



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

KONVERZNÍ ÚČINNOST RŮZNÝCH ZPŮSOBŮ VÝROBY ELEKTŘINY ZE SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

CONVERSION EFFICIENCY OF VARIOUS MEANS OF ELECTRICITY PRODUCTION FROM
SOLAR RADIATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Juraj Wolf

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Charvát, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Juraj Wolf**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Charvát, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konverzní účinnost různých způsobů výroby elektřiny ze slunečního záření

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sluneční záření je nejvydatnějším obnovitelným zdrojem energie na Zemi. Sluneční záření dopadající na zemský povrch mnohonásobně převyšuje celosvětovou potřebu energie. Existuje řada způsobů, kterými lze sluneční záření přeměnit na elektrickou energii. Kromě přímé přeměny slunečního záření na elektřinu ve fotovoltaických článcích, existují také způsoby, které zahrnují přeměnu slunečního záření na teplo a následné využití tohoto tepla v tepelném cyklu pohánějším generátorem elektřiny. Různé způsoby výroby elektřiny ze slunečního záření se vyznačují různou konverzní účinností a různými možnostmi praktického uplatnění.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést rešerši různých způsobů výroby elektrické energie ze slunečního záření a zhodnotit jejich konverzní účinnosti a potenciál dalšího růstu účinnosti.

Seznam literatury:

KALOGIROU, S., Solar Energy Engineering: Processes and Systems, 2nd Edition, Academic Press, 2014.

VOGEL, W., KALB, H., Large-Scale Solar Thermal Power: Technologies, Costs and Development. Wiley 2010.

De VOS, A., Thermodynamics of solar energy conversion. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition, Wiley and Sons, 2006.

NEVILLE, R.C., Solar Energy Conversion: The Solar Cell, 2nd edition, Elsevier Science, B.V. 1995.


Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 1. 11. 2016





doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Témou bakalárskej práce je zhrnutie rôznych spôsobov premeny slnečnej energie na elektrinu. Práca sa zaoberá ich konverznou účinnosťou a zhodnocuje ich potenciál ďalšieho rastu a praktického uplatnenia. Zohľadňovanými technológiami sú fotovoltaika a koncentračné tepelné systémy. Práca pojednáva o nových trendoch na zlepšenie ich účinnosti a taktiež zhodnotenie ich potenciálu pre budúcnosť. Na zreteľ boli brané ich doterajšie dosiahnuté účinnosti, výkon, požiadavky na údržbu, klimatické pomery a potreby dodatočných prístrojov nutných na ich chod.

Kľúčové slová

Solárna energia, konverzná účinnosť, fotovoltaika, solárne panely, solárne tepelné elektrárne, koncentrátory

ABSTRACT

The subject of bachelor thesis contains various methods of converting solar energy to electricity. This study analyzes their conversion efficiencies, potential growth and versatility. Considered technologies are photovoltaic and concentration solar system. Thesis reviews new trends for enhancing conversion efficiencies for both methods and evaluates their potential for future depending on their achieved efficiency, power output, maintenance requirements, climatic condition and demand for addition equipments needed for their application.

Key words

Solar energy, conversion efficiency, photovoltaic, solar panels, solar power plants, concentrators

Bibliografická citácia

WOLF, J. Konverzní účinnost různých způsobů výroby elektřiny ze slunečního záření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Charvát, Ph.D..

Čestné Prehlásenie

Prehlasujem, že bakalársku prácu na téma „Konverzní účinnost různých způsobů výroby elektřiny ze slunečního záření“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

20. mája 2017 v Brne

.....
Juraj Wolf

Pod'akovanie

Veľmi pekne ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Pavelovi Charvátovi, Ph.D. za jeho vecné pripomienky, odbornú pomoc a veľmi cenné rady pri spracovaní práce. Taktiež ďakujem mojej rodine a priateľom, ktorí ma podporovali v štúdiu.

Obsah

Úvod.....	7
1. Fotovoltaika	8
1.1 Teória fotovoltaikej premeny.....	9
1.2 Charakteristka fotovoltaiického článku	12
1.3 Typy fotovoltaiických článkov	15
1.3.1 Monokryštaliický kremík	17
1.3.2 Polykryštaliický kremík.....	18
1.3.3 Amorfny kremík	18
1.3.4 Telurid kadmia (CdTe).....	19
1.3.5 Diselenid medi a india (CIS)	19
1.3.6 Viacprechodové štruktúry (Multijunction).....	20
1.3.7 Alternatívne materiály	21
1.4 Štruktúra modulu	22
1.5 Možnosti zvýšenia účinnosť	23
1.5.1 Optické straty	23
1.5.2 Predné kontakty	24
1.5.3 Natáčanie solárnych panelov	24
1.5.4 Koncentrátory slnečného žiarenia	25
1.6. Pomocné zariadenie.....	27
1.6.1 Batérie	28
1.6.2 Invertory	29
1.6.3 Záložný zdroj.....	29
1.7 Desert Sunlight Solar Farm	30
2. Tepelné solárne systémy	31
2.1 Konverzívna účinnosť cyklov	32
2.1.1 Rankine-Clasusiov cyklus s predohrevom pary	33

2.2 Parabolický žľab.....	35
2.2.1 Elektrárne s parabolickým žľabom	37
2.2.2 Zhodnotenie elektrární s parabolickým žľabom.	38
2.2.3 Elektráreň Andasol.....	39
2.3 Solárna veža	40
2.3.1 Elektrárne so solárnymi vežami	40
2.3.2 Elektráreň Ivanpah	41
2.4 Solar dish.....	42
3 Diskusia	43
4 Závěry	45
Zoznam použitej literatúry	46
Zoznam použitých skratiek	51
Zoznam tabuliek.....	51
Zoznam obrázkov.....	51
Zoznam použitých znakov	53
Zoznam príloh	53

Úvod

Ekonomický a technologický rast so sebou prináša aj väčšiu spotrebu energie. Pokiaľ má byť však rast udržateľný, nemôže dochádzať k nadmernému čerpaniu fosílnych palív. Spaľovaním fosílnych palív sa do ovzdušia dostávajú spaliny, ktoré sa akumulujú v atmosfére a prispievajú ku skleníkovému efektu. Podľa americkej národnej agentúry pre oceány a atmosféru, sme svedkami 100 až 200 krát väčšieho nárastu CO₂ v atmosfére za posledných 10 rokov, ktoré Zem prežívala pri premene doby ľadovej [1]. Tento úkaz je jedným z dôvodov zvyšovania teploty planéty. Zvýšené znečistenie ovzdušia tento rok donútilo niektoré Európske mestá k razantným krokom, ako napríklad striedavý zákaz vstupu do mesta autám s párnymi a nepárnymi evidenčnými číslami, zákaz vstupu autám s dieselovými motormi alebo hromadná doprava zadarmo. Z týchto dôvodov sa musíme obhliadať za alternatívnymi zdrojmi energie.

Slnecná energia je pre človeka nevyčerateľným zdrojom energie. Slnecná energia sa vyskytuje na Zemi v rôznych formách, ktoré sú pre nás zdrojmi energie, ako napríklad fosílna palivá, veterná a vodná energia či biomasa. Získavanie energie priamou alebo nepriamou konverziou slnecnej energie, je výborným spôsobom, ako spomaliť negatívny rastúci trend CO₂ v ovzduší. Rozvoj a komerčný dosah podporujú niektoré krajiny prostredníctvom finančných dotácií, odstránením administratívnych bariér pre pripojovanie malých a domácich zdrojov, Net-metering atď.

Pri rozvoji a investíciách do technológií na konverziu slnecnej energie je nutné brať do úvahy niekoľko faktorov, ktoré vypovedajú o ich potenciáli pre budúcnosť. Jedným z týchto faktorov je konverzná účinnosť, ktorá je dobrým meradlom pre hodnotenie solárnych konvertorov. Avšak pre výsledné zhodnotenie je treba brať do úvahy všetky faktory, ktoré v konečnom dôsledku môžu prevážiť vysokú účinnosť.

1. Fotovoltaika

Fotovoltaický jav bol prvý krát objavený francúzskym fyzikom Alexandrom Bequerel v roku 1839. Avšak súčasná podoba fotovoltaických (PV) článkov vznikla až v roku 1952 v laboratóriách spoločnosti Bell Labs. Prvé kremíkové solárne články dosahovali účinnosť okolo 5%. V 70. rokoch sa stali súčasťou malých zariadení (kalkulačiek, bójí, parkovacích automatov) a taktiež prispievali k napájaniu väčších zariadení, vzdialených od rozvodovej siete, ako napríklad meteorologických a telekomunikačných staníc. Na začiatku, energia spotrebovaná na výrobu PV panelu, bola vyššia ako energia, ktorú panel dokázal vyrobiť počas svojej celej životnosti. Dnes je však návratnosť okolo 3-5 rokov, v závislosti na slnečnom žiarení a miesta inštalácie. PV články premieňajú slnečnú energiu bez potreby tepelného motoru alebo rotujúcich častí. Taktiež nedisponujú žiadnymi pohyblivými časťami, výsledkom čoho je fakt, že vyžadujú minimálnu údržbu a majú dlhú životnosť. Dnešný podiel solárnej energie v celosvetovej produkcii energie je malý. A však práve zvyšovanie účinnosti a zníženie ceny, robia PV lákavým pre budúcnosť [2].



Obr. 1.1. Ilustračná fotografia [3].

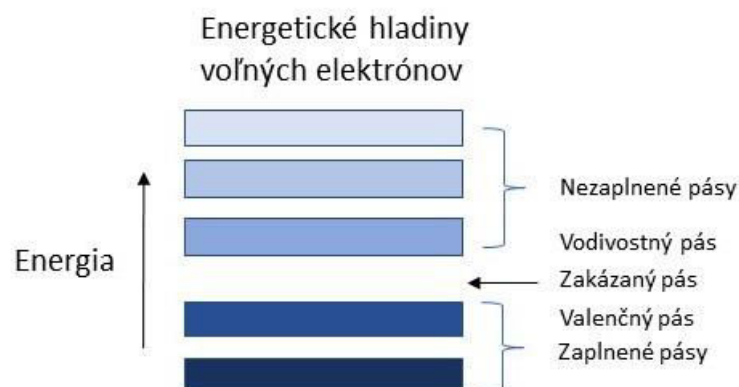
1.1 Teória fotovoltaickej premeny

K premene elektromagnetického žiarenia na elektrickú energiu, dochádza v solárnych článkoch vďaka fotovoltaickému javu. Ak je energia fotónu dostatočná, odovzdajú ju elektrónu, ktorý následne vyletí z povrchu materiálu a vzniká elektrický prúd [4].

