separováním pro SFS [kJ/kg]

(Bod 1 v Obr. 5-2)

$h_2$  – entalpie mokré páry při tlaku v separátoru pro SFS [kJ/kg] (Bod 2 v Obr. 5-2)

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} \quad (8.22)$$

$x_2$  – suchost mokré páry pro SFS [%]

$h_3$  – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny při tlaku v separátoru pro SFS [kJ/kg]

(Bod 3 v Obr. 5-2)

$h_4$  – entalpie páry na mezi sytosti páry při tlaku v separátoru pro SFS [kJ/kg]

(Bod 4 v Obr. 5-2)

$$m_4 = m_{Total} \cdot x_2 \quad (8.23)$$

$m_4$  – hmotnostní průtok expandující v turbíně pro SFS [kg/s]

$m_{Total}$  – celkový hmotnostní průtok pro SFS [kg/s]

$$h_5 = -\eta_T \cdot (h_4 - h_{5s}) + h_4 \quad (8.24)$$

$h_5$  – reálná entalpie páry po expanzi v turbíně pro SFS [kJ/kg] (Bod 5 v Obr. 5-2)

$h_{5s}$  – entalpie páry po izoentropické expanzi při emisním tlaku (při tlaku v kondenzátoru) pro SFS [kJ/kg] (Bod 5s v Obr. 5-2)



$$P_{elc\ SFS} = m_4 \cdot (h_4 - h_5) \cdot \eta_G \quad (8.25)$$

$P_{elc}$  – elektrický výkon z SFS [kW]

$$m_A = m_{Total} - m_4 \quad (8.26)$$

$m_A$  – hmotnostní průtok zbylé horké vody po separaci v separátoru pro SFS, jinak nevyužité médium [kg/s]

$$Q_A = m_A \cdot (h_3 - h_6) \quad (8.27)$$

$Q_A$  – tepelný výkon primárního média s uvažováním  $t_{PP} = 10$  °C pro BC [kW]

$h_6$  – entalpie vody (vystupující kapalina ze systému) na mezi sytosti kapaliny při emisním tlaku (při tlaku v kondenzátoru) pro BC [kJ/kg]

$$h_{B2} = \frac{(h_{B2s} - h_{B1})}{\eta_{\zeta}} + h_{B1} \quad (8.28)$$

$h_{B2}$  – reálná entalpie kapaliny po stlačení v čerpadle pro různý admisní tlak pro BC [kJ/kg] (Bod e' v Obr. 5-2)

$h_{B1}$  – entalpie kapaliny na mezi sytosti kapaliny při emisním tlaku BC [kJ/kg] (Bod d v Obr. 5-2)

$h_{B2s}$  – entalpie kapaliny po izoentropickém stlačení v čerpadle pro různý admisní tlak pro BC [kJ/kg] (Bod e v Obr. 5-2)

$$m_B = \frac{Q_A}{h_{B3} - h_{B2}} \quad (8.29)$$

$m_B$  – hmotnostní průtok páry pro BC [kg/s]

$h_{B3}$  – entalpie páry na mezi sytosti páry při admisním tlaku BC [kJ/kg] (Bod a v Obr. 5-2)

$$h_{B4} = -\eta_T \cdot (h_{B3} - h_{B4s}) + h_{B3} \quad (8.30)$$

$h_{B4}$  – reálná entalpie páry po expanzi v turbíně [kJ/kg] (Bod b' v Obr. 5-2)

$h_{B4s}$  – entalpie páry po izoentropické expanzi při emisním tlaku BC [kJ/kg] (Bod b v Obr. 5-2)

$$P_{elc\ BC} = m_B \cdot \eta_G \cdot (h_{B3} - h_{B4}) \quad (8.31)$$

$P_{elc\ BC}$  – elektrický výkon z BC [kW]

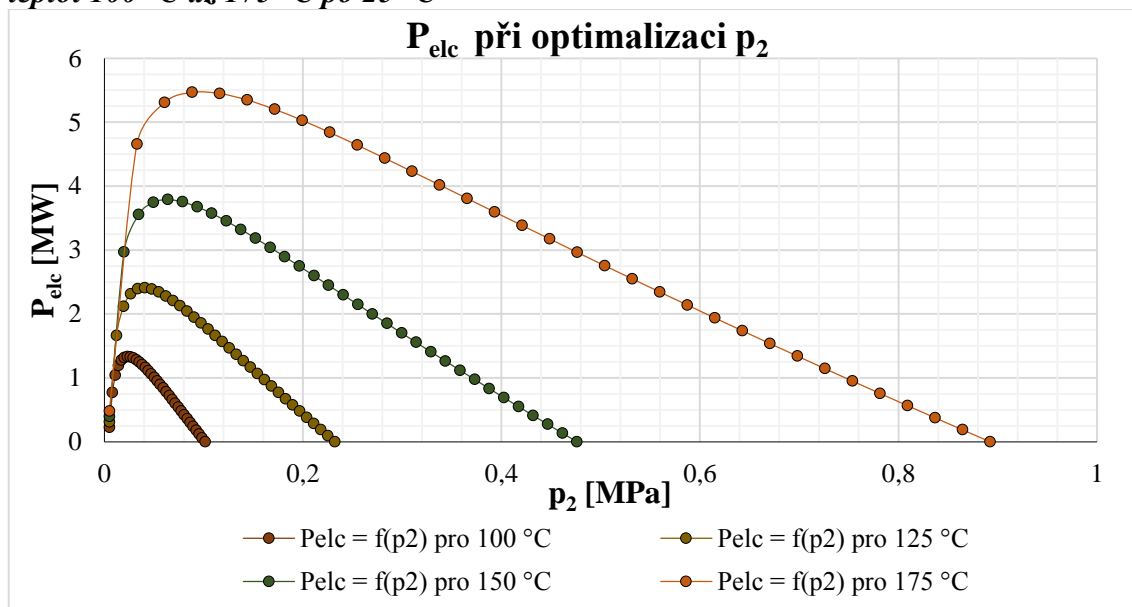
$$P_{elc} = P_{elc\ SFS} + P_{elc\ BC} \quad (8.32)$$

$P_{elc}$  – celkový elektrický výkon z kombinace systému SFS a BC = systém CSFS&BC [kW]

