

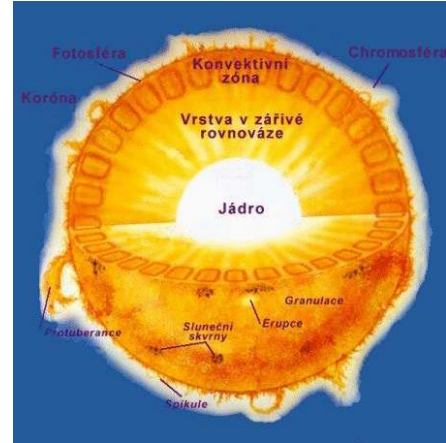
Využívání sluneční energie

Poznámka: Doplnující zdroj informací ke cvičení možné nalézt:

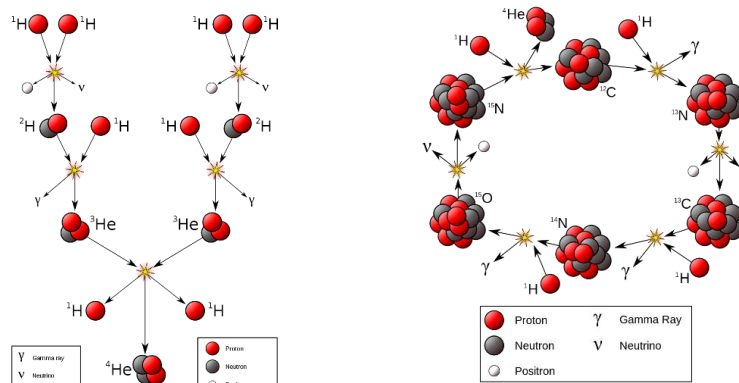
<https://www.svetenergie.cz/3d/oze/>

<http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-bustehrad/>

Využití solární energie na Zemi umožňuje existence hvězdy sluneční soustavy – Slunce. Slunce je v současnosti staré 4,6 miliard let a jeho životnost je 7 miliard let. S rozvojem spektroskopických metod bylo možné určit poměrně velmi přesně složení Slunce, které se skládá především z vodíku (92,1 %) a helia (7,8 %). Nepatrný zbytek pak představuje kyslík, uhlík, dusík, neon, železo, křemík, hořčík a síra. Z toho plyne, že je hmotnost Slunce prakticky tvořena pouze vodíkem (75 %) a heliem (25 %). Jádru Slunce tvoří jeho motor – zde vzniká energie, kterou nesou fotony, jež jsou zpomaleny ve vrstvě v zářivé rovnováze. Dále fotony pokračují přes proudy horké plazmy v konvektivní zóně, přes fotosféru představující viditelný povrch Slunce a následně vylétají přes chromosféru do kosmu z koróny, která tvoří jakousi horní atmosféru Slunce. Potom co foton opustí sluneční korónu, trvá mu 500 vteřin, než doletí k Zemi.



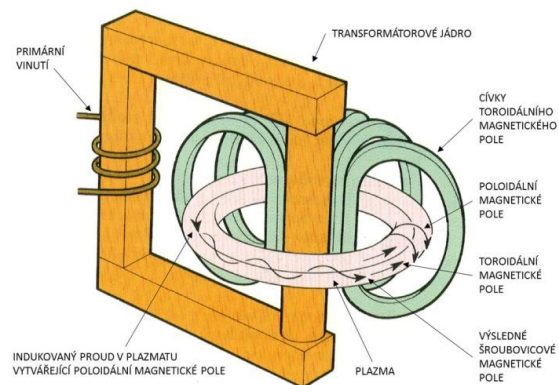
Solární energie vzniká prostřednictvím jaderných reakcí v centrálních regionech Slunce. Jedná se o jaderné slučování lehkých prvků, které se děje za vysokých teplot, a proto se taková reakce nazývá termonukleární fúze. V jádru Slunce se nachází teplota přibližně 15 milionů K, tlak $2,48 \cdot 10^{15}$ Pa a hustota hmoty cca 100x vyšší než je hustota vody. V tomto stavu se hmota nachází ve stavu plazmy, tedy ionizované látky, kdy je atomový obal oddělen od atomového jádra. Ve hvězdách s hmotností menší nebo rovnou hmotnosti Slunce probíhá termonukleární reakce pomocí tzv. proton-protonového cyklu, zatímco ve hvězdách s vyšší hmotností než je hmotnost Slunce probíhá jiné typ termonukleární reakce – CNO cyklus (uhlík – dusík - kyslík). I tento reakční cyklus však přeměňuje protony na helium. Proton-protonový cyklus našeho Slunce je velmi pomalá reakce trvající stovky milionů let. Na konci této reakce je však uvolněna energie, jejíž hustota výkonu je na hraně zemské atmosféry cca 1360 W/m^2 – solární konstanta. Část, která projde atmosférou a dopadne na povrch pod určitým úhlem je pak energeticky využitelná. Vědci se již několik desetiletí se střídavými úspěchy a neúspěchy snaží spustit termojadernou fúzi rovněž na Zemi. Podmínky, za kterých termojaderná syntéza na slunci probíhá, jsou však naprosto nereálné na zemském povrchu. Hustota fúzního výkonu na slunci je totiž mnohonásobně menší, než který je potřeba pro komerční užití.