K fotovoltaickému javu v solárnych paneloch dochádza vďaka polovodičom. Vlastnosti polovodičov ležia medzi kovmi a nekovmi. Za normálnych okolností vedú eklektický prúd veľmi zle, ale pri dodaní energie či už vo forme tepla za zvýšenej teploty, alebo v našom prípade elektromagnetickým žiarením, sa stávajú vodičmi. Najbežnejším polovodičom pri výrobe fotovoltaických článkov je kremík. Atómy kremíka sú medzi sebou pospájané kovalentnými väzbami, z ktorých na uvoľnenie elektrónu stačí len malé množstvo energie. Na popis toho, ako fotón predáva svoju energiu, je nutné popísať energetické hladiny, ktoré môže elektrón nadobúdať. Najpodstatnejšie hladiny sú:

- Vodivostný pás
- Zakázaný pás
- Valenčný pás

Valenčný pás pozostáva z energetických stavov valenčných elektrónov. Energetických stavov v kremíku je presne toľko koľko je valenčných elektrónov v kryštále. Z toho dôvodu budú, za nízkych teplôt, všetky obsadené. Nasledujúci zakázaný pás vymedzuje stavy energií, ktoré žiadny elektrón nemôže nadobúdať. A posledný vodivostný pás, ktorého stavy za nízkych teplôt ostávajú nezaplnené. Prípade najnižšieho energetického stavu ostáva valenčný pás plne obsadený a elektróny sa nemôžu podieľať na vedení elektrického prúdu. Avšak dodaním energie atómu či už vo forme tepla, alebo svetelnej energie, sa niektoré

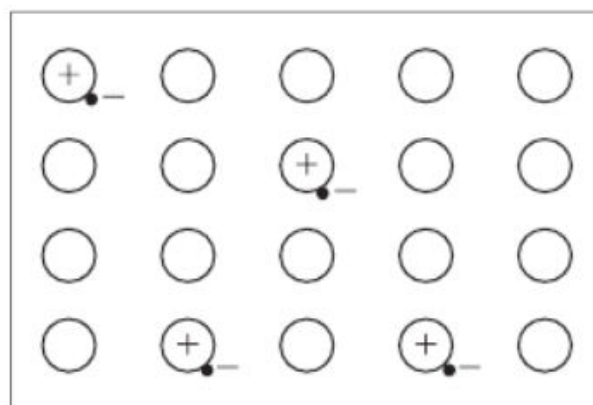


Obr. 1.1.1. Schéma pásiem energií atómu [2].

elektróny vo valenčnom páse môžu odtrhnúť od svojich jadier a prejsť na vyššiu energetickú hladinu do vodivostného pásu. Tým pádom, sa valenčný a vodivostný pás stávajú čiastočne zaplnenými. Elektróny ktoré prešli do vodivostného pásu sa môžu voľne pohybovať v kryštále a môžu teda sprostredkovať vedenie elektrického prúdu. V týchto prípadoch vzniká po odtrhnutí elektrónu prázdne miesto, ktoré sa javí ako kladne nabitá častica, ktorú nazývame „diera“. Elektrón môže byť pritiahnutý späť k diere, ktorú vytvoril, čo sa v energetickej schéme prejaví ako spätný prestup elektrónu do valenčného pásu alebo sa diera zaplní elektrónom susedného atómu. Tým pádom však vzniká diera u vedľajšieho atómu, a takýmito preskokmi sa diera posúva ďalej a ďalej. Vo vlastných polovodičoch, ako je kremík, uvoľnením jedného elektrónu vzniká jedna diera, a tak je počet voľných elektrónov rovnaký ako počet dier. Kryštál sa teda navonok javí ako elektricky neutrálny. V prípade, že chceme vyvolať pár elektrón-diera svetelným žiarením, fotón musí mať energiu vyššiu nanajvýš rovnú energii zakázaného pásu. Fotóny s nižšou energiou sa sú pre kremík transparentné. V prípade prebytku energie ju fotóny predajú kmitom mriežky, a tá ho premení na teplo, čo sa prejaví zvýšením teploty materiálu [2],[4],[5].

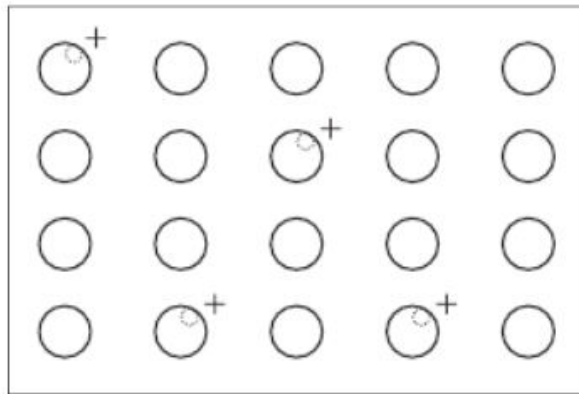
Pre zvýšenie tvorby elektrónov alebo dier materiál tzv. dopujeme. Podľa prvkú, ktorým dopujeme, delíme polovodiče na polovodiče typu N (negatívne) alebo P (pozitívne).

Polovodič typu N vytvoríme dopovaním prvkami V. skupiny Mendelejevovej tabuľky (As, P, Sb), ktoré majú vo svojej valenčnej vrstve 5 elektrónov, z ktorých 4 sú viazané kovalentnými väzbami ku kremíku. Piaty elektrón je slabo viazaný k atómu prímеси. Tomuto elektrónu stačí dodať malé množstvo energie, aby sa v energetickej schéme dostal do vodivostného pásu. Tieto prvky dodávajú kremíku voľné elektróny a preto ich nazývame donormi. U solárnych panelov je takto dopovaná vrchná strana PV článku[5].

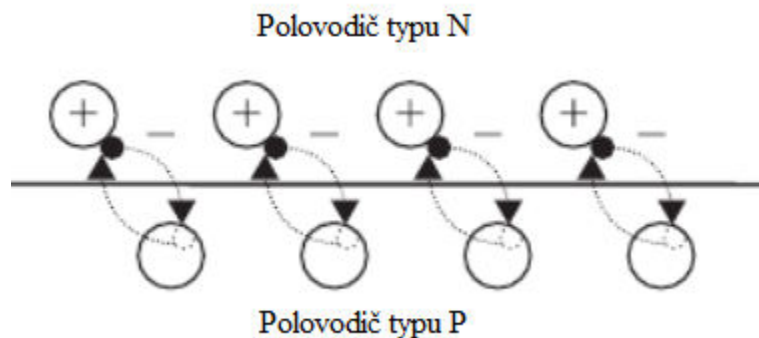


Obr. 1.1.2. Ilustračné schéma polovodiču typu N [6].

Ak nahradíme niektoré atómy v kryštáli kremíka prvkami III. skupiny periodickej tabuľky (B, Al, Ga), vytvoríme polovodič typu P. Tieto prvky majú 3 valenčné elektróny a teda jedna väzba ostáva nezaplnená a chová sa ako diera. V dôsledku dodaní energie, môže do nezaplnenej väzby preskočiť susedný excitovaný elektrón. Diera sa tým pádom môže pohybovať kryštálom. Tieto prvky pomáhajú priťahovať elektróny a preto ich nazývame akceptormi. U PV panelov je takto dopovaná spodná vrstva [4],[5].



Obr. 1.1.2. Ilustračné schéma polovodiču typu P [6].



Obr. 1.1.2. Ilustračné schéma P-N prechodu [6].

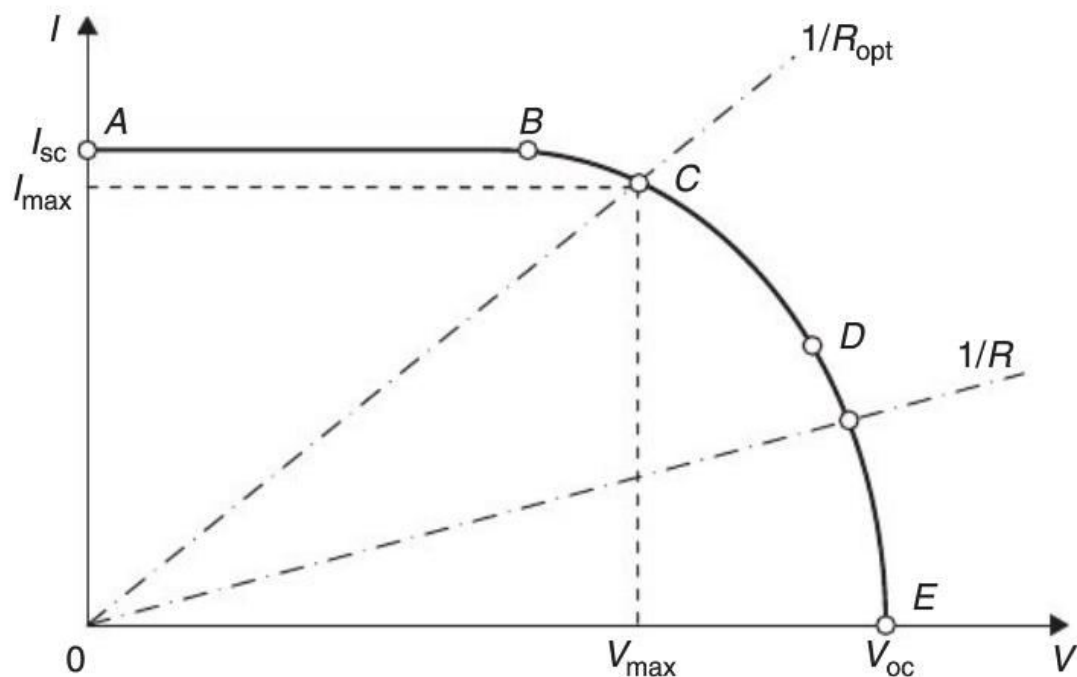
Pokiaľ tieto dva typy polovodičov spojíme, v mieste ich kontaktu vzniká tenká vrstva, ktorá sa nazýva P-N prechod. Keďže polovodič typu P má vyššiu koncentráciu dier a naopak polovodič typu N elektrónov, difundujú elektróny do oblasti typu P a diery do oblasti typu N. Keď elektrón príde do kontaktu s dierou a spoja sa, nastáva takzvaná rekombinácia nábojov. Pohyb častíc na opačnej strane sa hneď zastaví z dôvodu toho, že po elektrónoch ostávajú v polovodiči typu N kladne nabitý náboje a po dierach v polovodiči typu P záporne nabitý náboje. Pevne viazané náboje ionizovaných prímies vytvoria oblasť priestorového náboja a medzi nimi vzniká elektrické pole, ktoré zabraňuje ďalšiemu

prestupu voľných elektrónov. Elektrické pole spôsobuje vychýlenie záporne nabitých častíc k prednej strane PV článku a kladných na spodnú stranu. Opačná polarita vytvára napätie naprázdno U_p , ktoré má hodnotu približne 0,6 V. Takto popísaný prechod sa stáva jednouchou diódou. Bez pripojenia na externé napätie sa navonok chová neutrálne. Zotrúva v dynamickej rovnováhe¹. Po pripojení na zdroj napätia sa rovnováha preruší. Difúzny prúd prevládne nad rekombinačným. Rozdiel týchto prúdov už nebude nulový a výsledný prúd je dodávaný do obvodu. PV článok sa tak stáva zdrojom [5].

1.2 Charakteristika fotovoltaiického článku

Pre charakterizovanie PV článku, ako zdroja elektrickej energie, je nutné zahrnúť 3 veličiny, ktoré ovplyvňujú výkon, a teda aj jeho účinnosť. A to vnútorný odpor, napätie a prúd. I-V charakteristika na obrázku 1.2.1 zobrazuje krivku pre solárny článok pri určitej intenzite slnečného žiarenia G_t a konštantnej teplote článku T_c . Prúd v článku je závislý na intenzite žiarenia a vonkajšom napätí. Z grafu vyplýva, že prúd dosahuje maxima pri nulovom napätí, pri prúde na krátko I_{sc} . Naopak napätie dosahuje maxima pri napätí naprázdno V_{oc} , kedy je prúd nulový a je predovšetkým daný použitím polovodičom. Pri pripojení terminálov PV článku na odpor R , je operačný bod určený priesečníkom I-V charakteristiky a záťažovej priamky [6].

¹ V článku dochádza k neustálej generácii a rekombinácii voľných elektrónov a dier. V materiáli sú vygenerované difúzni a rekombinačný prúd, ktoré sú v rovnováhe.



Obr. 1.2.1. I-V charakteristika solárneho článku [6].