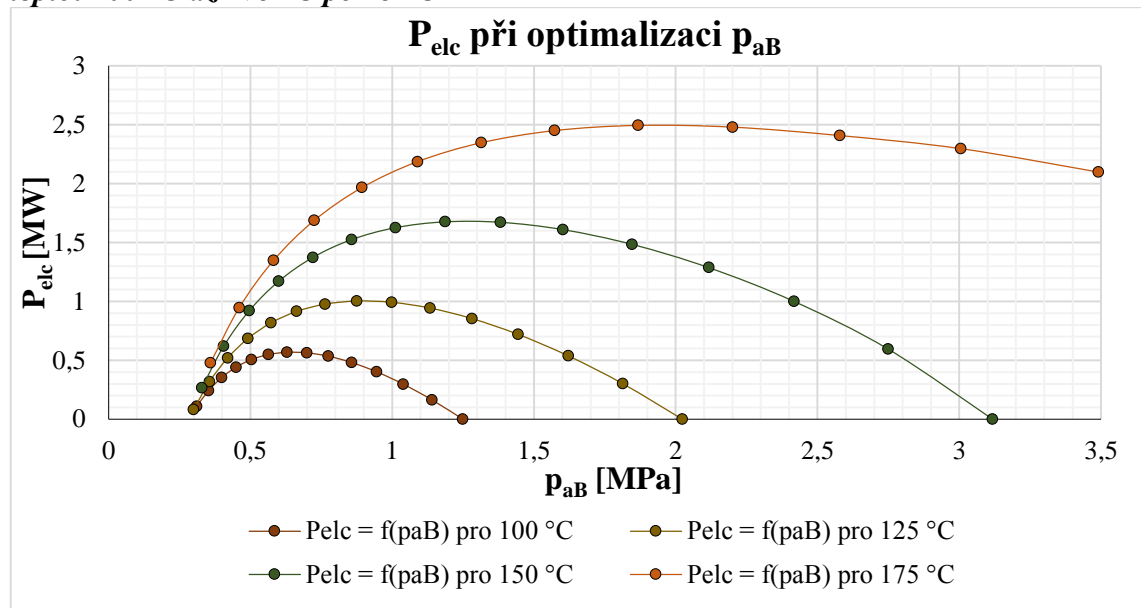
### 8.6.2 Optimalizace tlaku $p_2$ a $p_{aB}$

Grafy na Obr. 8-12 a Obr. 8-13 zobrazují průběh elektrického výkonu při optimalizaci tlaku  $p_2$  a  $p_{aB}$ . Tlak  $p_2$  můžeme označit za optimální, když elektrický výkon dosáhne svého maxima. Nejdříve byla provedena optimalizace pro tlak  $p_2$ . Zbylé primární médium po separaci, které by se vracelo pod zem, proudilo do tepelného výměníku, kde předalo svůj potenciál sekundárnímu médiu. Pro sekundární médium byla dále provedena optimalizace tlaku  $p_{aB}$ . Tlak  $p_{aB}$  je optimální, když elektrický výkon dosáhne svého maxima. Platí pro rozsah teplot 100 °C až 175 °C po 25 °C.

**Obr. 8-12 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 175 °C po 25 °C**



Obr. 8-13 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 175 °C po 25 °C



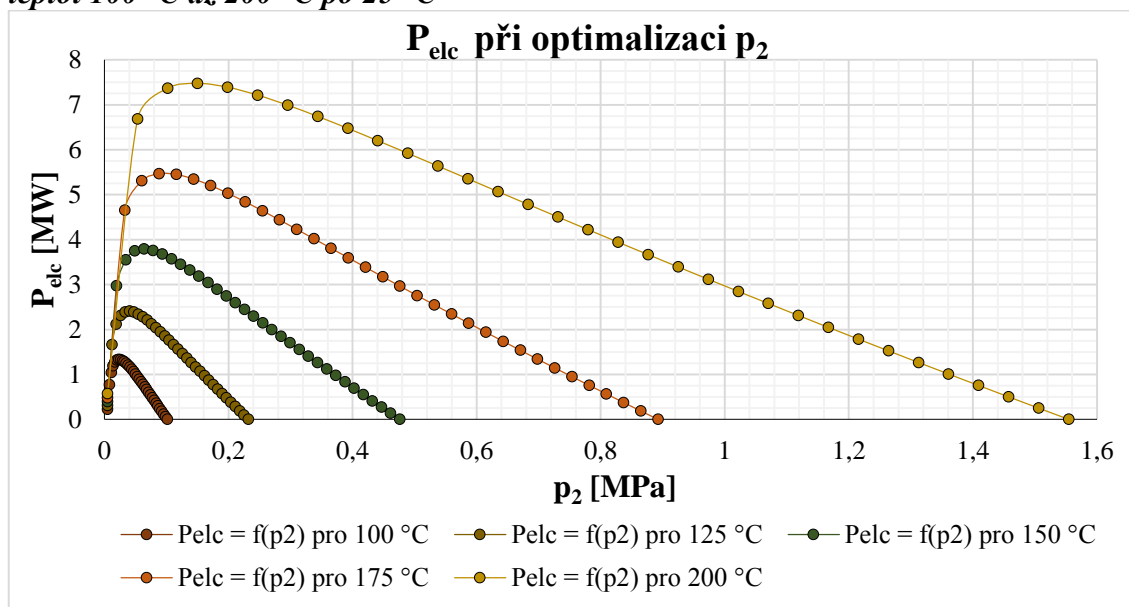
### 8.7 Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant – binární médium – pentan

Zde jsem též provedl zjednodušený výpočet, který se shoduje zadáním, postupem výpočtu a i cílem jako v podkapitole 8.6, ale rozsah teplot je 100 °C až 200 °C po 25 °C. V tomto případě byl sekundárním médiem pentan (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>).