Fyzikální charakteristiky Slunce			
Výkon	$4 \cdot 10^{26}$ W (0,19 mW/kg)	Hustota v jádru	130 g/cm ³
Průměr	$1,39 \cdot 10^6$ km (109 Zemí)	Hustota na povrchu	0,001 g/cm ³
Povrch	$6,09 \cdot 10^{12}$ km ² (11 900 Zemí)	Gravitace na povrchu	273,95 m/s ² (27,9 G)
Objem	$1,41 \cdot 10^{18}$ km ³ (1 300 000 Zemí)	Teplota jádra	13,6 MK
Hmotnost	$1,99 \cdot 10^{30}$ kg (332 950 Zemí)	Teplota koróny	5 MK
Stř. hustota	1,41 g/cm ³ (Země - 5,52 g/cm ³)	Povrchová teplota	5 780 K

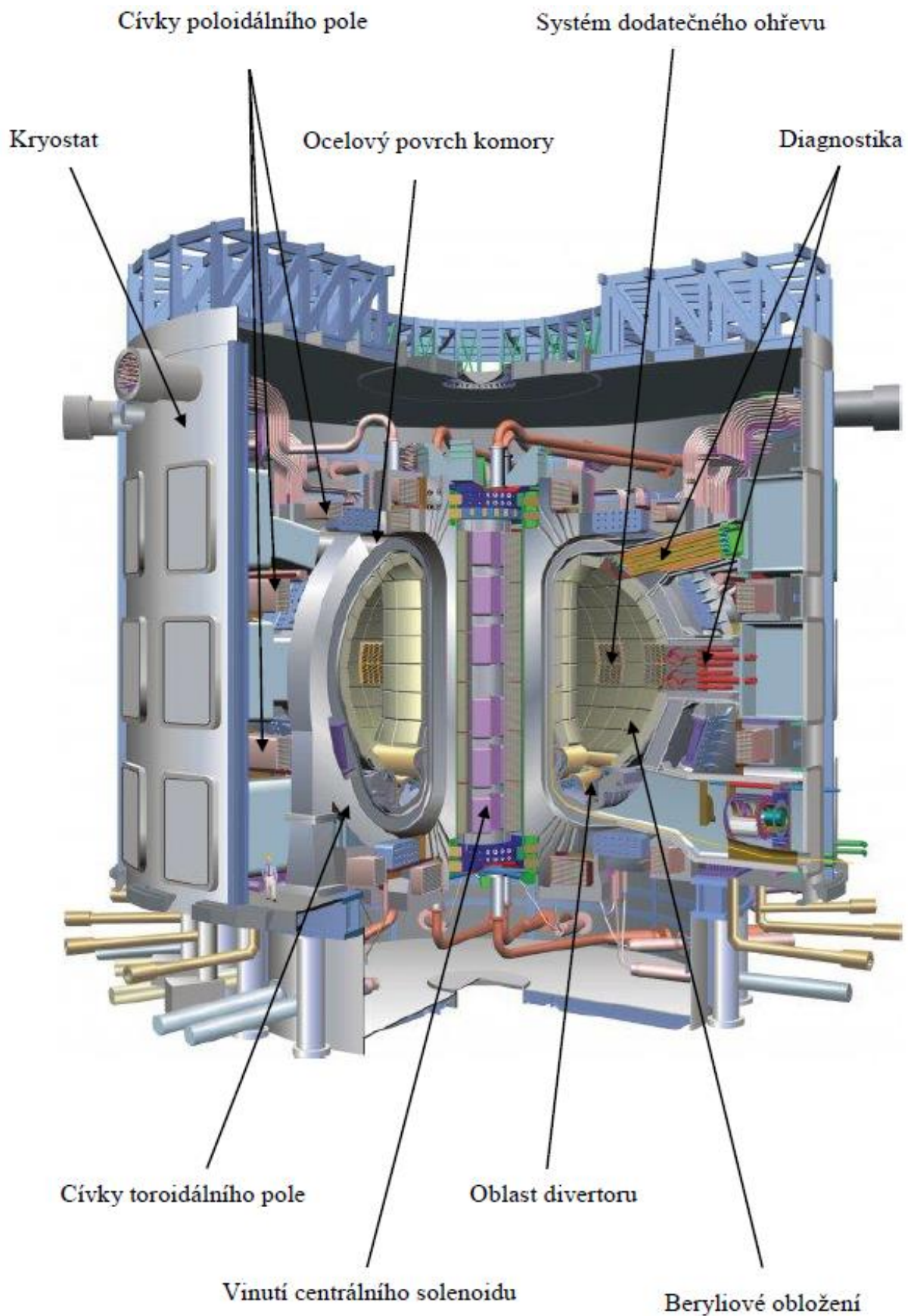
Termonukleární fúze na Zemi jako zdroj energie