Pokiaľ je odpor malý, pracovný bod sa nachádza v oblasti AB, článok sa stáva zdrojom konštantného prúdu. Ak je odpor naopak väčší, pracovný bod sa nachádza v oblasti DC, kde sa článok správa skôr ako zdroj konštantného napätia, približne rovnému napätiu naprázdno. Maximálny výkon dosahuje v bode C tzv. optimálnom pracovnom bode, kde je odpor optimálny. Maximálny výkon P_{max} , sa potom vypočíta zo vzťahu 1.1. Bod C sa taktiež nazýva MPP (maximum power point). Pre výpočet výkonu v tomto bode platí vzťah

$$P_{max} = I_{max}V_{max}. \quad (1.1)$$

V bode MMP rovnica dostáva ešte jeden parameter, a to FF (fill factor), ktorý sa dá vyjadriť ako

$$P_{max} = I_{sc}V_{oc}FF \quad (1.2)$$

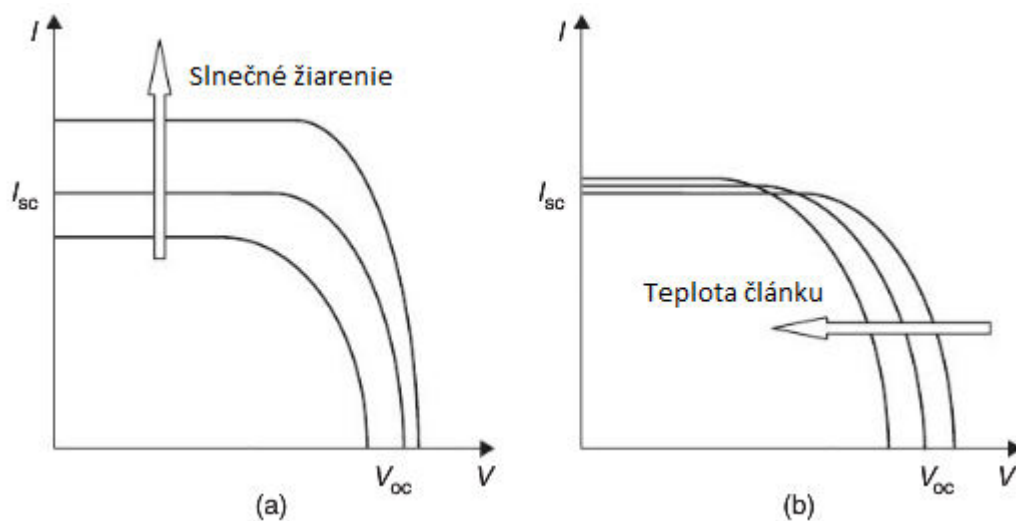
alebo

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{sc}V_{oc}}. \quad (1.3)$$

FF je súčiniteľ skutočnej I-V charakteristiky. Pre kvalitatívne dobré články je FF väčší než 0,7. FF klesá so zvyšujúcou sa teplotou. Charakteristické hodnoty pre priemerný

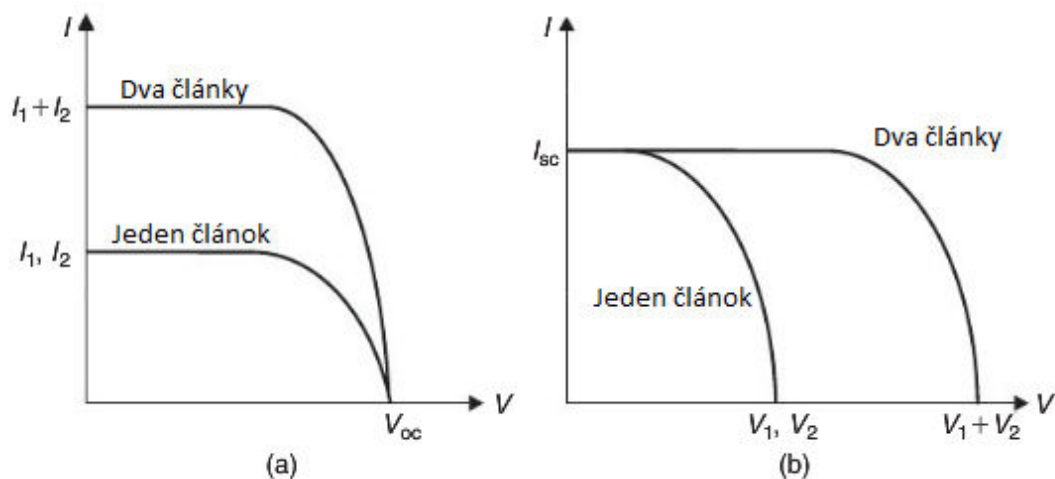
monokryštálový článkoch sú $I_{SC} = 32\text{mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0,58\text{V}$, $V_{max} = 0,47\text{V}$, $FF = 0,72$ a $P_{max}=2,273\text{W}$ [6].

Faktory vplývajúcimi na I-V charakteristiku sú teplota a intenzita slnečného žiarenia. Ako vyplýva z grafu 1.2.2a s rastúcou intenzitou napätie naprázdno rastie logaritmicky, pričom prúd nakrátko rastie lineárne. Vplyv teploty na PV článok je naznačený na obrázku 1.2.2b. Zvyšovanie teploty sa najmarkantnejšie odráža na napätí naprázdno, pričom napätie klesá lineárne, čo má za následok pokles účinnosti. Prúd nakrátko s rastúcou teplotou nepatrne rastie.



Obr.1.2.2. I-V charakteristiku solárneho článku (a), vplyv rastúceho žiarenia (b), vplyv rastúcej teploty [6].

Samotný článok produkuje veľmi malý prúd, a takisto má aj veľmi malé napätie, preto sa v praxi jednotlivé články zapájajú sériovo a paralelne. Takáto zostava sa potom nazýva fotovoltaický modul alebo panel. Obr.1.2.3 znázorňuje 2 identické články a zmenu ich I-V charakteristík pri paralelnom a sériovom zapojení. Pri paralelnom zapojení sa napätie nemení ale prúd sa zvyšuje, a naopak v sérii ostáva prúd rovnaký a napätie sa zvyšuje.

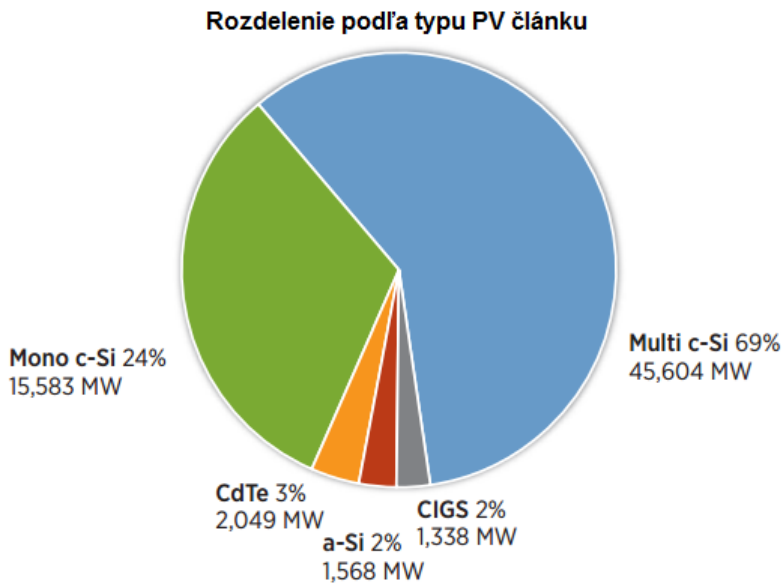


Obr. 1.2.3. Zapojenie dvoch identických článkov (a) paralelne (b) sériovo [6].

Charakteristika, ktorá je dôležitým meradlom pre PV články je konverzívna účinnosť. Účinnosť je definovaná ako podiel maximálneho výsledného elektrického výkonu k dopadajúcemu svetelnému výkonu. Účinnosť sa môže meniť podľa toho, koľko svetla dopadá na článok a akú má teplotu, preto sa účinnosť najčastejšie meria pri teplote článku 25°C , intenzite žiarenia $1000\text{W}/\text{m}^2$, a solárnemu referenčnému spektru AM 1,5 [2],[6].

1.3 Typy fotovaltaických článkov

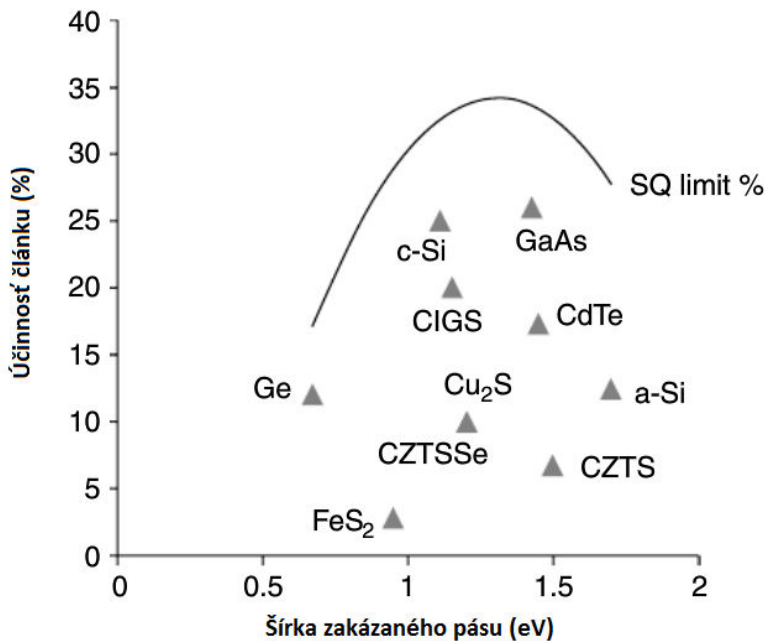
Panely na báze kremíku v dnešnej dobe držia 95% podiel v celosvetovej výrobe. Tento prvok je v našej zemskej kôre vo veľkej miere zastúpený. Jeho relatívne vysoká cena je spôsobená dôrazom na jeho čistotu a kvalitu [5].



Obr. 1.3.1. Koláčový diagram rozdelenia komerčne vyrábaných PV panelov [8].

Najpodstatnejším faktorom vplyvujúcim na účinnosť PV článku je materiál, z ktorého je vyrobený p-n prechod. Predovšetkým to, aká je jeho šírka zakázaného pásu. Teoretickú maximálnu účinnosť pre jedno vrstvomý prechod je daná Shockley–Queisserovým limitom. Tento limit je 30% pre PV články bez koncentrátora a optimálnou šírkou

zakázaného pásu $E_g = 1,30\text{eV}$. V prípade použitia koncentrátora slnečného žiarenia účinnosť dosahuje 40.8%, pri optimálnej šírke zakázaného pásu $E_g = 1,15\text{eV}$. Najbližšie k optimálnej šírke zakázaného pásu má kryštalický kremík a PV články na báze gália s arzénom [7],[9]. Prehľad najlepších dosiahnutých účinností rôznych typov PV článkov obsahuje príloha 1.



Obr. 1.3.2. Závislosť účinností na šírke zakázaného pásu spolu s Shockley-Queisserovým limitom, pre jednovrstvé PV články [9].