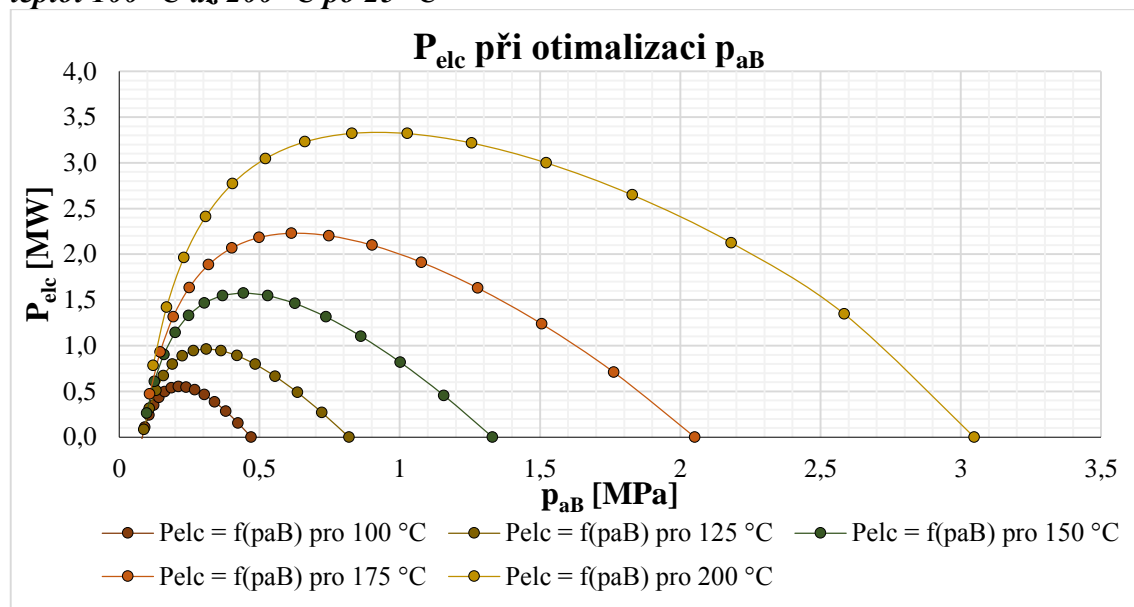
#### 8.7.1 Optimalizace tlaku $p_2$ a $p_{aB}$

Grafy na Obr. 8-14 a Obr. 8-15 zobrazují průběh elektrického výkonu při optimalizaci tlaku  $p_2$  a  $p_{aB}$ . Tlak  $p_2$  můžeme označit za optimální, když elektrický výkon dosáhne svého maxima. Tlak  $p_{aB}$  je optimální, když elektrický výkon dosáhne svého maxima. Platí pro rozsah teplot 100 °C až 200 °C po 25 °C.

**Obr. 8-14 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_2$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 200 °C po 25 °C**



Obr. 8-15 – Elektrický výkon v závislosti na tlaku  $p_{aB}$  pro teplotu ze zvoleného rozsahu teplot 100 °C až 200 °C po 25 °C



### 8.8 Grafické porovnání jednotlivých geotermálních systémů

V této části je uveden graf na Obr. 8-16, kde jsou porovnány studované systémy:

Single Flash steam power plant – SFS – Voda – Podkapitola: 8.1,

Double Flash steam power plant – DFS – Voda – Podkapitola: 8.2,

Binary cycle power plant – BC – Voda – Podkapitola: 8.3,

Binary cycle power plant – BC – Butan – Podkapitola: 8.4,

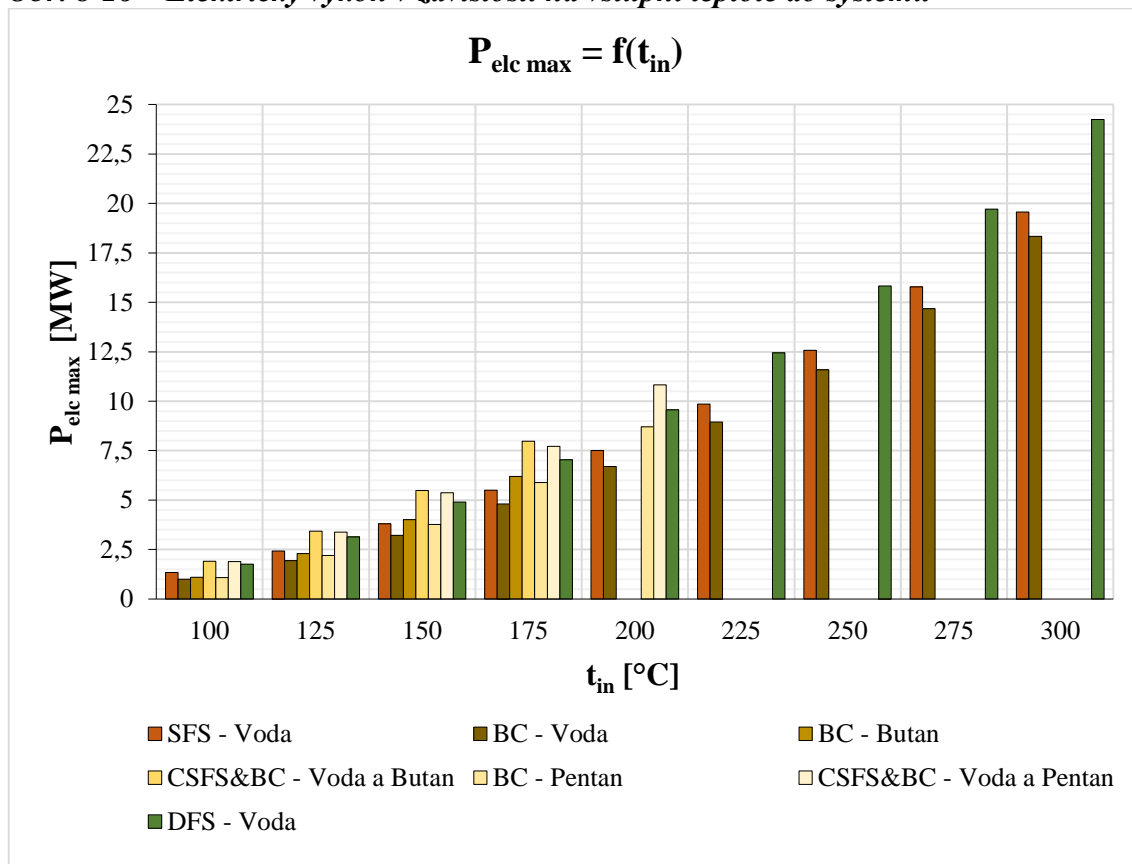
Binary cycle power plant – BC – Pentan – Podkapitola: 8.5,

Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant – CSFS&BC – Voda a Butan – Podkapitola: 8.6,

Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant – CSFS&BC – Voda a Pentan – Podkapitola: 8.7.