Pro spuštění, respektive zapálení fúzní reakce je třeba dodat velké množství vstupní energie. To je vzhledem ke elektrické vodivosti možné provést ohmickým ohřevem (v principu transformátor). Plazmatem pak prochází elektrický proud, který díky principu elektromagnetické indukce vytvoří kolem plazmatu magnetické pole, které je schopno elektricky nabitou plazmu udržet v určitém tvaru. Tento princip vedl ke vzniku tzv. magnetického udržení plazmatu, které využívají tzv. tokamaky – v současnosti nejslibnější zařízení pro komerční využití termojaderné fúze. Tokamaky zpravidla využívají dalších pomocných cívek vytvářejících pomocná magnetická pole pro odtržení plazmatu od stěn výbojové komory. Zmíněný ohmický ohřev má nevýhodu v tom, že jeho účinnost klesá s rostoucí teplotou, a tudíž většinou nestačí pro dosažení zápalné teploty, kdy již reakce probíhá samovolně bez vnějšího zdroje. Z toho důvodu je většinou ohmický ohřev plazmatu nezbytné doplnit o dodatečný ohřev vysokofrekvenční vlnou a neutrálním svazkem atomů vytvořeného urychlovačem.



V současnosti se ve Francii nachází ve výstavbě tokamak ITER, který má být první fúzní reaktor na světě schopný odebrat teplo vznikající během reakce. Tento fúzní reaktor bude slučovat izotopy vodíku deuterium (vyrobitelné z vody) a tritium (v přírodě jen ve stopovém množství), což je v současnosti a v horizontu dalších generací prakticky jediná realizovatelná fúzní reakce na zemském povrchu vzhledem k zápalné teplotě této a dalších myslitelných reakcí. Tritium je však radioaktivní, tudíž se nejedná o kompletně „čistý zdroj“. Jeho životní cyklus však lze uzavřít do prostoru tokamaku, takže nebude žádný radioaktivní materiál přivážen ani odvážen. Tritium je totiž možné vyrábět reakcí neutronu vznikajícího sloučením a lithia, které bude přítomno v plášti kolem výbojové komory. Tritium je navíc „pouze“ slabý β -zářič s poločasem rozpadu 12,3 roku. Na obrázku je patrný model budoucího tokamaku ITER. Celé zařízení je umístěno uvnitř kryostatu, který bude udržovat teplotu 4 K pomocí kapalného helia pro zajištění supravodivosti cívek. Vnitřní plášť výbojové komory musí snést obrovské tepelné namáhání. Proto se stínící bloky z nerezové oceli opatřují berylliem o vysoké tepelné odolnosti. Velké nároky jsou kladeny rovněž na oblast divertoru, který slouží pro zachytávání heliového „popelu“ a nečistot (kyslík, uhlík), jež se navzdory vysoké čistotě vnitřního prostoru uvolňují vlivem vysoké teploty z okolních materiálů.