1.3.1 Monokryštalický kremík

Monokryštalické články sa radia do prvej generácie a sú typovo najstaršie. Vyznačujú sa dobrou účinnosťou a životnosťou. Monokryštalické panely majú najvyššiu účinnosť spomedzi článkov, založených na báze kremíku. Účinnosť komerčných panelov sa pohybuje okolo 15-17%. Zväčša majú štvorcový tvar so zaoblenými rohmi a hranami dlhými 10, 12,5 až 15 centimetrov. Priemerná životnosť je okolo 25 rokov [2],[5]. Nevýhodou je však, oproti polykryštalickým a amorfným článkom, veľká spotreba kremíku a energetická náročnosť



Obr. 1.3.1.1. Kremíkové ingoty [11]

procesu výroby. Z toho dôvodu patria v zastúpení kremíkových článkov k najdrahším (0,75\$/W). V porovnaní s tenkovrstevnými technológiami výsledný výkon klesá rýchlejšie pri zvyšovaní teploty [10]. Nutne ešte dodať, že účinnosť kremíkových panelov klesá pri nízkych svetelných podmienkach, pričom u tenkovrstevných zostáva skoro konštantná. Monokryštalický kremík sa

vyrába pomocou Czocharlského metódou. Najprv sa čistý kremík roztopí pri teplote 1420°C. Následne sa do taveniny ponorí zárodok monokryštáľa, ktorý sa pomaly vyťahuje a zároveň rotuje. Tento dej prebieha v inertnej atmosfére, napr. v argóne. Týmto procesom vzniká ingot (tyč) o priemere 20 – 30cm, ktorej dĺžka môže dosahovať až niekoľko metrov. Následne sa tak tyč reže na plátky (wafers) s hrúbkou od 300 až 150 μm , pomocou drôtovej píly s paralelne napnutými nerezovými drôtmami alebo na pilách s diamantovým bortom. Takýto spôsob je veľmi stratový a pri rezaní vzniká veľké množstvo odpadu. Recykláciou kremíku a látok použitých pri rezaní (napr. polyetylénglykolu) sa straty z časti kompenzujú. Ďalej sú články lapované aby sa zvýšili ich geometrické parametre. Následne sa články poleptajú, aby sa odstránili zvyšné defekty po lapovaní. Úplne na záver sú panely leštené kombináciou chemických a mechanických procesov, ktoré dávajú článkom ich zrkadlovo lesklý povrch. Alternatíva k tejto metóde je vyťahovanie monokryštalických pásov priamo z taveniny. Táto metóda sa nazýva Ribbon Silicon a je oproti rezaniu ingotu podstatne energeticky a materiálovo menej náročná. Z rovnakého množstva kremíku sa dá vyrobiť dvojnásobná plocha PV článku. A však na úkor ceny sa znižuje účinnosť, ktorá dosahuje okolo 11,5% [2],[5],[6]. Rekord v dosiahnutej účinnosti u monokryštalických článkov drží spoločnosť

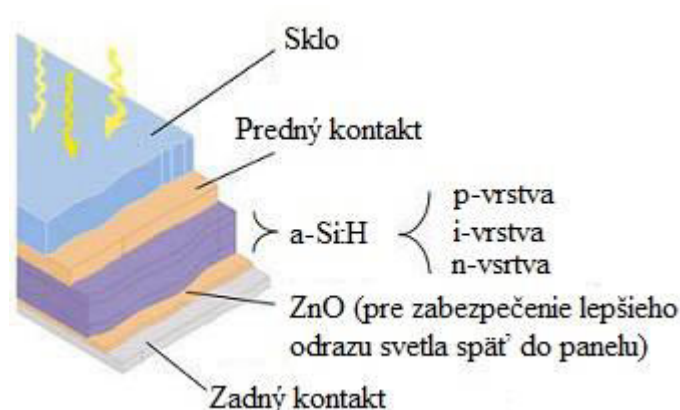
Amonix. Tá v roku 2005 vyvinula článok 92x, ktorý dosiahol za pomoci koncentrátora účinnosti 27,6% [12]. Čo je vôbec najvyššia dosiahnutá účinnosť u PV článkoch, na báze kremíku. Najčastejšie sú využívané na priestorovo obmedzených miestach, kde je nutné dosiahnuť čo najvyšší výkon, ako napríklad strechy domov a komerčných budov.

1.3.2 Polykryštalický kremík

Proces výroby polykryštalického kremíka je podstatne jednoduchší a menej finančne náročnejší ako monokryštalického. Roztavený kremík sa odlieva do štvorcových alebo obdĺžnikových foriem, čo výrazne zjednodušuje proces a eliminuje vznik odpadu. Sú však menej účinné ako monokryštalické, pretože na styku jednotlivých zŕn je väčší odpor. Ich priemerná účinnosť sa pohybuje medzi 13-15%. Spolu s monokryštalickým typom zdieľajú relatívne vysoký tepelný koeficient [10]. Vďaka svojej cene a vysokej účinnosti sú využívané v širokom rozmedzí aplikácii vrátane striech domov a v pozemných montážnych radoch [2],[6].

1.3.3 Amorfný kremík

Najväčší rozdiel od vyššie zmieňovaných typov, okrem štruktúry, je ten, že kremík sa môže ukladať vo forme veľmi tenkých vrstiev na sklenené, nerezové alebo plastové podložky. Líšia sa aj svojou konštrukciou. Na vrchnej strane sa nachádza tenká p-vrstva, pod ňou sa nachádza ďalšia tzv. i-vrstva, ktorá nie je dopovaná, a práve v tejto vrstve dochádza k maximálnej absorpcii. Nakoniec sa umiestňuje n-vrstva a zadný kontakt [6].



Obr. 1.3.3.1. Schéma a-Si:H PV panelu [14]

typu najefektívnejšie absorbujú svetlo, pričom už 1mm pohltnú 90% slnečného žiarenia [2]. Táto vlastnosť umožňuje vyrábať veľmi tenké články. Amorfný kremík pomerne dobre absorbuje pásмо modrého svetelného vlnenia počas zatiahnutej oblohy. Tak, že vo všeobecnosti počas roka vyprodukujú viac elektriny ako kryštalické PV panely

pri rovnakom maximálnom menovitom výkone. Zo všetkých komerčne predávaných PV

panelov, sú tie kremíkové najmenej ovplyvňované zvyšovaním teploty. Ich tepelný koeficient je iba okolo $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ [6]. Pre svoju nepravidelnú štruktúru sa v materiáli vyskytuje veľa porúch, čo spôsobuje rekombináciu nábojov, a tým znižuje účinnosť konverzie. Amorfny kremík obsahuje vodík, ktorý zvyšuje vodivosť materiálu. Avšak vodík v štruktúre z časti napomáha rýchlejšej degradácii materiálu, ktorý je pre tieto PV články charakteristický. Ten najskôr rýchlo klesá a ustáľuje sa na 80% svojej pôvodnej účinnosti. Ich konverzívna účinnosť sa pohybuje iba okolo 6-8% [10]. Vďaka svojej nízkej cene, sú používané v širokej škále aplikácií, a však čelia zvyšujúcej sa konkurencii, zo strany iných typov tenkovrstvých článkov, ktoré dosahujú väčších účinností. Vyššia účinnosť sa dosahuje kombináciou s vrstvami polykryštalického kremíku alebo jeho variant. Tento hybrid má vlastnosti amorfných a polykryštalických panelov, jeho účinnosť dosahuje 9-10% [2]. Vďaka svojej pružnosti sa používajú krycie fólie na strechy alebo sa dajú našiť na oblečenie. Najvyššej účinnosti sa podarilo dosiahnuť japonskému inštitútu AIST. Stabilizovaná účinnosť dosiahla 13.6%. Jednalo sa o 3-vrstvovú štruktúru $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ [13].

1.3.4 Telurid kadmia (CdTe)

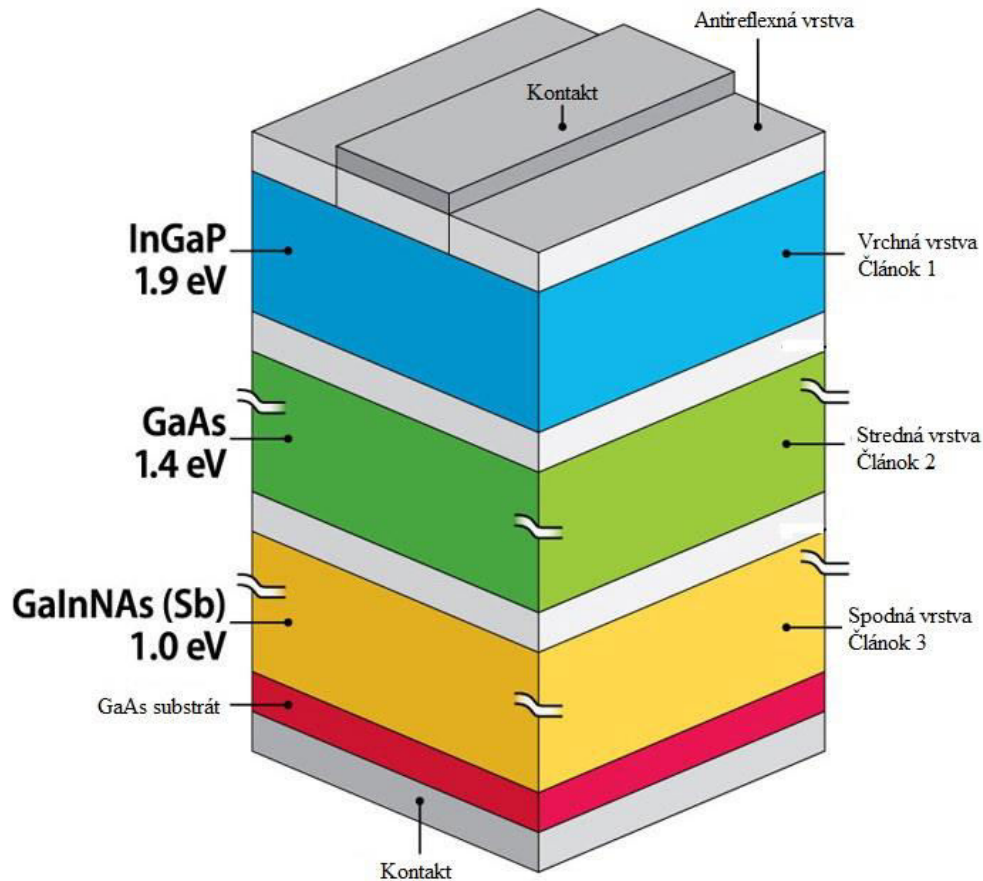
Obchod s tenkovrstvými článkami bol vo veľkej miere vytvorený jediným výrobcom, firmou First Solar. Ich výroba je energeticky úsporná a je vhodná pre sériovú manufaktúru. Aj keď ich cenová výhoda upadáva z dôvodu lacného kremíku vyrábaného v Číne, stále si udržiava svoju pozíciu na trhu s cenou pod $0,75\$/\text{W}$ a produkciou 2GW za rok. Ich účinnosť sa pohybuje medzi 10-11% [6],[10]. Rekord v účinnosti dosiahla First Solar v roku 2014 a to 22,1% [15].

1.3.5 Diselenid medi a india (CIS)

Majú polykryštalickú štruktúru, a tak ako všetky tenkovrstvé sa vyznačujú vysokou absorpciou 99 % svetla, ktoré je pohltené v prvom mikrometri hrúbky. Vyrábaný je aj variant, kedy sa do materiálu pridáva gálium (CIGS), ktoré dosahuje vyšších účinností. Ich elektrické vlastnosti ležia medzi CdTe a kryštalickým kremíkom. Majú nízky tepelný koeficient a ich priemerná účinnosť sa pohybuje okolo 10 -13% [2],[10]. Rekord v účinnosti drží nemecký ZSW, ktorý dosiahol 22.6%, čím predbehol o 0.3% článok vyrobený v Japonsku. ZSW spravil rekord už po 5-krát v histórii [16].

1.3.6 Viacprechodové štruktúry (Multijunction)

U článkov s jedným p-n prechodom závisí účinnosť jednak na tom, akú časť slnečného spektra dokážu využiť a na tom, koľko energie dokážu premeniť na elektrickú energiu a koľko na teplo. To, akú časť dokáže využiť, určuje šírka zakázaného pásu. Ak je šírka



Obr. 1.3.6.1. Schéma 3-vrstvového PV článku [17].

zakázaného pásu nízka, dokáže využiť väčšiu časť svetelného spektra, a však za cenu nižšieho napätia, a teda nižšej účinnosti. Na druhú stranu ak má šírku zakázaného pásu vyššiu, má aj väčšie napätie, a však nie sú využité všetky fotóny. Šírka zakázaného pásu musí byť tým pádom optimálna, aby bolo dosiahnuté najvyššej účinnosti. Najbližšie k optimálnej šírke sú monokryštalické články. Pre družice mimo zemskú atmosféru sú to články na báze GaAs. U viacvrstvových článkoch je každá vrstva optimalizovaná tak, aby zachytávala určitú časť spektra, čím sa dosahuje lepšie využitie dopadajúceho žiarenia. Fotóny, ktoré majú menšiu energiu než je šírka zakázaného pásu, prechádzajú bez zachytenia. U fotónov, ktoré majú väčšiu energiu, sa využije len časť energie a zvyšok sa premení na teplo. Tieto PV články sú teda navrhnuté tak, že vo vrchných vrstvách je polovodič, ktorých zachytáva fotóny s vyššou energiou a prepúšťajú fotóny s nižšou

energiou, ktoré sú zachytávané vo vrstvách pod ňou. Využívané materiály sú intermetalické zlúčeniny III. a V., skupiny ako napríklad InP, GaSb a GaAs. Vrstvy zachytávajú a premieňajú na elektrickú energiu vlnové dĺžky od 300 do 1750nm. Články sa používajú v kombinácii s koncentrátormi pre dosiahnutie vyššej účinnosti, za použitia čo najmenej plochy z dôvodu vysokej ceny článkov. Teoretická účinnosť viacvrstvových článkov dosahuje až 87%, a však priblížení sa k tejto účinnosti, by články potrebovali nie len niekoľko podčlánkov, ale aj optimálne polovodiče, ktoré by poskytli kombináciu zakázaných pásov, takých aby pokryli čo najviac svetelného spektra [2],[6].