Graf na Obr. 8-16 nám zobrazuje maximální elektrický výkon pro daný geotermální systém v závislosti na vstupní teplotě z rozsahu 100 °C až 300 °C po 25 °C. Jednotlivé elektrické výkony pro daný systém a zvolenou teplotu byly získány zjednodušeným bilančním výpočtem, který je popsán pro konkrétní systém v kapitole 8.

**Obr. 8-16 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému**



## 9. Problematika nekondenzovatelných plynů

V této kapitole je popsána problematika nekondenzovatelných plynů (NCGs) pro systémy FS.

Mezi NCGs řadíme tyto plyny: oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoniak ( $\text{NH}_3$ ), dusík ( $\text{N}_2$ ) a metan ( $\text{CH}_4$ ).

Hmotnostní podíl nekondenzovatelných plynů může být v rozsahu 0 % až 25 % (záleží na dané lokalitě).

Praktické problémy spojené se zvýšeným hmotnostním podílem nekondenzovatelných plynů:

- : pára s obsahem NCGs má nižší realizovatelnou energii, než pára z technologicky upravené vody,
- : NCGs se shromažďují v kondenzátoru, to má za následek zvýšení teploty a tlaku v kondenzátoru,
- : NCGs snižují účinnost přenosu tepla v kondenzátoru,
- : plyny, jako jsou oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) a sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ ) zvyšují riziko vzniku koroze v potrubí a v zařízeních, se kterými se dostává pára a kondenzát do kontaktu.

NCGs je proto nutné odstraňovat, dají se použít různé typy způsoby (technologie) odstraňování. Vždy záleží na hmotnostního obsahu NCGs, protože jednotlivé typy způsobů (technologií) odstraňování mají různě velkou energetickou náročnost.

V podkapitolách 9.1, 9.2, 9.3 a 9.4 jsou uvedeny základní způsoby (technologie) odstraňování NCGs. [18]

### 9.1 Parní ejektory – SJES

Jedná se o velice jednoduchou technologii, která je snadno regulovatelná. Má nízké pořizovací náklady. Vyžaduje minimální údržbu, ale s rostoucím obsahem NCGs je nevýhodná, protože při velkém obsahu NCGs je potřeba odsávat velké množství páry a to má nežádoucí dopad na celkový elektrický výkon. Proto se nasazuje od 0 % do 2 % hmotnostního podílu NCGs. Pokles výkonu při 1 % hmotnostního podílu NCGs je o 2,7 %. [18]

### 9.2 Vodokružné vývěvy – LRVP

Jedná se o technologii s objemovým čerpadlem. Vodokružné vývěvy mají poměrně vysokou účinnost odsátí NCGs oproti parním ejektorům, ale nevýhodou jsou vysoké investiční náklady. Používají se pro aplikace s nízkým průtokem. Nasazují se od 10 %

do 25 % hmotnostního podílu NCGs. Pokles výkonu při 1 % hmotnostního podílu NCGs je o 0,4 %. Parametry nasazení se shodují s odstředivými kompresory. [18]

### 9.3 Odstředivé kompresory – CS

Tyto technologie se nasazují při nejvyšší koncentraci NCGs, protože jsou nejúčinnější z dostupných technologií, ale bohužel mají vysoké investiční náklady a drahou údržbu. Další nevýhodou je, že komprese je energetická náročná, vyžaduje až 20 % z vyrobeného elektrického výkonu. Jsou účinnější než vodokružné vývěvy (až o 30 %) a několikanásobně účinnější než parní ejektory (až o 250 %). Nasazují se od 10 % do 25 % hmotnostního podílu NCGs. Pokles výkonu při 1 % hmotnostního podílu NCGs je o 0,4 %. Parametry nasazení se shodují s vodokružnými vývěvami. [18]

### 9.4 Hybridní systémy – HS

Jedná se o technologie složené kombinací parní ejektor a vodokružná vývěva nebo kombinací parní ejektor a odstředivý kompresor. Každá kombinace slučuje výhody a odstraňuje nevýhody pro jednotlivou technologii. Nasazují se od 2 % do 10 % hmotnostního podílu NCGs. Pokles výkonu při 1 % hmotnostního podílu NCGs je o 2,2 %. [18]

### 9.5 Shrnutí způsobů (technologií) odstraňování NCGs

Zde je uvedena tabulka se způsoby (technologemi) odstraňování NCGs podle koeficientů C a X.

**Tab. 9-1 – Způsoby (technologie) odstraňování NCGs podle koeficientů C a X [18]**

Technologie	C	X
<b>SJES</b>	0 % až 2 %	2,7 %
<b>LRVP</b>	10 % až 25 %	0,4 %
<b>CS</b>	10 % až 25 %	0,4 %
<b>HS</b>	2 % až 10 %	2,2 %

*X – koeficient vyjadřující pokles elektrického výkonu v procentech při 1 % hmotnostního podílu NCGs [%]*

*C – koeficient vyjadřující hmotnostní podíl nekondenzující plynů v plynném (parním) médiu [%]*



## 10. Grafické porovnání

V této části jsou uvedeny grafy, které byly získány pomocí zjednodušených bilančních výpočtů, jako v kapitole 8.

Dále do výpočtů byla zahrnuta problematika NCGs pro systémy FS, která je popsána v kapitole 9.

Grafy na Obr. 10.1, Obr. 10.2, Obr. 10.3 a Obr. 10.4 zobrazují porovnání studovaných systémů:

Single Flash steam power plant – SFS – Voda – teoreticky bez NCGs, SJES, HS, CS s 1 %, 6 %, 17,5 % NCGs,

Double Flash steam power plant – DFS – Voda – teoreticky bez NCGs, SJES, HS, CS s 1 %, 6 %, 17,5 % NCGs,