Druhá varianta, pomocí které je možné dosáhnout termojaderné fúze, se nazývá tzv. inerciální udržení. Zde se vstupní výkon dodává pomocí vysokovýkonných monochromatických laserů. Inerciální udržení však v současnosti neposkytuje možnost, jakou by bylo možné plazmu udržet. Inerciální způsob umožnil konstrukci vodíkových bomb.



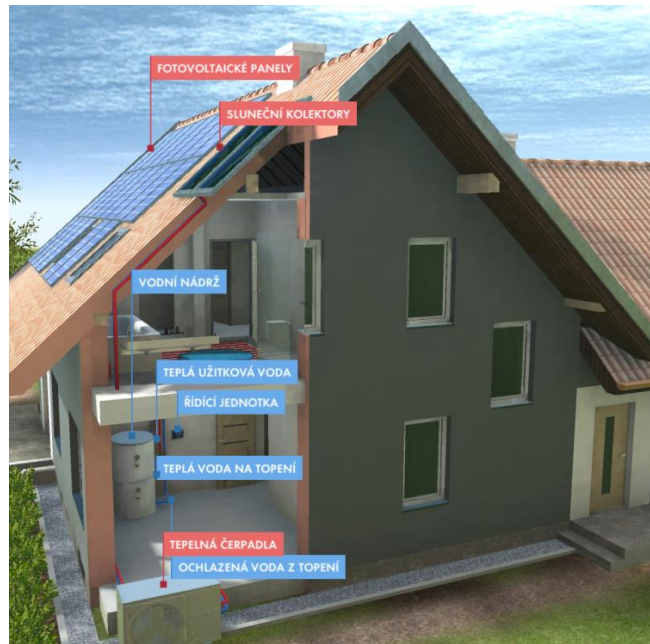
Využívání přímého slunečního záření ne Zemi

Sluneční záření jako vnější projev termonukleární reakce na Slunci je již možné na zemském povrchu poměrně dobře využívat. V dnešní době je technicky možné využívat sluneční záření k ohřevu teplonosného média nebo k přímé přeměně na elektrickou energii využitím principu fotoelektrického jevu. Obě tyto možnosti lze využít na úrovni malých či velkých výkonů. Pokud jde o malé výkony, jedná se především o domácí zdroje elektřiny a tepla. V oblasti velkých výkonů se jedná o fotovoltaické elektrárny a solární tepelné elektrárny.

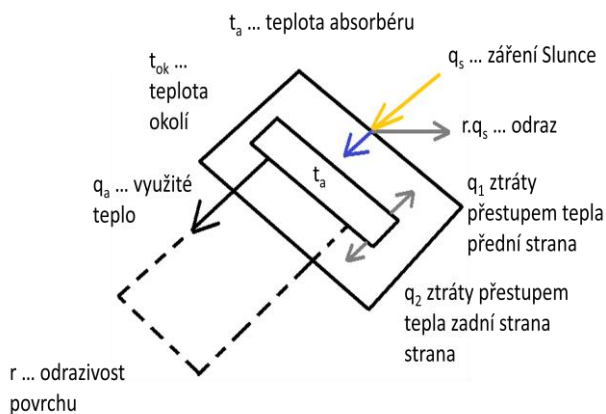
Domácí zdroje elektřiny a tepla

Solární tepelný kolektor

Výkon solárního kolektoru závisí na mnoha faktorech. Hlavním je množství sluneční energie dopadající na plochu kolektoru. Pro největší zisk by měl být kolektor celodenně osluněn, správně orientován vzhledem ke světovým stranám a skloněn pod specifickým úhlem, aby sluneční paprsky dopadaly kolmo na jeho plochu. Ideální je využití jižní až jihozápadní orientace. Úhel sklonu kolektoru by měl respektovat polohu slunce v jednotlivých ročních dobách a v ideálním případě by měl být variabilní. Pro oblast střední Evropy jsou nejvyšší zisky v letním období při sklonu kolektoru 20 až 30 stupňů a v zimním období při sklonu přibližně 60 stupňů. V praxi se polohování kolektorů nepoužívá a optimální sklon se určuje pro maximalizaci výkonu v přechodném období. Pro oblast střední Evropy je to přibližně 50 stupňů.