Tabuľka 1.2.6.1 Závislosť maximálnej teoretickej účinnosti počtu vrstiev PV článku a použitia koncentrátora [7].

Koncentrátor	Počet vrstiev PV článku	Maximálna účinnosť(%)
Bez použitia koncentrátora	1	31,0
	2	42,9
	3	49,3
	...	
	∞	68,2
S použitím koncentrátora	1	40,8
	2	55,7
	3	63,9
	...	
	∞	86,8

Dnes sú vo vývoji a testovaní najmä 3 až 4-vrstvové články, pričom sa overujú 6-vrstvové. Rekord v účinnosti drží nemecký inštitút Fraunhofer ISE, ktorý v roku 2014 dosiahol konverzívnej účinnosti 46%. Pričom tejto účinnosti bolo dosiahnuté s pomocou koncentrátora, a to Fresnelovej šošovky [18].

1.3.7 Alternatívne materiály

Vývoj polymérových a organických článkov predstavuje alternatívu pre výrobu PV článkov. Lákavé sú predovšetkým lacnou výrobou, v porovnaní s kremíkovými článkami. Avšak ich nevýhodou je veľmi nízka účinnosť, ktorá dosahuje približne 5% a ich nestabilita

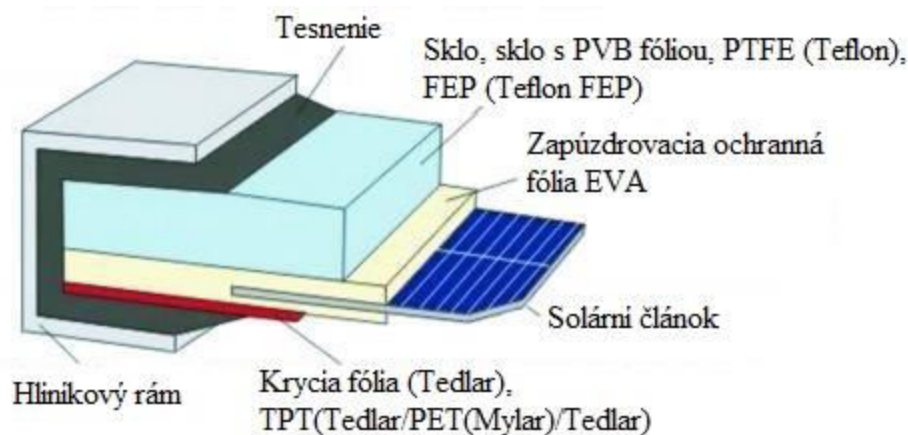
a problémy s degradáciou. Organické materiály sú atraktívne v dôsledku relatívne jednoduchej výroby. Ďalšími výhodami je možnosť výroby tenkých, flexibilných panelov, ktoré môžu nájsť využitie v rôznych aplikáciách alebo stavebných materiáloch a v ladení ich farby pomocou zmeny ich chemickej štruktúry.

Ďalším typom sú takzvané nano-PV, ktoré sa radia do 3. generácie PV článkov. Namiesto vodivých materiálov a skleneného podkladu, sa nano-PV zakladá na povlakovaní alebo miešaní flexibilného polymerového podkladu, spolu s elektricky vodivým nano-materiálom. Tento typ PV článku by mal byť komerčne dostupný na trhu v najbližších rokoch, čím by sa radikálne znížila cena PV panelov [2],[6].

1.4 Štruktúra modulu

Pre zabezpečenie čo najdlhšej životnosti musia byť PV panely veľmi dobre chránené pred mechanickým poškodením, znečistením a koróziou. Panely vo svojom pracovnom prostredí musia odolávať soli, piesku, prachu, snehu, kondenzácii, vyparovaniu vlhkosti a zmene teplôt.

Predná strana článku je zväčša pokrytá sklom s nízkym obsahom železa, pre lepší prechod krátkovlnovej časti svetleného spektra. Sklo zaručuje modulu fyzickú ochranu pred extrémnymi podmienkami ako napr. krúpy alebo dážď. U tenkovrstvých článkov je dôraz kladený na ich flexibilitu, a preto sa sklo v tomto prípade nepoužíva a nahrádza sa napríklad plastovými fóliami. Pod sklo sa pomocou vákuového naparovania nanáša antireflexná vrstva, ktorá zabraňuje odrazom slnečného žiarenia. Zadná strana panelu môže byť vyrobená z rozličných materiálov. Najčastejšie využívaná je fólia Tedar, aj keď môžu byť použité plastové podklady. Pokiaľ je požadovaná priepustnosť, je možné použiť ako aj Tedar, tak aj druhý najpoužívanejší spôsob, a to sklo. Štruktúra sklo-sklo je populárna pri aplikáciách v architektúre, najmä pre zabudované fasády a strechy. Samotný solárny článok je vložený medzi izolačné vrstvy. Izolačné vrstvy musia zabezpečiť dokonalú tesnosť a zabrániť tým pred prenikaním vlhkosti, ktorá zapríčiňuje koróziu a skrat. Najčastejšie



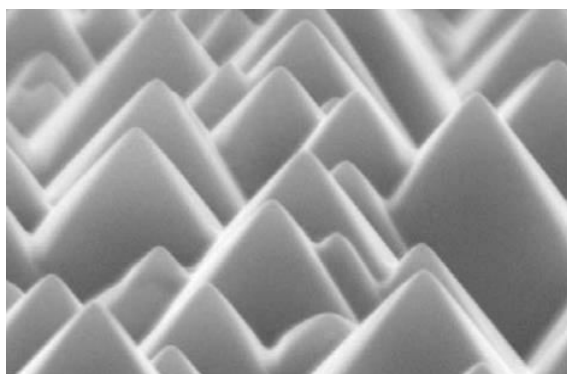
Obr. 1.4.1. Schéma konštrukcie PV panelu [20].

používanou tesniacou vrstvou je fólia EVA (Etylénvinyl acetátového polyméru), ktorá sa na panel nanáša vo vákuovej komore. V malom meradle sa používa aj Teflon, ktorý nevyžaduje prednú ochrannú vrstvu skla. Celý panel je potom usadený do pevného rámu, ktorý zaručuje ochranu pred silným vetrom, deformáciami a prípadným prasknutím [2],[6],[19].

1.5 Možnosti zvýšenia účinnosť

1.5.1 Optické straty

K prvým stratám na solárnom panely dochádza pri dopade slnečného žiarenia na povrch článku. Pri dopade sa určitá časť svetla odrazí od povrchu. Aby sa odrazom zabránilo články sú pokryté tenkou antireflexnou vrstvou. Na povrchu môžu byť vytvorené štruktúry,



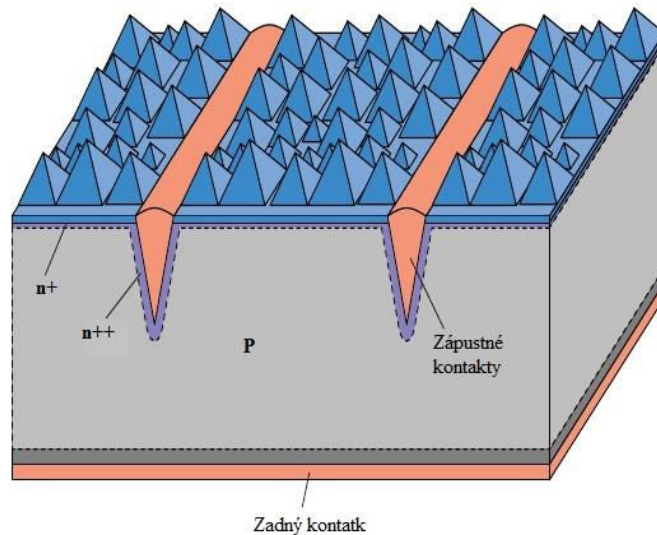
Obr. 1.5.1.1. Pyramídová textúra pod miktroskopom [19].

pomocou ktorých, je fotónom uľahčený vstup do PV článku. Tieto štruktúry môžu mať tvar pyramídy alebo polgule. Pri použití pyramídových štruktúr klesá nežiadúca reflexia z 30% na 11%. Zníženie optických strát je možné dosiahnuť aj znížením absorpcie svetla na kontaktoch zadnej strany panelu. Svetlo sa môže odraziť od zadného panelu náhodnými smermi. Fotóny sú tak uväznené v paneli, čím sa dramaticky zvýši ich absorpcia [19].

1.5.2 Predné kontakty

Metalické kontakty sú nevyhnutné pre zber prúdu vygenerovaného PV článkom. Spodné kontakty v tomto prípade nepredstavujú problém, avšak vrchné čiastočne zatieniajú prednú stranu. Možnosťou ako minimalizovať tento problém sú napríklad zápustné kontakty. Proces ich výroby spočíva v laserovom gravírovaní drážok a zapustení kontaktov. Výhodou tejto metódy sú [19]:

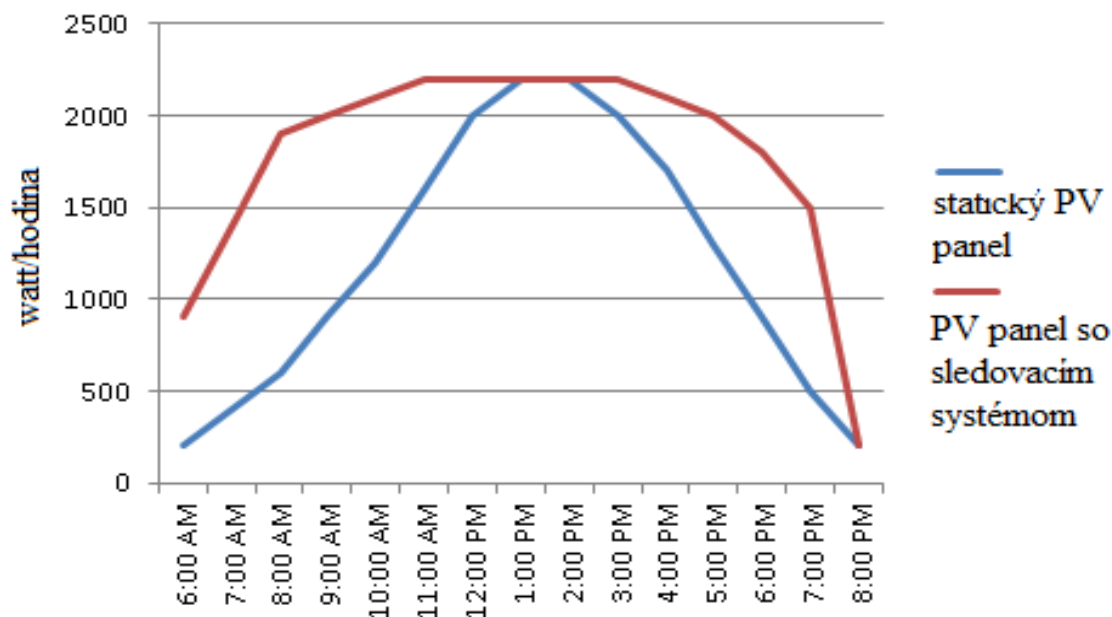
- Veľmi tenké kontakty, ktorých šírka dosahuje 20 μ m.
- Redukcia strát tienením na 2-3%.
- Zvýšenie Fill Factoru vďaka zníženiu odporu v kontaktoch



Obr. 1.5.2.1. Schéma zápustných kontaktov [21].