Binary cycle power plant – BC – Voda,

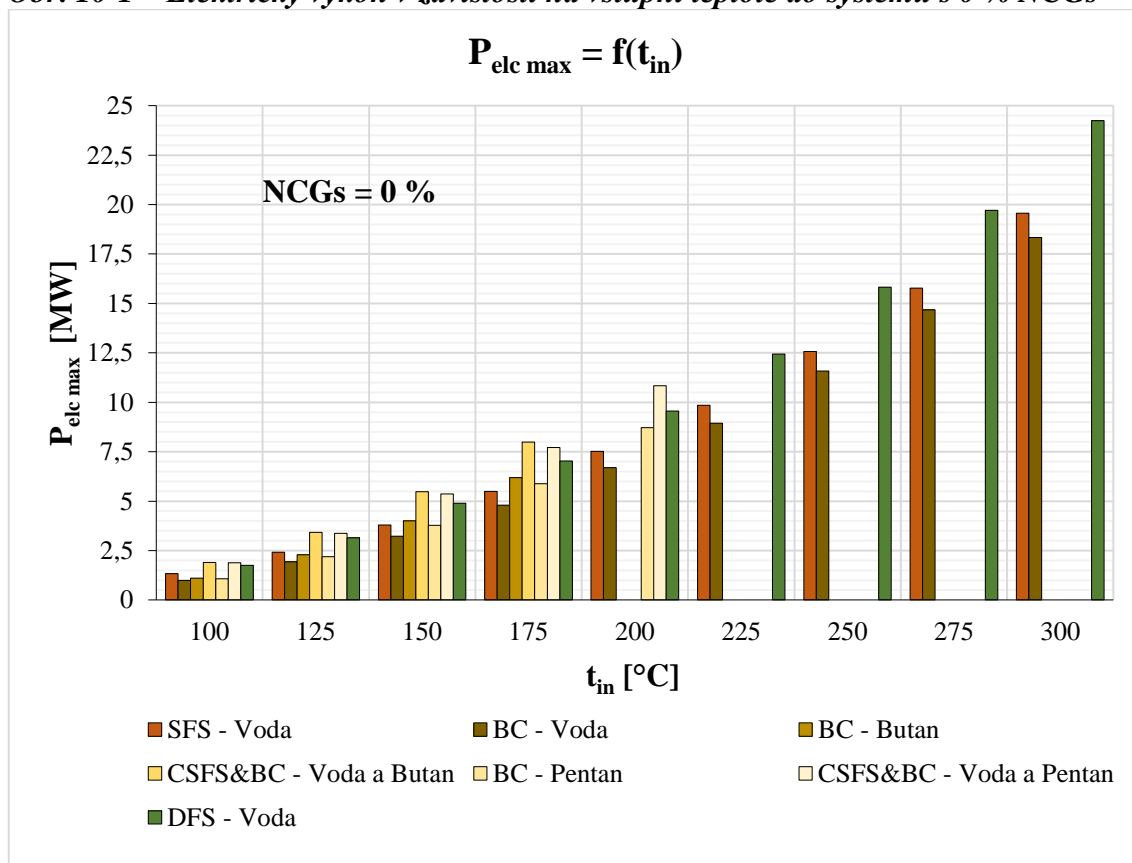
Binary cycle power plant – BC – Butan,

Binary cycle power plant – BC – Pentan,

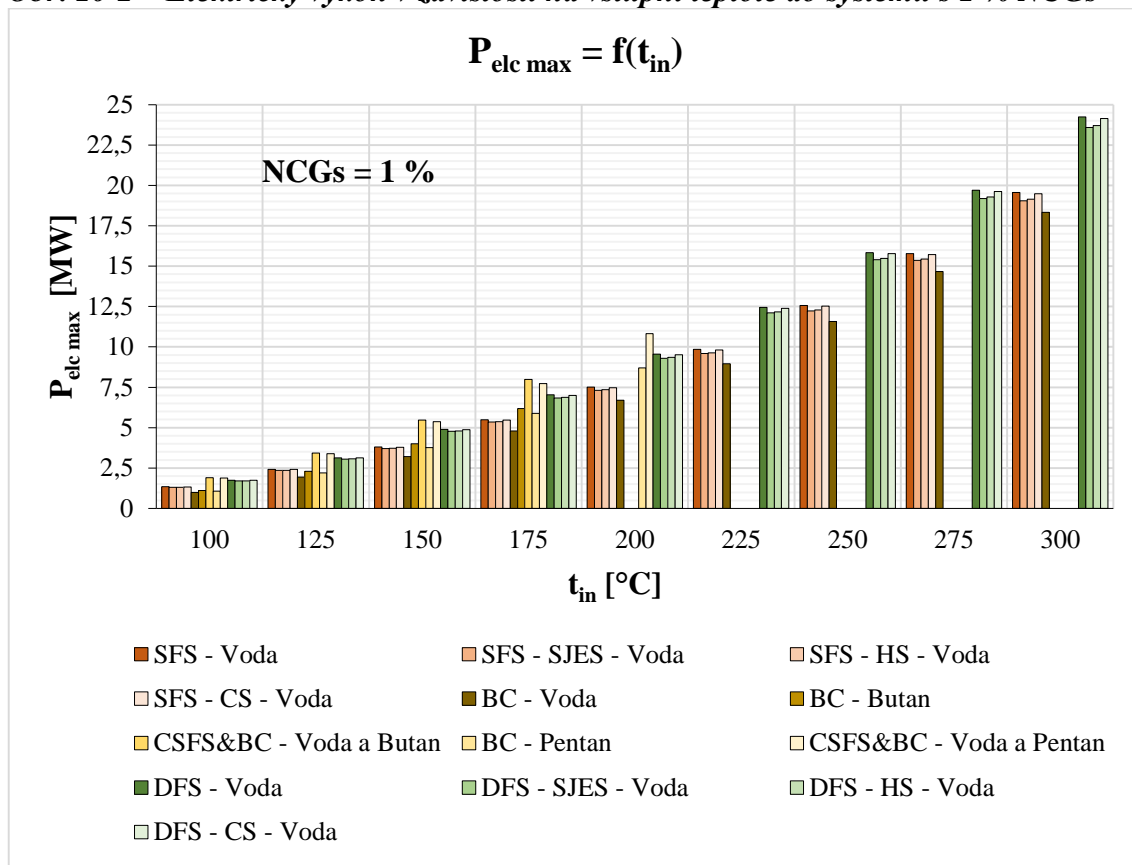
Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant – CSFS&BC – Voda a Butan,

Combined Single Flash steam and Binary cycle power plant – CSFS&BC – Voda a Pentan.