Tepelná bilance kolektoru:



$$\begin{aligned} (1-r) \cdot q_s &= q_a + q_1 + q_2 \\ (1-r) \cdot q_s &= q_a + k_1 \cdot (t_a - t_{ok}) + k_2 \cdot (t_a - t_{ok}) \\ q_a &= (1-r) \cdot q_s - k_1(t_a - t_{ok}) - k_2 \cdot (t_a - t_{ok}) \\ q_a &= (1-r) \cdot q_s - \underbrace{(k_1 + k_2)}_k \cdot (t_a - t_{ok}) \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{q_a}{q_s} \Rightarrow \eta = (1-r) - \frac{k \cdot (t_a - t_{ok})}{q_s}$$

Člen označován jako redukováná teplota – charakterizuje vnější vlivy ($q_s \approx I_s$)

- $q_1 + q_2$ = Ztráty přestupem tepla na zadní a přední straně kolektoru $\Rightarrow k_1$ – koeficient přestupu tepla předek, k_2 – koeficient přestupu tepla zadek;

- ztráty tepla vedením prouděním a zářením ($q_v + q_p + q_z$);
- účinnost kolektoru závisí na intenzitě záření, teplotě okolí (respektive na teplotním rozdílu) a na pohltivosti absorberu;
- je-li rozdíl teplot nulový, kolektor dosahuje nejvyšší účinnosti, čím vyšší je rozdíl teplot, tím klesá účinnost;
- tepelné ztráty rostou se 4. mocninou rozdílu teplot (problematické zejména v případě horských chat). Omezení ztrát: ztráty zářením – omezení krycím sklem, ztráty prouděním – omezení vakuem, ztráty vedením – omezení tepelnou izolací.

Střešní fotovoltaický panel

V podnebných podmínkách České republiky vyrobí solární panely o špičkovém výkonu 1000 Wp (watt-peak) přibližně 980 kWh elektrické energie ročně. Fotovoltaické panely dnes nejběžněji dostanete ve výkonnostních řadách od 270 Wp do 300 Wp. Plocha jednoho panelu je nejčastěji cca 1,65 m². Solární panely bez ohledu na typ (fotovoltaické, teplovodní nebo teplovzdušné) orientujeme vždy co nejvíce na jih. Optimální orientace dle světových stran je jihovýchod až jihozápad. Optimální rozmezí sklonu fotovoltaických panelů je od 20° do 50° (úhel s vodorovnou osou). Ideální sklon modulů pro maximální celoroční výnos je 35°, pro celoročně vyváženou výrobu je vhodnější sklon až 45°. Pokud by panely byly v menším sklonu než 15°, pak ztratí svoji samočisticí schopnost.

Zmiňme také maximální limit velikosti fotovoltaické elektrárny na střeše rodinného domu, která by měla mít výkon menší než 10 kWp. Na elektrárny do 10 kWp se totiž nevztahuje povinnost mít na její provozování licenci. Licence je něco jako živnostenský list pro energetiku, s tím se pojí mnoho povinností a administrativy, proto se licenci chcete vyhnout. Na FVE do 10 kWp se také vztahuje osvobození příjmů, pokud nějakou nespotřebovanou elektřinu prodáte do distribuční sítě. Horní limit 10 kWp také stanovuje dotační program Nová zelená úsporám, ze kterého můžete čerpat 60 000 až 155 000 Kč podle velikosti a typu systému.

Hlavním problémem, který s tzv. střešní instalací přichází, je nerovnoměrná výroba a spotřeba elektrické energie. Zatímco ráno a večer je spotřeba domácnosti nejvyšší, elektrárna žádnou elektřinu nevyrábí. Přes den, kdy elektrárna jede na plný výkon, je zase nízká spotřeba. Tyto výkyvy lze řešit buď instalací akumulárního systému nebo tzv. Net-meteringem.

