

# Simulace dynamického chování solárního kolektoru pro přípravu teplé vody

## Cíl úlohy

Seznámit se základy simulace výkonu solárních kolektorů s pomocí statisticky zpracovaných meteorologických dat získaných v dané lokalitě za dlouhé období. Studium základních možností optimalizace výkonu solárního kolektoru.

## Úvod

### Typical Meteorological Year

Pro simulaci jsou použita meteorologická data ve formátu TMY (Typical Meteorological Year), což je jeden z oblíbených formátů používaných pro simulaci výkonu solárních soustav, pasivní solární architektury atp. V našem příkladu jsou použity první 4 dny v libovolném měsíci ze souboru `Brussels.dat`. Data vznikla statistickým zpracováním (nikoliv však zprůměrováním!) 30 let záznamů v období 1961–1990. Data TMY reprezentují „typický“ průběh roku, nehodí se proto pro vyhodnocení chování solární soustavy či budovy v extrémních podmínkách.

Datový soubor TMY je textový soubor, který obsahuje hodinové záznamy ve sloupcích, jejichž přehled je v tabulce 1. Pro nás mají význam sloupce 1–5.

Tabulka 1: Uspořádání sloupců v datovém souboru TMY

sloupec	data
1.	měsíc
2.	hodina (počítáno od začátku každého měsíce)
3.	Intenzita přímého slunečního záření $E_{n,dir}$ ( $\text{kJm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), průměr za uplynulou hodinu
4.	Globální ozáření vodorovné plochy $E_{hor}$ ( $\text{kJm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), průměr za uplynulou hodinu
5.	10-teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )
6.	vlhkost $\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{vzduch}}} \cdot 10^4$ (kg/kg)
7.	rychlost větru (m/s)
8.	směr větru $\cdot 10$ ( $^{\circ}$ )

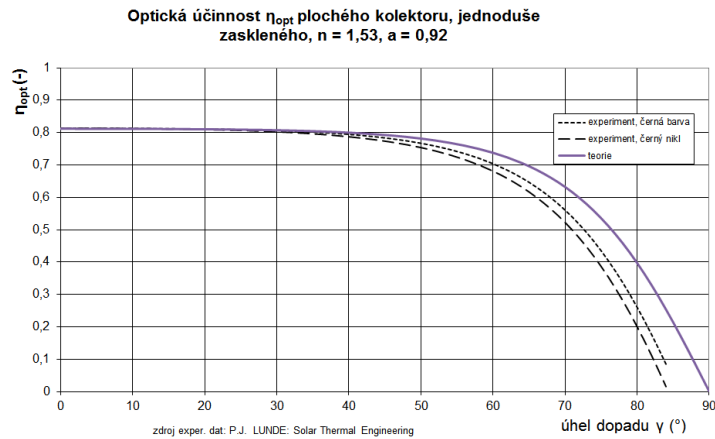
Předmětem simulace je samotný solární kolektor, nebere se do úvahy vliv zbytku solárního systému<sup>1</sup>. Teplota vody vstupující do kolektoru se v tomto příkladu považuje za konstantní. Voda kolektorem buď protéká nebo ne – čerpadlo má tedy dva regulační stavy On a Off. Je ovšem možné předvolit výkon čerpadla a tedy průtok vody kolektorem.

## Účinnost kolektoru

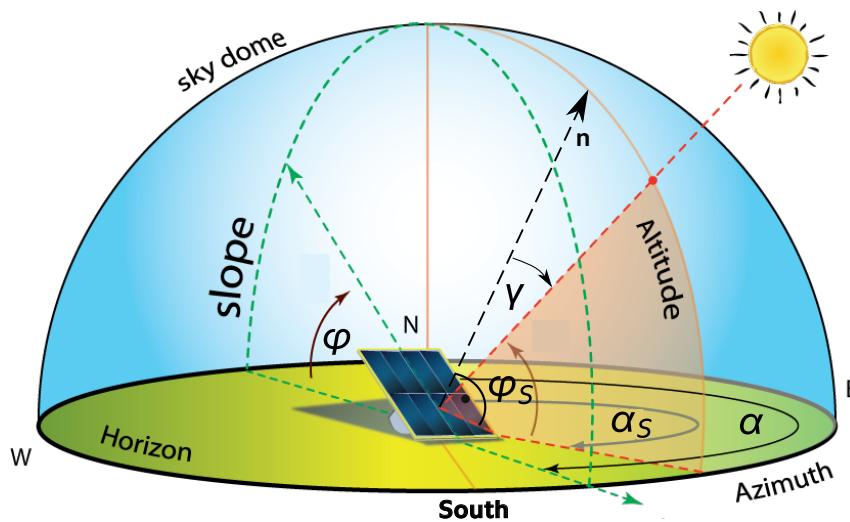
Účinnost kolektoru lze vyjádřit přibližným vztahem:

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{U \cdot (\bar{t}_k - t_e)}{E} \quad (1)$$

<sup>1</sup>Samozřejmě sama o sobě taková simulace nemá valný smysl – ale lze k ní připojit podobně koncipovaný model zbytku soustavy, tj. především zásobníku TUV.



Obrázek 1: Závislost optické účinnosti kolektoru na úhlu dopadu paprsků  $\gamma$



Obrázek 2: Poloha slunce (výška  $\varphi_s$ , azimut  $\alpha_s$ ) a orientace kolektoru (sklon  $\varphi$ , azimut  $\alpha$ ). Úhel  $\gamma$  je úhel dopadu slunečních paprsků na kolektor (počítá se od kolmice).

kde  $E$  je ozáření kolektoru. Optická účinnost  $\eta_{opt}$  závisí na úhlu dopadu slunečního záření na kolektor  $\gamma$  (čím větší úhel dopadu, tím větší část záření se odráží od zasklení - viz obr. 1). Zlomek v rovnici 1 představuje tepelné ztráty. Tepelné ztráty záleží na kvalitě izolace kolektoru (zejména na přední, zasklené straně), což je vyjádřeno součinitelem prostupu tepla  $U$ , a na rozdílu teplot mezi kolektorem ( $\bar{t}_k$ ) a exteriérem ( $t_e$ ).

## Energetická bilance kolektoru

Bilance je provedena v aplikaci MS excel, soubor se jmenuje `BilanceKolektoru.xls`. Meteorologická data jsou uvedena v souboru `Brussels.dat`.

Bilance probíhá zhruba v těchto krocích:

- TMY data udávají pouze intenzitu přímého slunečního záření a ozáření vodorovné plochy. My potřebujeme z těchto údajů vypočítat ozáření kolektoru, který může mít libovolnou orientaci (danou úhly  $\alpha$ ,  $\varphi$  symboly viz obr. 2). To je alespoň přibližně možné, pokud známe pozici slunce (azimut  $\alpha_s$  a výšku nad obzorem  $\varphi_s$ ) v daném okamžiku a albedo a povrchu země v okolí kolektoru. Vliv budov a nerovností terénu nezbyvá než zanedbat.

Nejprve vypočteme  $\cos \gamma$ , kde  $\gamma$  je úhel dopadu slunečního záření na kolektor (úhel mezi parskem a normálou kolektoru):

$$\cos \gamma = \sin \varphi_s \cos \varphi + \cos \varphi_s \sin \varphi \cos (\alpha_s - \alpha)$$

Dále přibližně platí:

$$\begin{aligned} E_{dir}(\varphi, \alpha) &= E_{n,dir} \cos \gamma, \\ E_{ind}(\varphi, \alpha) &= \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi) E_{hor,dif} + \frac{1}{2} a (1 - \cos \varphi) E_{hor}, \text{ kde} \\ E_{hor,dif} &= E_{hor} - E_{n,dir} \sin (\varphi_s) \end{aligned}$$