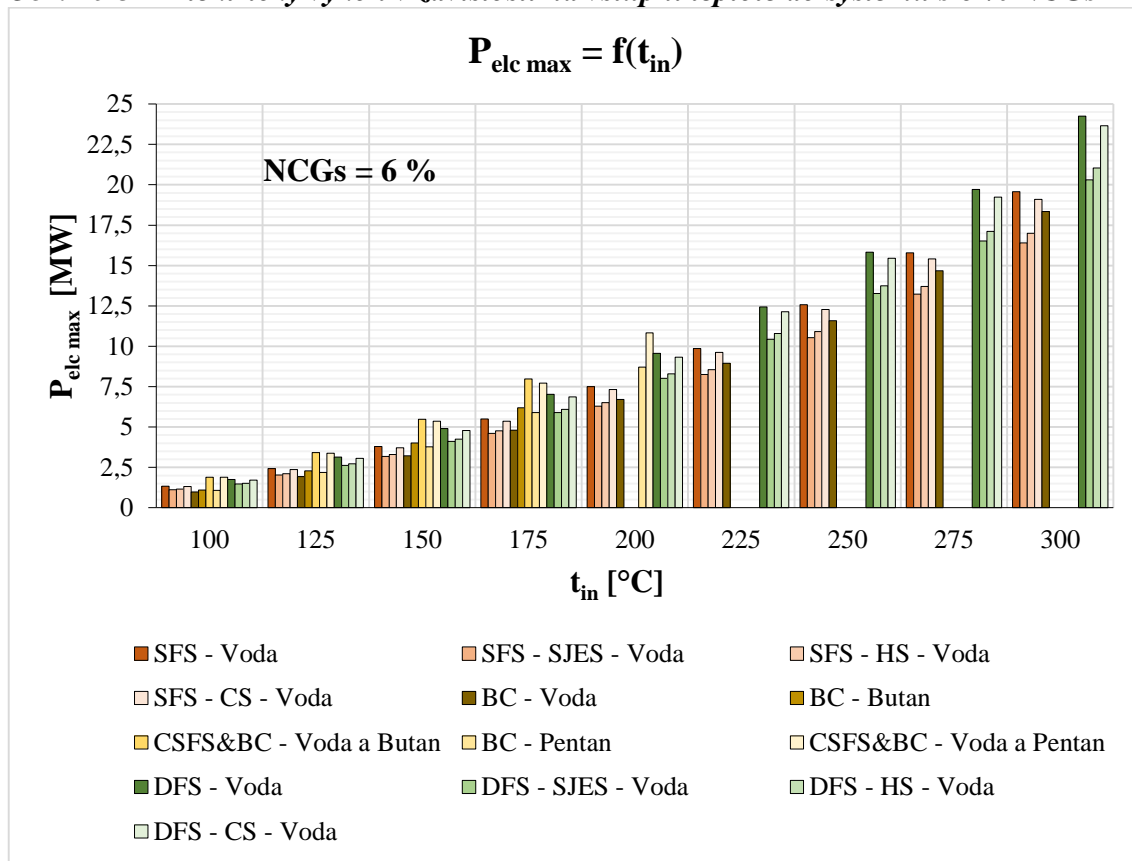
**Obr. 10-1 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému s 0 % NCGs**



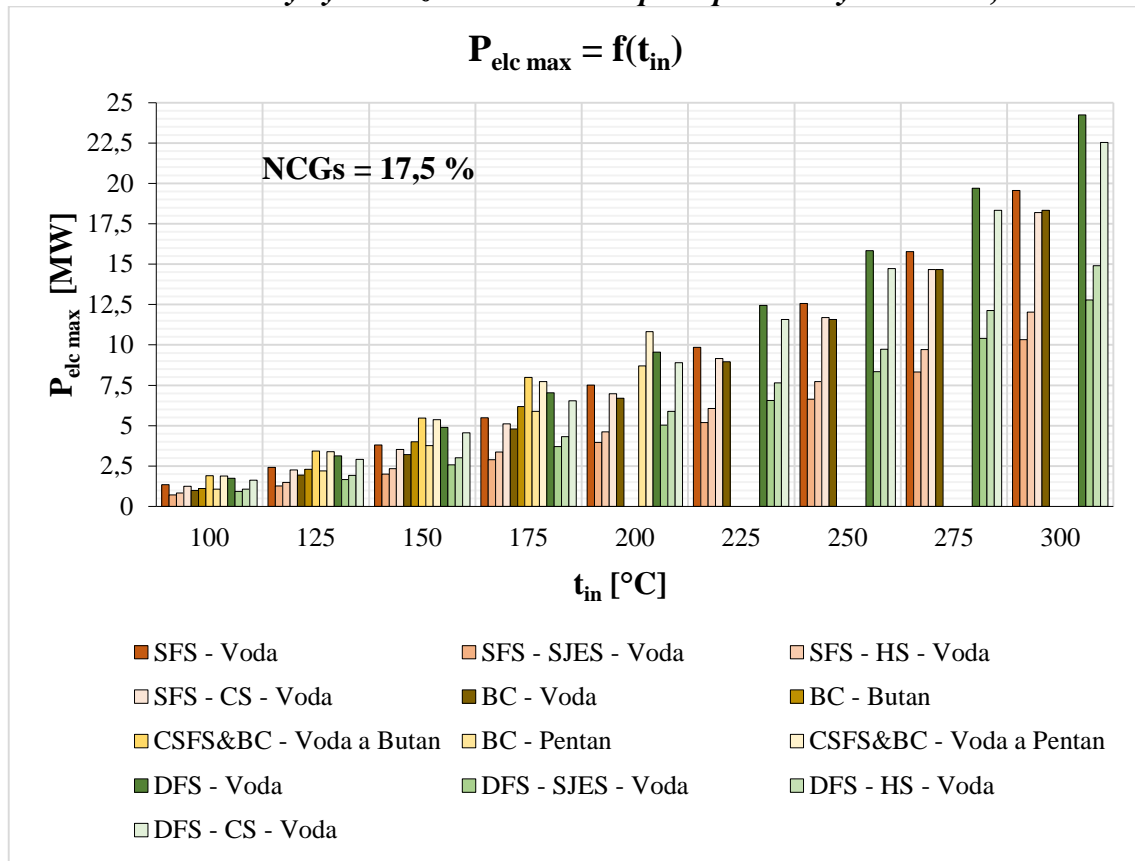
Obr. 10-2 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému s 1 % NCGs



Obr. 10-3 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému s 6 % NCGs



Obr. 10-4 – Elektrický výkon v závislosti na vstupní teplotě do systému s 17,5 % NCGs



### 10. 1 Vysvětlení ke grafům na Obr. 10.1, Obr. 10.2, Obr. 10.3 a Obr. 10.4

Každý graf na Obr. 10.1, Obr. 10.2, Obr. 10.3 a Obr. 10.4 zobrazuje jednotlivé geotermální systémy z hlediska maximálního dosažitelného elektrického výkonu v závislosti na teplotě horké vody z vrtu, určitou hladinu hmotnostního podílu NCGs a 3 způsoby odstraňování NCGs pro systémy FS.