1.5.3 Natáčanie solárnych panelov

Pre zvýšenie účinnosti môžu byť PV panely zasadené do jedno alebo dvoj-osých pohyblivých stojanov, ktoré sa otáčajú tak, aby slnko dopadalo kolmo na panel. Vďaka jedno-osím stojanom sa celoročný výkon zvýši o 25%, oproti panelom s pevným stojanom. Čo je dôležitejšie, zvyšuje sa výkon v popoludňajších hodinách, keď je zvýšená spotreba elektrickej energie. Vďaka dvoj-osiemu natáčaniu je výsledný výkon o 5 – 10% väčší. Tieto systémy sú viac mechanicky náročné a zväčša sa používajú pri paneloch, ktoré používajú koncentrátory, ktoré vyžadujú náležitý uhol dopadu pre čo najefektívnejšie fungovanie. Ovládanie natáčania je automatické a zväčša má počítač uloženú polohu slnka, v danom okamžiku v pamäti alebo systém na polohu slnka reaguje priamo. Jedno-osie natáčacie systémy sa zväčša používa pre vysokoúčinné panely, vyrobené z kryštalického kremíku, k dosiahnutiu čo najvyššej účinnosti. Pre tenkovrstvé moduly sa natáčacie systémy nevyužívajú z dôvodu ich nízkej účinnosti, a však môžu sa vyskytovať kvôli podnebiu, v ktorom sú situované. Napríklad v púštnych oblastiach, kde tenkovrstvé články dosahujú



Obr.1.5.3.1. Porovnanie výkonov počas dňa pre statické panely a panely so sledovacím systémom [22].

väčších výkonov oproti tým z kryštalického kremíku. Tento fakt je zapríčinený tým, že tenkovrstvé články sú odolnejšie voči vysokým teplotám. Nevýhodou natačacích systémov je ich zložitosť, vysoká cena a panely sú viac zaťažené vetrom. Iba malý počet panelov môže byť umiestený na jeden stojan a väčšie rozostupy medzi panelmi sú potrebné z dôvodu toho, že panely môžu zatieňovať tie susedné. Nastáva teda problém, že aj cez to, že natačanie síce zvyšuje výkon na jeden panel, a však znižuje výkon vyrobený na jednotku plochy Zeme [2],[6],[19].

1.5.4 Koncentrátory slnečného žiarenia

Ďalšou možnosťou ako výrazne zvýšiť účinnosť je koncertovať slnečné žiarenia na malý vysokoúčinný článok pomocou šošoviek alebo zrkadiel. A však táto technológia sa v komerčnej sfére takmer nevyskytuje. Svoj význam predstavuje najmä pre moduly vyrobené z viacprechodových štruktúr, ktoré sú omnoho drahšie ako akékoľvek moduly založené na iných bázach. Z toho dôvodu je veľmi výhodné využiť koncentrátory, ktoré umožňujú rovnakú produkciu za použitia menšej plochy PV článku. Svoje využitie nachádzajú najmä pre vesmírne plavidlá. Výhody koncentrátorov:

- Nahradzujú drahé materiály PV článkov s lacnejšími zrkadlami, reflexnými materiálmi alebo šošovkami.

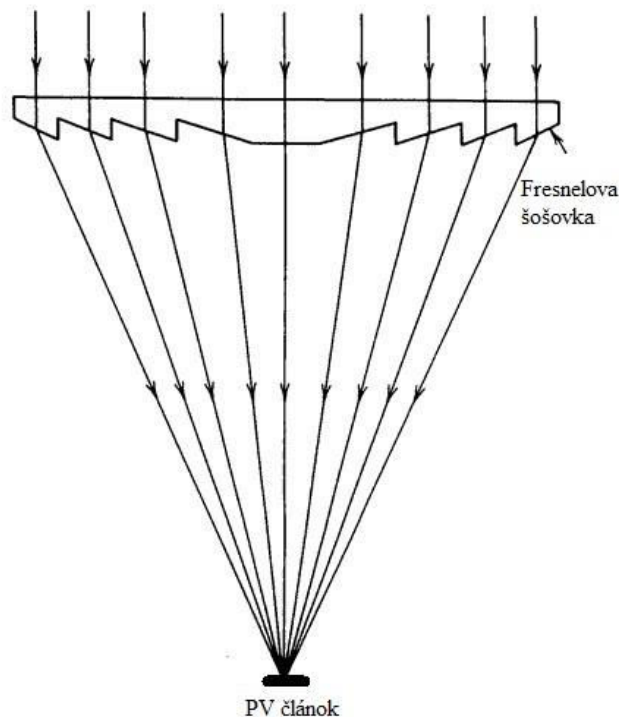
- Zvyšujú účinnosť pri vysokom slnečnom žiarení.
- Za pomoci dvoj-osých natáčacích systémov produkujú elektrinu od východu slnka, ktorá sa počas dňa zvyšuje.
- Koncentrujú veľké množstvo energie na danú plochu.

Nevýhody koncentrátorov:

- Pri koncentrovaní slnečného žiarenia sa zvyšuje teplota, čo má za následok pokles účinnosti.
- Koncentračné systémy nie sú schopné využiť difúzne svetlo. Dokážu využívať iba priame slnečné žiarenie.
- Pri použití koncentrátora musí byť použitý dvoj-osí natáčací systém. Platí, že čím vyššie koncentrácie, tým musí byť vyššia presnosť.
- Pri použití dvoj-osieho natáčacieho systému je vyžadovaná relatívne väčšia plocha, čím sa znižuje výkon na jednotku plochy.

Koncentrátory sa dajú rozdeliť podľa funkcie na zrkadlové a šošovkové. Medzi zrkadlové patria napríklad parabolické a rovinné. Výhodou u rovinných je ich jednoduchá výroba, a však dosahujú iba nízku koncentráciu, a to približne 1,4 krát. Pri parabolickom zrkadle je dosiahnutý vyšší stupeň koncentrácie, čo umožňuje úsporu plochy PV článku. U parabolického zrkadla je potreba zaistenia chladenia, ktoré predchádza znižovaniu účinnosti a životnosti PV článku. Teplo odobrané z článkov, môže slúžiť napríklad na ohrev alebo predohrev vody.

Najrozšírenejší zástupca pre šošovkové koncentrátory je Frenselova šošovka. Tento typ šošovky dosahuje 300 až 500 krát násobné koncentrácie. U takých koncentrácií musí byť zaručené rovnomerné rozloženie žiarenia, aby sa predišlo k prehrievaniu určitých miest, čo by mohlo viesť k zničeniu článku. Tento typ je najviac využívaný pre vysoko prechodové články [2],[6],[19].



Obr. 1.5.4.1. Schematické zobrazenie PV článku spolu s Fresnelovou šošovkou [23].

1.6. Pomocné zariadenie

Pre celkové zhodnotenie bilancie PV článkov, je potrebné brať do úvahy aj komponenty, ktoré musí solárny systém obsahovať na výrobu elektriny, nepočítajúc sledovače alebo koncentrátory. To aké vybavenie je potrebné, záleží na funkcii, ktorej elektrinu dodávajú. Pre určité potreby ich je nutné využiť viac a pre určité funkcie, ako je napríklad čerpanie vody, nepotrebujeme skoro žiadne. Tieto zariadenia predstavujú veľký vplyv pre výslednú cenu, ekologickú záťaž a energetickú bilanciu. Pre reálny modul platí, že jeho výsledná účinnosť je v skutočnosti o niečo menšia než jeho jednotlivé články, na čom majú zásluhu práve komponenty potrebné na zabezpečenie ich chodu. Napríklad pre nabitie 12V olovenej batérie je nutné zaistiť, aby modul generoval maximálne napätie $V_{\max}=18V$. A to z nasledujúcich dôvodov [19]:

- Približne strata 2,4V nastáva pokiaľ teplota článku dosahuje $60^{\circ}C$.
- Pokles 0,6V nastáva na blokovacej dióde.
- Strata 1V nastáva v regulátore.
- Batérie musia byť nabité na 14 až 14,5V aby dosiahli plne nabitého stavu.

1.6.1 Batérie

Ostrovne systémy (stand-alone alebo grid off) sú znateľne cenovo náročnejšie. Jedným z hlavných dôvodom sú práve batérie. Batérie sú veľmi nákladné komponenty, ktoré u niektorých typov môžu tvoriť 40 – 60% ceny. Dôvodom je ich životnosť, ktorá sa pohybuje medzi 5-10 rokmi. Batérie majú účel skladovania energie či už z hľadiska dlhodobého (zabezpečiť chod počas dlhšie trvajúcich nepriaznivých podmienok), alebo krátkodobého (efektívna distribúcia počas 24 hodín). Základnými požiadavkami na batérie je ich výdrž, na opakované hlboké vybijanie a nabíjanie, dlhá životnosť, nízka údržba a vysoká účinnosť pri nabíjaní. Najbežnejšími typmi batérii sú [2],[6],[19]:

- Olovnaté akumulátory. Patria k najpoužívanejším typom batérií pre ostrovne systémy. Batérie sú vyrábané v rôznych variantoch. Klasické staničné batérie pozostávajú zo separátnych 2V článkov. Ich výhodou je ľahká údržba, pričom sa pri poruche vymieňajú iba jednotlivé poškodené články. Ich nevýhodou je väčšia váha a priestor, ktorý je nutný pre odvetrávanie vzniknutých plynov. Síce nutná ale relatívne jednoduchá údržba spočíva v dolievaní voľu a kontrolovaní jednotlivých článkov. Pre menšie autonómne systémy sa používajú šesťčlánkové 12V batérie. Ich výhodou je nižšia cena a kompaktnosť. Nevýhodou je náročná oprava v prípade pokazení jedného z článkov.
- Nikel kadmiové akumulátory. Tento typ je používaný najmä pre domáce spotrebiče ale svoj potenciál má aj pre PV systémy, a však využívaný je veľmi zriedka. Sú najlepším adeptom pre PV systémy v chladných pásmach. Dokážu pracovať pri veľmi nízkych teplotách a pri eventuálnom zmrznutí ostáva batéria bez poškodenia. V porovnaní s olovnatými akumulátormi majú dlhšiu životnosť. Na druhú stranu ich nevýhodou je pre nich, typická „ pamäť“, čo znamená zníženie kapacity z dôvodu nabíjania, nie z celá vybitie batérie. Majú veľmi nízku energetickú účinnosť a nízke napätie článku, z dôvodu čoho je potrebný vyšší počet článkov k dosiahnutiu potrebného napätia.
- Lítium-iontové akumulátory. Tento typ je bežne používaný v prenosných zariadeniach ako sú napríklad počítače, mobily, tablety a mnohé ďalšie. Poskytujú relatívne vysoké napätie 3V. Medzi nevýhody patrí vysoká reaktivita lítia, čo predstavuje riziko vzniku požiaru a musí byť taktiež zabezpečená ochrana proti prebíjaniu, nadmernému vybitiu, nadprúdom a vysokým teplotám ktoré, im znižujú životnosť.

- Superkondenzátory. Ich princíp nie je založený na chemických reakciách ale energia sa ukladá vo forme elektrostatického poľa. Tri z ich prednostných výhod sú dlhá životnosť, nízky vnútorný odpor, čo ich robí vhodnými pre vysoko výkonné zariadenia a veľký vybíjajúci prúd. Nie sú vhodné pre stredne a dlhodobé akumulácie, z dôvodu rýchleho sebavybíjania. Použité nachádzajú tam, kde je potrebné dosiahnuť vysoké výkony, ako napríklad u hybridných áut.

1.6.2 Invertory

Fotovoltaické články generujú jednosmerný prúd, v prípade ktorého transformácia napätia nie je jednoduchá. Preto sa musí najskôr prúd pomocou invertorov premeniť z jednosmerného na striedavý s požadovanou hodnotou napätia (pre veľké fotovoltaické inštalácie, ktoré dodávajú do siete 240V a viac). Zo strany rozvodných závodov sa kladú vysoké nároky na priebeh napätia, hľadisko časového priebehu, obsah vyšších harmonických frekvencií a pod. Meniče premieňajú priebeh napätia na sínusový tvar. Kvalitatívne a cenovo sa rozdeľujú podľa toho, ako sa premenovaný tvar sínusoidy približujú. Tie najdrahšie a najlepšie vytvárajú sínusoidu, a však tie lacnejšie verzie ju aproximujú napríklad stupňovitou krivkou, obdĺžnikmi alebo lichobežníkmi, čo už je neprijateľné pre rozvodnú sieť. Na správnom nadimenzovaní invertoru je potom závislá aj konečná účinnosť [2],[6].