- Celkové ozáření kolektoru získáme sečtením nepřímého a přímého záření  $E(\varphi, \alpha) = E_{dir}(\varphi, \alpha) + E_{ind}(\varphi, \alpha)$ . Přenásobením plochou kolektoru získáme celkový solární příkon kolektoru.
- Přenásobením optickou účinností získáme množství tepla, které kolektor zachytí za 1 s.
- Vypočteme tepelné ztráty kolektoru jako součin součinitele prostupu tepla  $U$  udávaného výrobce a rozdílu teploty kolektoru a vnější teploty:  $U \cdot (\bar{t}_k - t_e)$ .
- Vypočteme rozdíl tepelného příkonu a tepelných ztrát:  $E \cdot \eta_{opt} - U \cdot (\bar{t}_k - t_e)$ .
- Dále vypočteme množství tepla, které z kolektoru odchází v teplé vodě. To je průtok vody kolektorem krát tepelná kapacita vody krát rozdíl výstupní a vstupní teploty vody:  $q \cdot c_v \cdot (t_{out} - t_{in})$ .
- Celková bilance tepla je: tepelný příkon za slunečního záření mínus tepelné ztráty mínus teplo odcházející ve formě teplé vody:  $E \cdot \eta_{opt} - U \cdot (\bar{t}_k - t_e) - q \cdot c_v \cdot (t_{out} - t_{in})$ .
- Z této bilance vypočteme změnu teploty kolektoru za nějaký krátký časový interval ( $\Delta t$ , v našem příkladu je to 1 minuta). Pokud je bilance tepla kladná, teplota kolektoru se zvyšuje, pokud je bilance záporná, kolektor se ochlazuje.
- Z vypočtené změny teploty kolektoru se vypočte nová teplota (v následující minutě) a výpočet se opakuje.
- Použitá zjednodušení:
  - Předpokládá se, že teplota kolektoru (absorpční plochy), je stejná jako teploty vody v kolektoru: výměna tepla mezi nimi se tedy považuje za nekonečně rychlou.
  - Předpokládá se, že teplota vody i absorberu je všude stejná (tedy nikoliv chladnější u vstupu a teplejší u výstupu) a že je stejná po celou dobu  $\Delta t$ .

## Zadání

- Otevřete soubor *BilanceKolektoru.xls* a uložte jej pod svým názvem. *Povolte použití maker!*
- Vaším cílem je pro zadané potřebné množství teplé vody najít optimální kolektor a optimální nastavení systému.
- Ke kolektoru je připojen stratifikační zásobník, který uchovává vodu přitékající z kolektoru (při teplotě  $t_{out}$ ) aniž by ji promíchal s ostatní vodou v zásobníku.
- Při spotřebě se bere teplá voda ze zásobníku – pokud je voda v zásobníku teplejší, ředí se na požadovanou teplotu studenou vodou z vodovodního řádu. Pokud je chladnější, dohřívá se elektrickým topným tělesem. V okamžiku, kdy dojde teplá voda v zásobníku, dohřívá se topným tělesem na požadovanou teplotu studená voda z vodovodního řádu (o teplotě 15 °C).

- Množství vody uložené v zásobníku podle teploty je uvedeno na listu „Kolektor“ v tabulce a v grafu a podrobněji ve sloupcích R, S a T.
- Množství energie potřebné na případný dohřev vody na požadovanou teplotu a množství musíte dopočítat – jak, to nechám na vás – je to ten nejobtížnější úkol z celé úlohy.
- Úlohu řešte pro tři varianty:
  1. ohřev bazénu, potřebujete 1000 l vody o teplotě 25 °C
  2. voda na sprchování, potřebujete 200 l vody o teplotě 45 °C.
  3. technická voda: potřebujete 100 l vody o teplotě 90 °C.

## Postup řešení

- Pozor: po každé změně je nutné stisknout tlačítko  !
1. Vyberte některý kolektor na listu 'Přehled kolektorů' a jeho číslo (z řádku 1) napište do buňky D1 na listu 'Kolektor'.
  2. Na listu 'Kolektor' je možné měnit další hodnoty. Hodnoty, které lze měnit, jsou označeny žlutě.
    - (a) Určení vlivu spínací teploty čerpadla (teploty, při které začíná pracovat oběhové čerpadlo).
    - (b) Určení vlivu výkonu čerpadla (průtoku vody kolektorem).  
Průtok vody se nastavuje jako násobek vodního objemu kolektoru maximálně do hodnoty 60.
    - (c) Nastavte též optimální orientaci a sklon kolektoru. Nezapomeňte, že kolektor je v Bruselu a je začátek března.
  3. Možná se vám hodí i některé údaje na listu Grafy, kde je průběh počasí, účinnost kolektoru a tak podobně...
  4. Jako řešení do Teamsů nahrajte prosím tři varianty souboru Excel (pro tři výše uvedená zadání) + nějaký komentář – zejména mne zajímá jakým způsobem jste při řešení postupovali.

## Pomůcky

soubor *BilanceKolektoru.xls*, počítač.

## Reference

- [1] J. Cihelka, Solární tepelná technika, Praha 1994
- [2] Sun Position Calculator [http://www.volker-quaschning.de/datserv/sunpos/index\\_e.php](http://www.volker-quaschning.de/datserv/sunpos/index_e.php)

---

Tento návod byl aktualizován dne: 3. prosince 2020