Hmotnostní podíly NCGs jsou zvoleny ve čtyřech hladinách (teoreticky bez NCGs = 0 % NCGs a s hladinami 1 % NCGs, 6 % NCGs a 17,5 % NCGs).

Dále byly zvoleny 3 způsoby odstraňování NCGs pro systémy FS (SJES, HS, CS).

## Závěr

V této bakalářské práci, jsem se zaměřil na problematiku geotermální energie pro výrobu elektřiny.

V úvodu jsem se zabýval rozdělením geotermálních elektráren ve světě, jejich současným i plánovaným stavem a výstavbou. Okrajově jsem zmínil výhody i nevýhody geotermální energetiky.

Posléze jsem zjednodušeně popsal základní principy vybraných systémů pro výrobu elektřiny z geotermálních zdrojů.

Hlavním cílem této práce bylo se podrobně seznámit se systémy FS a jeho modifikacemi SFS a DFS popřípadě TFS, dále se systémem BC a složeným systémem CSFS&BC. O vybraných systémech jsem se dozvěděl detailní princip, modifikace, výhody, nevýhody, možnosti, ekologické aspekty a realizaci.

Dále jsem ke každému ze systémů vypracoval přehled vybraných geotermálních elektráren na světě, kde jsem uvedl, o jaký systém se jedná a základní parametry elektrárny jako jsou název, lokalita, rok spuštění, teplota horké vody z vrtu, průtok horké vody z vrtu, výkon, roční produkce a cena. Dále jsem se k vybraným elektrárnám snažil získat základní parametry turbíny a generátoru.

V další části práce jsem uvedl porovnání jednotlivých systémů z hlediska nasazení dle teploty horké vody z vrtu, které je popsáno v podkapitole 6.1. Dále jsem porovnal systémy mezi sebou dle jejich výhodnosti a nevýhodnosti, toto porovnání je uvedeno v podkapitole 6.2. Následně jsem provedl zjednodušené bilanční výpočty vybraných systémů pro zvolené parametry.

Hlavním důvodem, proč jsem se zabýval touto problematikou, bylo zjistit, kdy je výhodnější použít systém FS v modifikacích SFS a DFS, kdy systém BC a složený systém CSFS&BC z hlediska počáteční teploty horké vody z vrtu.

U systému BC a CSFS&BC jsem uvažoval na straně sekundárního média organické médium butan ( $C_4H_{10}$ ) a pentan ( $C_5H_{12}$ ). Vodu ( $H_2O$ ) jsem uvažoval jenom pro systém BC.

Zjistil jsem, že se zvyšující se teplotou horké vody z vrtu se elektrický výkon zvyšuje.

U nejnižší teploty horké vody ze zvoleného rozsahu 100 °C až 300 °C po 25 °C není rozdíl mezi elektrickými výkony porovnávaných systémů až tolik značný. Ale platí, že čím je teplota horké vody z vrtu vyšší, tím můžeme získat větší výkon. Základní porovnání je vidět na grafu, který je na obrázku Obr. 8-16.

Jako výhodný systém v celém rozsahu teplot se jeví systém DFS, ale v nižších teplotách

(do 200 °C) ze zvoleného rozsahu teplot ho předčil systém CSFS&BC, ale o tomto systému je toho velice málo známo a mohu předpokládat, že celá jeho technologie by v ekonomické části vyšla hůře než u systému DFS, proto se tolik nepoužívá.

V závěru práce jsem do bilančních výpočtů zjednodušeně zahrnul vliv obsahu nekondenzovatelných plynů v geotermálním médiu na dosažitelný elektrický výkon v systémech FS. Zvolil jsem tři hladiny obsahu nekondenzovatelných plynů a to 1 %, 6 % a 17,5 %. Problematika nekondenzovatelných plynů má čtyři způsoby (technologie) odstraňování. Každá technologie má své výhody i nevýhody a podle nich se nasazují. O tom, kdy se který způsob (technologie) odstraňování nasazuje, je uvedeno v tabulce Tab. 9-1.

Po zahrnutí problematiky nekondenzovatelných plynů do bilančních výpočtů se výkony systémů FS zmenšily. Vždy záleželo na použité technologii a míře obsahu nekondenzovatelných plynů. Srovnání můžeme vidět na grafech, které jsou na obrázcích Obr. 10-1, Obr. 10-2, Obr. 10-3 a Obr. 10-4.

Mohu říci, že v nižších teplotách horké vody z vrtu se používají systémy BC a ve vyšších teplotách horké vody z vrtu se nasazují systémy FS.

Výpočty jsou provedeny s velkým množstvím zjednodušení, ale obecné platnosti o nasazování jednotlivých geotermálních systémů z hlediska teploty horké vody z vrtu jsou zachovány. Při úvaze o nasazení některého vybraného systému, je nutno provést v prvním kroku detailnější analýzu pro danou lokalitu a ve druhém kroku zhodnotit jednotlivé systémy dle ekonomické stránky (investiční náklady, doba návratnosti, náklady na údržbu atd.)

## Použitá literatura

[1] DIPIPPPO, Ronald. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Second Edition. 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA: Butterworth – Heinemann, ELSEVIER, 2008, ISBN 978-0-7506-8620-4.

[2] MATEK, Benjamin. 2013 Geothermal Power: International Market Overview. [online]. 2013 [cit. 2014-10-09].

Dostupné z: <http://geoenergy.org/events/2013%20International%20Report%20Final.pdf>

[3] DIPIPPPO, Ronald. *Geothermal power plants: principles, applications, case studies, and environmental impact* [online]. 3rd ed. Boston: Butterworth – Heinemann, c2012, xxiv, 600 p. [cit. 2015-04-08]. ISBN 978-008-0982-069.

Dostupné z:

[https://www.ucursos.cl/usuario/c658fb0e38744551c1c51c640649db2e/mi\\_blog/r/Geothermal\\_Power\\_Plants.pdf](https://www.ucursos.cl/usuario/c658fb0e38744551c1c51c640649db2e/mi_blog/r/Geothermal_Power_Plants.pdf)

[4] Kawerau and Nga Awa Purua Geothermal Power Station Projects, New Zealand. *Fuji Electric Co., LTD Global* [online]. [cit. 2014-10-03].