Akumulární systémy pro domácnosti:

- a) Baterie - V domácích podmínkách se používají nejčastěji olovené nebo dražší lithiové baterie. Ty mají delší životnost a jsou menší a lehčí. Důležité je zvolit správnou kapacitu baterií. Ta se vypočítává z různých faktorů, jako jsou křivky spotřeby, instalační výkon elektrárny, objem investičních prostředků nebo výše potenciálních dotací.
- b) Ohřev vody – Správně navržený a realizovaný fotovoltaický systém dokáže přímou spotřebou a akumulací využít až 100 % vyrobené elektrické energie. Při akumulaci elektrické energie ohřevem vody je výkon elektrárny přeměněn topnými spirálami na teplo, které ohřívá vodu v bojleru.

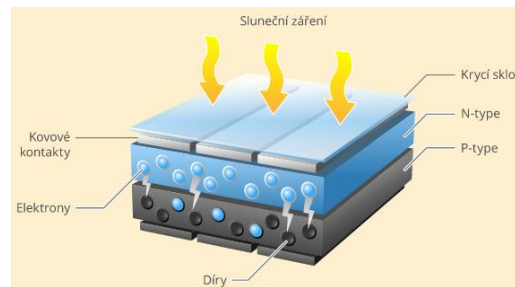
Net-metering – Je systém zapojení domácího zdroje elektřiny do distribuční sítě, který umožní jeho majiteli spotřebovat elektrickou energii i jindy, než v době, kdy byla vyrobena. Majitel zdroje je vybaven obousměrným elektroměrem, který se v případě vyrobeného přebytku točí na druhou

stranu a energii do distribuční sítě dodává. Účet za elektřinu v domácnosti potom představuje rozdíl mezi její výrobou a spotřebou.

Solární systémy vyšších výkonů

Fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaické elektrárny pracují na principu fotoelektrického jevu, který probíhá ve fotovoltaickém článku. Fotoelektrický jev představuje vznik elektromotorického napětí při expozici polovodičových materiálů zářením určitých vlnových délek. Základními částicemi záření jsou fotony. Jejich schopnost uvolnit z krystalické mřížky elektrony je dána jejich energií, která je závislá na vlnové délce. Nejvyužívanějším polovodičem je křemík. Mezní energie fotonu, který v něm ještě může vyvolat fotovoltaický efekt, je přibližně 1,12 eV (odpovídá infračervenému záření o vlnové délce 1 105 nm). Fotony s větší energií elektrony z mřížky uvolní, fotony s nízkou energií fotovoltaický jev v křemíku nezpůsobí. Uvolňování elektronů probíhá v polovodičových materiálech tak, že fotony jsou materiálem pohlceny, předávají svou energii atomům v krystalické mřížce a na základě této energie se uvolní jeden volný elektron. Prázdné místo, které po něm zůstane, se nazývá díra a má vlastnosti kladně nabitých částic. Základem fotovoltaického článku je PN přechod větší polovodičové diody. Spodní P vrstva je nejčastěji tvořena plátkem krystalického křemíku s příměsí bóru. Na vrchní straně je nanášena vrstva polovodiče typu N, například křemík dotovaný indiem. Na rozhraní vrstev vzniká PN přechod s jednosměrným průchodem volných elektronů z vrstvy P do vrstvy N. Elektrony, uvolněné dopadajícími fotony, se pak hromadí v horní vrstvě N a vytváří napěťový potenciál mezi vrstvami o velikosti přibližně 0,6 V. Připojením vhodných elektrod se může toto stejnosměrné napětí využít.



Jednotlivé články mají příliš malé napětí, proto se spojují do panelů. Vzhledem ke skutečnosti, že průměrná plošná hustota výroby elektřiny dosahuje u moderních komerčních panelů jen přibližně 150 – 200 Wp/m², musí být pro fotovoltaické elektrárny větších výkonů vyčleněna značná plocha. Při průměrném denní osvětlení (intenzitě) v ČR 300 W/m² a excelentní účinnosti fotovoltaických článků 20 % by byla pro dosažení výkonu ve špičce 1 GW potřebná plocha:

$$S = \frac{P_T}{P_1} = \frac{P_T}{\frac{1}{2} \cdot \eta \cdot E} = \frac{10^9}{30} \approx 33 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 33 \text{ km}^2$$

Řešení: Při špičkové účinnosti η získáme z 1 m² výkon $P_1 = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot E$ kde E je průměrný výkon dopadající na 1 m² a faktor $\frac{1}{2}$ započítává pro fotovoltaické systémy nepříjemnou skutečnost, že v noci Slunce nesvítí. Číselně to činí $P_1 = 30 \text{ W/m}^2$.