1.6.3 Záložný zdroj

Nevýhodou solárnych inštalácii je, že pri dlhodobo nižších svetelných podmienkach najmä v zime, je nutné pre off-grid systémy uvažovať aj o záložnom zdroji. Najčastejšie využívané sú elektrocentrály so spaľovacím motorom. Značnou nevýhodou je, že takto vyrobená energia je drahá. Ďalšou je tá, že je hlučná, vyžaduje určitú obsluhu a produkuje výfukové plyny. Jednou z elegantných variant pre malé domy a chaty je Šterlingov motor pripojený ku krbu. Popri vytápaní sa generuje aj elektrická energia. Výrobou Šterlingových motorov sa venuje americká spoločnosť SUNPOWER [2].

1.7 Desert Sunlight Solar Farm

Desert Sunlight Solar Farm je fotovoiltaická solárna elektrárňa, ktorá stojí v Mohavskej púšti v Californii, USA. Proces plánovania začal v roku 2007 firmou First Solar, ktorá ho následne predala v 2011, v čase keď začala stavba elektrárne spoločnosťami NextEra Energy Resources, GE Financial Services a Sumitomo. Proces výstavby bol rozdelený na dve fázy. V prvej fáze bola inštalovaná kapacita 300MW a v druhej 200MW, čo dokopy dáva kapacitu 500MW. S touto hodnotou držala rekord najväčšej solárnej elektrárne sveta až do júna 2015, kedy ju predbehla taktiež Kalifornská elektrárňa s kapacitou 579MW. Táto elektrárňa je schopná zásobovať 160 000 domácností. Za jeden rok zníži o 300 000 ton CO₂ emisií, čo je ekvivalent 60 000 áut. Vec, ktorá odlišuje Desert Sunlight je tá, že v tomto prípade boli použité moduly na báze telúru kadmia namiesto klasických panelov vyrobených z kryštalického kremíku. Celá elektrárňa pozostáva z 8 miliónov solárnych panel. Na začiatku First Solar počítali s účinnosťou 10,7% a výkonom 77,5W a však počas projekcie zvýšili účinnosť na 13,5% a výkon 97,5W, a čo v konečnom dôsledku pomohlo ušetriť 300 akrov [24],[25].



Obr. 1.7.1. Elektrárňa Desert Sunlight Solar Farm [26].

2. Tepelné solárne systémy

Solárne tepelné systémy sú priekopníkmi vo využívaní solárnej energie. Už v 18. storočí boli solárne pece používané na tavenie železa a medi, pričom ako koncentrátoary používali leštené železo, šošovky a zrkadlá. Medzi najvýznamnejšie príklady patrí parou poháňaný tlačiarenský lis, predstavený na výstave v Paríži francúzskym vynálezcom Mochout-om v roku 1872. Tento stroj za pomoci koncentrátov dodával paru pre tepelný motor. Na začiatkoch mali tieto systémy len malú škálu využitia a slúžili napríklad na pumpovanie vody, pričom ich výkon sa pohyboval okolo 100kW. Počas posledných 40 rokov boli vyvinuté mnohé rozsiahle projekty, ktoré prispeli ku komercializácii solárnych elektrární, ktoré dosahujú kapacity 30 – 80MW. Táto kapitola sa zaoberá výrobou mechanickej a následne elektrickej energie zo slnečného žiarenia, za použitia koncentrátorov a tepelných motorov. Cena koncentračných systémov je oveľa nižšia než PV systémov, a však ich využiteľnosť a rentabilita je iba pri aplikáciách väčších rozmerov. Koncentračné solárne elektrárne (CSP- concentrating power plant) používajú zrkadlá na generovanie vysokých teplôt, ktoré ohrievajú médium, ktoré následne roztáča turbínu tepelného motoru. Dôležitou úlohou pri solárnych systémoch je optimalizácia teploty. Účinnosť tepelného motoru stúpa s rastúcou teplotou, a však u koncentrátov sa účinnosť s rastúcou teplotou znižuje [6],[27]. Systémy sa dajú rozdeliť na vysoko teplotné, medzi ktoré patrí parabolický žľab, solar dish systémy, slnečné koncentračné veže a Fresnelove lineárne koncentrátoary. Medzi nízko teplotné zaradujeme solar pond a veže typu solar updraft. Komerčne využívané sú iba technológie parabolického žľabu a solárne veže.

Tabuľka 2.1 Charakteristika rôznych typov CSP [6],[28].

	Parabolický žľab	Solárna veža	Solar Dish	Fresnelove koncentrátoary
Kapacita (MW)	10-200	10-150	0,01-0,04	10-200
Operačná teplota (°C)	150-400	300-1200	300-1500	150-400
Koncentrácia	70-80	300-1000	<3000	25-100
Solar to electric účinnosť(%)	10-16	10-22	16-29	8-12
Termálny cyklus	Rankinov	Rakinov Braytonov	Stirling	Rankinov
Spotreba vody	Vysoká	Vysoká	Nízka	Stredná

2.1 Konverzívna účinnosť cyklov

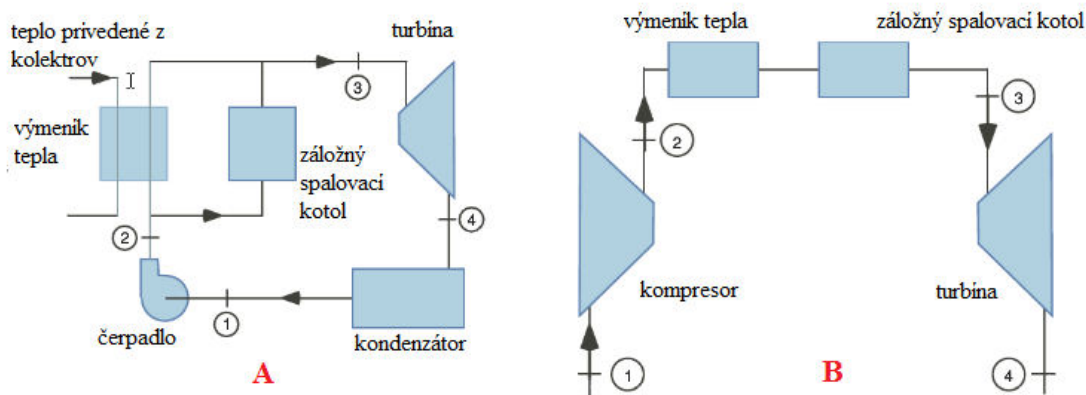
Termálna účinnosť vysoko teplotných cyklov sa pohybuje medzi 30 – 40%, čo je omnoho vyššia účinnosť než u PV článkov. Celková účinnosť systému tzv. solar to electric účinnosť, je definovaná, ako celková vyprodukovaná elektrická energia ku dopadajúcemu slnečnému žiareniu. Táto účinnosť je oveľa nižšia než konverzná účinnosť tepelných cyklov. Solar to electric sa dá vyjadriť ako produkt jednotlivých účinností v každom kroku konverzie, a to nasledovne:

- Optická účinnosť koncentrátorov η_{opt} .
- Účinnosť konverzie slnečného žiarenia na teplo v absorbéře η_{abs} .
- Účinnosť konverzie tepla na elektrinu η_{cyk} .

$$\eta = \eta_{opt}(C) \cdot \eta_{abs}(C, T_{abs}) \cdot \eta_{cyk}(T_{abs}) \quad (2.1)$$

Z rovnice 2.1 vyplýva, že účinnosť závisí najmä na 2 hlavných parametroch, a to na leveli koncentrácie C a teploty pracovného média v absorbéře T_{abs} . Zvýšenie koncentrácie zvyšuje η_{abs} (znižuje veľkosť absorbéru, ktorá je zodpovedná za straty) ale na druhú stranu znižuje η_{opt} . Obdobne zvýšenie teploty T_{abs} zvyšuje účinnosť tepelného cyklu η_{cyk} , avšak znižuje účinnosť absorbéru η_{abs} . Z toho dôvodu je nutné veľmi presné dimenzovanie a optimalizovanie C a T_{abs} pre najlepšiu účinnosť elektrárne.

Medzi najpoužívanejšie cykly solárnych tepelných elektrární je Rankinov s parnou turbínou a Braytonov cyklus s plynovou turbínou. Oba sú schematicky zobrazené na obrázku 2.1.1. V oboch cykloch najprv prebieha kompresia (1-2) a následný ohrev (2-3) priamo alebo nepriamo solárnym žiarením. Ako je vidieť na obrázku do systému môžu byť



Obr. 2.1.1. Schéma elektrárne, Rankinov cyklus – A, Braytonov cyklus – B [27].

paralelne napojený kotol na fosílne palivo. Ohriate médium následne expanduje v turbíne (3-4) a produkuje mechanickú prácu, čím je roztočená turbína, ktorá generuje elektrinu. Časť tepla, ktorá je nie premenená na prácu sa odvádza v kondenzátore (Rankin, 4-1) alebo je výfukovými prúdmi odvedená preč (Brayton, otvorená slučka, 4). Jednou z možností je takzvaný kombinovaný cyklus, ktorý využíva odpadové teplo Braytonovho cyklu (4) k ohrevu pary Rankynovho cyklu. Takto sa využije väčšia časť tepla a dosiahne sa vyššia účinnosť. Parné turbíny sú dostupné vo veľkom spektre výkonov, od niekoľko jednotiek MW až po stovky MW. Pre vzduchové turbíny to môže byť od 60kW až po stovky MW. Z pravidla väčšie turbíny v oboch kategóriách dosahujú vyšších účinností. Pre kombinovaný cyklus je potreba práve turbíny väčších rozmerov.

Jednou z ďalších možností je Stirlingov motor. Tento cyklus je dostupný pre malé výkony okolo 25kW. Stirlingov motor dosahuje veľmi dobré účinnosti iba pre aplikácie malého merítka, na rozdiel od Braytonovho a Rankinovho cyklu, ktoré dosahujú lepších účinností iba pri aplikáciách väčších rozmerov. Stirling vychádza v porovnaní s parnou a vzduchovou turbínou drahší na jednotku výkonu. Limitácia účinnosti cyklov je Carnotova účinnosť.

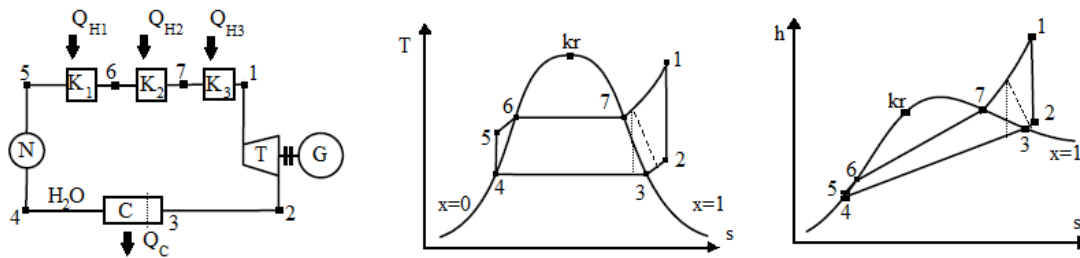
$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (2.2)$$

Reálne tepelné motory sú schopné dosiahnuť účinností 50-70% Carnotovej účinnosti s korešpondujúcimi teplotami. Dnes veľké koncentračné solárne elektrárne operujú na princípe Rankinového cyklu s parou o tlaku 6 – 10MPa a prehriatej pare o teplote 390°C (parabolický žľab) do 550°C (solárne veže) s termálnymi účinnosťami od 38-42%. Braytonov cyklus nie je využívaný v tak veľkej miere ako Rankinov, z dôvodu potreby vyšších teplôt od 800°C – 1400°C [6],[27].