Dostupné z:

<https://www.fujielectric.com/company/tech/pdf/55-03/FER-55-3-080-2009.pdf>

[5] Nga Awa Purua Power Station. *Hawkins Infrastructure* [online]. [cit. 2014-10-03].

Dostupné z: <http://hawkinsinfrastructure.co.nz/nga-awa-purua-power-station/>

[6] MURAKAMI, Hiroshi, Yoshifumi KATO a Nobuo AKUTSU. CONSTRUCTION OF THE LARGEST GEOTHERMAL POWER PLANT FOR WAYANG WINDU PROJECT, INDONESIA. In: *CONSTRUCTION OF THE LARGEST GEOTHERMAL POWER PLANT FOR WAYANG WINDU PROJECT, INDONESIA* [online]. 2000 [cit. 2014-10-09].

Dostupné z:

<http://www.geothermalenergy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0187.PDF>

[7] Kawerau Geothermal Power Station. *Hawkins Infrastructure* [online]. [cit. 2014-10-03].

Dostupné z: <http://hawkinsinfrastructure.co.nz/kawerau-geothermal-power-station/>

[8] YAMAGUCHI, Naoko. Variety of Steam Turbines in Svartsengi and Reykjanes Geothermal Power Plants. In: *Variety of Steam Turbines in Svartsengi and Reykjanes Geothermal Power Plants* [online]. 2010 [cit. 2014-10-09].

Dostupné z:

<http://www.americas.fujielectric.com/sites/default/files/Variety%20of%20Steam%20Turbines%20in%20Svartsengi%20%26%20Reykjanes%20Geothermal%20Power%20Plant.pdf>

[9] MOYA, Paul a Ronald DIPIPO. *MIRAVALLS UNIT 3 SINGLE – FLASH PLANT, GUANACASTE, COSTA RICA: TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ASSESSMENT* [online]. El Salvador, 2011 [cit. 2014-10-09].

Dostupné z: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-12-43a.pdf>

United Nations University, Institut Costarricense de Electricidad.

[10] KWAMBAI, Clety Bore. *EXERGY ANALYSIS OF OLKARIA I POWER PLANT, KENYA* [online]. Rejkjavík, 2005 [cit. 2014-10-09].

Dostupné z: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2005-05.pdf>

The United Nations University.

[11] STEVENSON, Craig a Mathew NOONAN. Environmental Assessment for Emissions to Air from the Proposed Te Mihi and the Poihipi Geothermal Power Stations. In: *Environmental Assessment for Emissions to Air from the Proposed Te Mihi and the Poihipi Geothermal Power Stations* [online]. 2007 [cit. 2014-10-09].

Dostupné z:

[http://www.contactenergy.co.nz/aboutus/pdf/our\\_projects/temihi/TeMihi-AirEmissionsSection92RotokawaCumulativeEffects.pdf](http://www.contactenergy.co.nz/aboutus/pdf/our_projects/temihi/TeMihi-AirEmissionsSection92RotokawaCumulativeEffects.pdf)

[12] MOON, Hyungsul a Saldig J. ZARROUK. *EFFICIENCY OF GEOTHERMAL POWER PLANTS: A WORLDWIDE REVIEW*. New Zealand. [online]. 2012 [cit. 2015-04-05].

Dostupné z:

<http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2012/46654final00097.pdf>

Workshop 2012 Proceedings. Department of Engineering Science, University of Auckland, New Zealand.

[13] BLIEM, C. J. THE RAFT RIVER 5MW( e) BINARY GEOTHERMAL-ELECTRIC POWER PLANT – OPERATION AND PERFORMANCE. *THE RAFT RIVER 5MW( e) BINARY GEOTHERMAL-ELECTRIC POWER PLANT – OPERATION AND PERFORMANCE* [online]. 1983 [cit. 2015-04-05].

Dostupné z: <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1001031.pdf>

[14] KAPLAN, Uri, Avi NATHAN a Carlos Alberto BICUDO DA PONTE. Pico Vermelho Geothermal Project, Azores, Portugal. *Pico Vermelho Geothermal Project, Azores, Portugal* [online]. 2007 [cit. 2015-04-05].

Dostupné z: <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1025271.pdf>

[15] YAMADA, Shigeto. Fuji's Activities in Geothermal Power Generation. *Fuji's Activities in Geothermal Power Generation* [online]. 2001 [cit. 2015-04-05].

Dostupné z: <http://www.fujielectric.com/company/tech/pdf/r51-3/r51-3.pdf>

[16] HIRIART, Gerardo. Los Azufres II. *Los Azufres II* [online]. 2003 [cit. 2015-04-05].

Dostupné z: <http://www.geothermal.org/PDFs/Articles/losazufres2.pdf>

[17] Puna Geothermal Venture Power Plant. In: *Puna Geothermal Venture Power Plant* [online]. 2010 [cit. 2015-04-05].

Dostupné z:

[http://www.cleanenergyactionproject.com/CleanEnergyActionProject/Geothermal\\_Technologies\\_Case\\_Studies\\_files/Puna%20Geothermal%20Venture%20Power%20Plant.pdf](http://www.cleanenergyactionproject.com/CleanEnergyActionProject/Geothermal_Technologies_Case_Studies_files/Puna%20Geothermal%20Venture%20Power%20Plant.pdf)



[18] YILDIRIM ÖZCAN, Nurdan. *MODELING, SIMULATION AND OPTIMIZATION OF FLASHED-STEAM GEOTHERMAL POWER PLANTS FROM THE POINT OF VIEW OF NONCONDENSABLE GAS REMOVAL SYSTEMS* [online]. Izmir, 2010

[cit. 2015-04-05].

Dostupné z: <http://library.iyte.edu.tr/tezler/doktora/makinamuh/T000839.pdf>

Disertační práce. The Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology. Vedoucí práce Assoc. Prof. Dr. Gülden GÖKÇEN AKKURT.

### **Použité softwary**

[1] Word 2013 – Textový procesor od firmy Microsoft pro operační systém Microsoft Windows.

[2] Excel 2013 – Tabulkový procesor od firmy Microsoft pro operační systém Microsoft Windows.

[3] X Steam – IAPWS IF 97 – Excel Steam Tables, Version 2.6.

[4] REFPROP – Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – NIST Standard Reference, Database 23, Version 9.1.