Převážná většina FV elektráren používá FV panely umístěné na stabilní jednoduché konstrukci s pevnou orientací i sklonem panelů. Vybavení všech panelů velké elektrárny systémem sledování Slunce je náročnější na finance i provozní údržbu. Solární FV panely generují stejnosměrný proud. Elektrárny musí být proto na výstupu vybaveny měničem a střídačem napětí, aby mohly být připojeny do lokální distribuční sítě. FV panely jsou nejúčinnější v horských oblastech, kde je nízká teplota a

čistá atmosféra. Účinnost FV panelů klesá s rostoucí okolní teplotou a se znečištěním atmosféry, na kterém vzniká pro FV panely nevyužitelná difúzní složka záření.

Životnost a likvidace FV panelů

Životnost solárních panelů se odhaduje na 25 až 30 let. Ale může být i mnohem delší. Nebo kratší. Záleží na výrobcích. Panel je vhodné vyměnit tehdy, když jeho účinnost poklesne o 20 %. Seriózní výrobci uvádějí pokles o 10 % po uplynutí zhruba 10 let a pokles účinnosti o 20 % po uplynutí zhruba 25 let. V roce 2010 vzniklo na našem území 2 x tolik solárních elektráren než v celých USA. A to i přes to, že v USA mají pro instalaci fotovoltaických elektráren na některých lokalitách daleko lepší podmínky. V nadcházejících 20 letech lze očekávat, že k likvidaci bude dodáno kolem 100 000 tun vysloužilých panelů ročně.

Ne všechny solární panely jsou stejné a některé mohou obsahovat nebezpečné látky. V ČR převažují panely s články z krystalického křemíku. Křemík je zde zastoupen 15 %, sklo 67 % a hliník 18 %. Tyto materiály lze recyklovat v podstatě stoprocentně. Dále je zde minoritní podíl plastových komponent a ve velmi malém množství těžké kovy, které v tomto případě nemá smysl recyklovat, ale je nutné s nimi vzhledem k jejich toxicitě adekvátně nakládat. Původní systém recyklace v principu spočíval v rozebrání panelů, chemickém očištění a následném opětovném použití. Tento postup však začal narážet na technologický pokrok. Jednotlivé články jsou tenčí a tenčí a tato relativně primitivní metoda recyklace s sebou nesla riziko, že se jednotlivé články zničí. Ke slovu se tedy postupně dostávají recyklovatelné materiály. Pro výrobu fotovoltaických panelů je nezbytně důležité i čiré sklo bez jakýchkoli příměsí. A toho začíná být nedostatek. Recyklace skla z vysloužilých solárních panelů je tak jedna z možností, jak takové sklo získat zpět. Recyklují se jak poškozené, tak i nepoškozené panely. Zpravidla se panel nejprve zahřeje, čímž se uvolní pojídla. Pak se jednotlivé materiály mechanicky nebo chemicky od sebe oddělí. Při tomto způsobu recyklace všeobecně platí, že hliníkový rám se recykluje kompletně a sklo s křemíkem vykazují přibližně jen 10 % odpadu. Říká se, že až 97 % materiálů použitých při výrobě solárních panelů může být extrahováno a znovu využito pomocí tepelného recyklování.

Další informace a odkazy k problematice odstraňování a recyklace panelů:

<https://www.trideniodpadu.cz/solarni-panely>

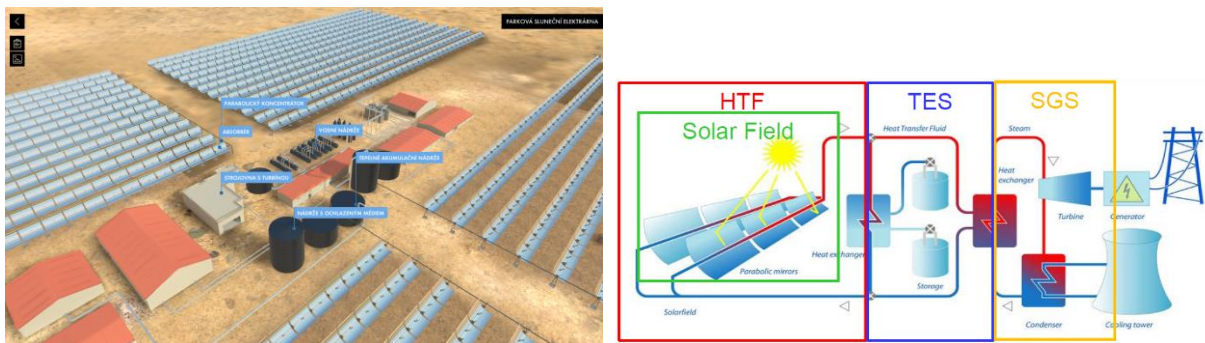
Solární tepelné elektrárny – CSP (koncentrační solární systémy)

a) Parková sluneční elektrárna – dlouhá parabolická zrcadla

Žlabové sluneční kolektory patří do skupiny koncentračních kolektorů (využívají zrcadla). Využívají princip soustředění slunečního záření z větší plochy do co nejmenšího ohniska s tmavým trubkovým absorbérem, kde záření ohřívá teplotně médium. Tím dosahují teplot kolem 400 °C a jsou vhodné na výrobu elektrické energie v parkových slunečních elektrárnách. Povrch zrcadla je opatřen nátěrem z lesklého kovu (hliník nebo galvanicky nanášené stříbro) zvyšující odrazivost zrcadla. Trubka s teplotně médiem, kterým je ve většině případů olej, může být kvůli minimalizaci ztrát konstrukčně řešena jako Dewarova nádoba – termoska s vakuovou izolací. Termická účinnost žlabových kolektorů dosahuje při kvalitní odrazné ploše až 90 %. Teplotně médium pak předává teplo vodě (případně organické látce – ORC systémy), která se vypaří a expanduje na turbíně, která roztáčí generátor generující elektřinu.

Orientace žlabových kolektorů i celých sběračů bývá nejčastěji severo-jihním směrem s tím, že celý kolektor se během dne otáčí v podélné ose a sleduje zdánlivou polohu Slunce na obzoru. Systém orientovaný ve směru východ-západ má nižší účinnost, ale na druhou stranu nepotřebuje každodenní natáčení žlabů, jenom malé sezónní úpravy polohy kolektorů podle aktuální výšky Slunce. Běžná součást dnešních tepelných slunečních elektráren je systém akumulace tepelné energie. To umožní výrobu elektrické energie i v noci a při nedostatku solárního záření. Tepelnou energii lze akumulovat prostřednictvím citelného tepla, latentního tepla, termochemického tepla nebo sorpčního tepla (poslední dvě technologie jsou v současnosti ve vývoji). Za nejslibnější akumulční média se pro první dvě technologie v současnosti považují látky na bázi roztavených solí (např. eutektikum dusičnanu sodného nebo dusičnanu draselného).

Praktická ukázka: <https://www.youtube.com/watch?v=w1tPNmTwSKI&t=58s>



b) Věžová sluneční elektrárna – rovinné, ve dvou osách pohyblivé, zrcadla (heliostaty)

Absorbér, kam je sluneční záření soustředěno, se nachází na vrcholku věže. Sluneční energie je do malého prostoru absorbéru koncentrována pomocí rovinných zrcadel – heliostatů, rozmístěných kolem centrální věže. Každý heliostat má vlastní dvouosý systém sledování polohy Slunce. Počítač kontinuálně počítá polohu Slunce a každých pár sekund upravuje pozici heliostatu tak, aby se sluneční záření odráželo vždy do jednoho bodu na vrcholku věže. V absorbéru se buď přímo přehřívá teplotně odolná látka, která pohání turbínu s elektrickým generátorem, nebo je část sluneční energie ukládána do tepelných akumulátorů obsahujících roztavené soli. Celá konverzní technologie je umístěna v centrální věži. Vzhledem k velké koncentraci dopadající energie jsou v absorbéru dosahovány poměrně vysoké teploty až 1000 °C a potenciálně i více. Tím se zlepšuje i efektivita využití tepla při konverzi na elektrickou energii.

Praktická ukázka: <https://www.youtube.com/watch?v=LMWlgwvbrCM&t=190s>