2.1.1 Rankine-Clasusiov cyklus s predohrevom pary

Ako už bolo spomenuté, solárne koncentračné elektrárne pracujú s prehriatou parou, ktorá je šetrnejšia k lopatkám. Moderné typy kotlov umožňujú integrovať výmenníky tepla o rôznych teplotách, ktoré slúžia na predohrev vody (K_1), vyparovanie vody (K_2) a predohrev pary (K_3). Na výstupe z posledného kotla dostávame tzv. ostrú paru (1), ktorá sa následne privádza do turbíny T. V turbíne para izoentropicky expanduje (2). V kondenzátore (3) sa následne odvádza teplo a kvapalina kondenzuje na sýtu kvapalinu..

Čerpadlo potom izoentropicky stlačuje kvapalinu, ktorú privádza späť do kotla (5). Pokiaľ nie je prehriatie pary dostatočné, môže izoentropická expanzia v turbíne skončiť v oblasti mokrej pary a na lopatky posledných stupňov obežného kola turbíny bude pôsobiť kavitácia (bodkovaná čiara). Ak nastane v turbíne adiabatická expanzia s trením, môže byť i pre menšom prehriatí privedenej pary, za turbínou stav prehriatej pary (čiarkovaná čiara). Entalpia pred a za čerpadlom bývajú prakticky rovnaké.



Obr. 2.2.2.2. Schematické zobrazenie zariadenia s Rankinovým cyklom s predohrevom pary a priebeh cyklu v T-s a h-s diagrame [29].

Merné teploty privedené (q_{H1}, q_{H2}, q_{H3}), odvedené (q_C) a merná práca turbíny (a_T), čerpadla (a_N) a cyklu (a_0) sa dajú spočítať z ich merných entalpií (h).

$$q_{H1} = h_6 - h_5, q_{H2} = h_7 - h_6, q_{H3} = h_1 - h_7 \quad (2.3)$$

$$q_H = h_1 - h_5, q_C = h_4 - h_2 \quad (2.4)$$

$$a_T = h_1 - h_2 = \Delta h, \quad a_N = h_4 - h_5 \quad (2.5)$$

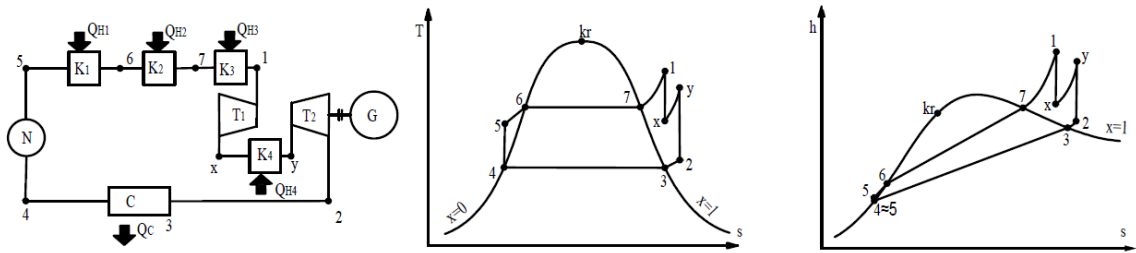
$$a_0 = a_T - |a_N| = h_1 - h_2 - (h_5 - h_4) \approx a_T = h_1 - h_2 = \Delta h, \quad (2.6)$$

$$a_0 = q_H - |q_C| = h_1 - h_5 - (h_2 - h_4) \approx h_1 - h_2 = \Delta h \quad (2.7)$$

Termická účinnosť sa dá následne definovať

$$\eta_t = \frac{a_0}{q_H} \approx \frac{a_T}{q_H} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{4 \approx 5}} = \frac{\Delta h}{h_1 - h_{4 \approx 5}} \quad (2.8)$$

Zvýšenie termickej účinnosti (Carnotizácia) Rankinového cyklu s predohrevom sa dá docieľiť buď zvýšením parametrov ostrej pary, alebo taktiež znižovaním tlaku v kondenzátore. Zníženie tlaku v kondenzátore môže mať za následok kondenzáciu pary v turbíne. Z tohto dôvodu sa do cyklu zaraduje znovu predohrev pary viz. obr. 2.1.1.3. Po izoentropickej expanzii vo vysokotlakovej časti turbíny T_1 sa vykoná izobaricky znovu predohrev (x - y) vo výmenníku K_4 a nasleduje ďalšia izoentropická expanzia v nízkotlakovej časti turbíny T_2 [29].



Obr. 2.2.1.1. Schematické zobrazenie zariadenia s Rankinovým cyklom s predohrevom pary a priebeh cyklu v T-s a h-s diagrame [29].

Merné teploty privedené, odvedené a mernú prácu je potom možné spočítať nasledovne.

$$q_H = (q_{H1} + q_{H2} + q_{H3}) + q_{H4} = (h_1 - h_5) + (h_y - h_x), \quad (2.9)$$

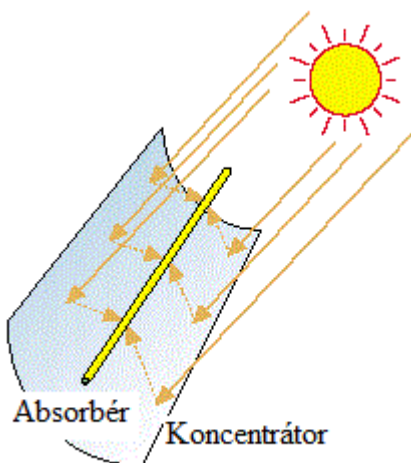
$$q_C = h_4 - h_2, \quad (2.10)$$

$$a_T = a_{T1} + a_{T2} = (h_1 - h_x) + (h_y - h_2)a_N = h_4 - h_5 \quad (2.11)$$

$$a_0 = a_T - |a_N| = (h_1 - h_x) + (h_y - h_2) - (h_4 - h_5) \approx a_T = (h_1 - h_x) + (h_y - h_2)$$

Pre termickú účinnosť potom platí (2.12)

$$\eta_t = \frac{a_0}{q_H} \approx \frac{a_T}{q_H} = \frac{(h_1 - h_x) + (h_y - h_2)}{(h_1 - h_{4 \approx 5}) + (h_y - h_x)} = \frac{\Delta h_{1,x} - \Delta h_{y,2}}{(h_1 - h_{4 \approx 5}) + (h_y - h_x)}. \quad (2.13)$$



Obr.2.2.1. Schématické zobrazenie parabolického žľabu [30].

2.2 Parabolický žľab

Koncentrátor pozostáva z parabolicky tvarovaného zrkadla a na čierno natretej trubky (absorbér). Trubica je situovaná tak, aby prechádzala ohniskami jednotlivými úsekmi parabolického žľabu. Zrkadlo sústreďuje na trubicu slnečné žiarenie, ktoré následne ohrieva kvapalinu, ktorá je následne odvádzaná a pripojená na cirkulačnú sústavu, ktorá smeruje do tepelného výmenníka. Ako médiu sa najčastejšie používajú syntetické

oleje. Olej sa zahrieva na teplotu 400°C . Žľaby pre plnenie svojej funkcie vyžadujú natáčanie za slnkom. Používa jedno-osie natáčacie systémy. Natáčacie systémy pracujú na princípe dvoch diód, ktoré v prípade nerovnováhy medzi nimi aktivujú natočenie, až kým nenastane rovnovážny stav. Celá sústava je potom uložená na železnom ráme. Údržba zrkadiel a ich schopnosti reflektovať



Obr. 2.2.2. Fotografia parabolického žľabu [31].

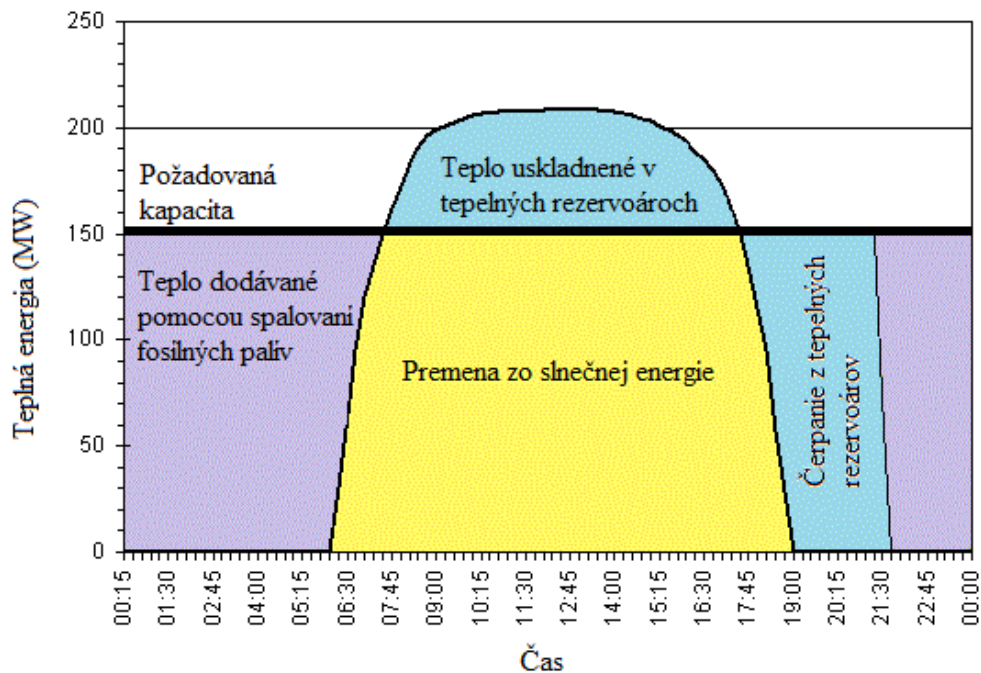
slnečné žiarenie je kritická pre chod elektrárne. Elektrárne sú najčastejšie umiestňované v púštnom prostredí, kde je vysoká prašnosť. Z dôvodu veľkého počtu zrkadiel boli žľaby opatrené automatizovaným čistiacim systémom. Ten sa spúšťa približne každé 2 týždne počas noci. Čistenie prebieha s pulznými vysokotlakovými tryskami s demineralizovanou vodou. Ďalšie opatrenie, ktoré je v tomto smere zavedené, je monitorovanie reflexivity zrkadiel. Táto kontrola kvality znižuje výdavky na prácu s čistením spojené a vodu.

Táto technológia parabolického žľabu patrí v priemysle k najosvedčenejším a k najvyvinutejším z radou CSP. Druhá generácia parabolických žľabov priniesla so sebou zdokonalenie tvaru a zakrivení zrkadiel, čo viedlo k zvýšeniu účinnosti. Medzi ďalšie vylepšenia patrí pridanie malého zrkadla na zadnú stranu absorbéru, ktorá zachytáva odrazené lúče, ktoré následne odráža späť. Priame generovanie pary v trubkách uľahčili konverziu energie čím sa znížili teplotné straty. Do budúca je výskum a vývoj na zvýšenie účinnosti týchto zariadení zameraný najmä na tieto oblasti [6],[27]:

- Vyššia efektivita zrkadiel.
- Sofistikovanejšie natáčacie systémy.
- Lepšie povlakovanie absorbéru pre zvýšenie absorpcie a zníženie emitácie.
- Zdokonalenie čistiacej techniky.

2.2.1 Elektrárne s parabolickým žľabom

Tento typ je najzaužívanejšou technológiou, najmä vďaka tomu, že už od 80tych rokov sa používa v elektrárnach v Mojavskej púšti v Kalifornii. Žľaby generujú tepelnú energiu, ktorá produkuje paru, ktorá poháňa turbínu generátoru Rankinového cyklu. Ohriata kvapalina cirkuluje z kolektorov do výmenníkov, kde sa generuje prehriata para o tlaku 5-10MPa a následne sa vracia späť do kolektorov. Kvapalina, ktorá privádzaná k výmenníku má



Obr. 2.2.1.1. Graf znázorňujúci energiu využitú v elektrárni počas dňa [32].

teplotu okolo 390°C a späť na kolektory sa vracia s teplotou 309°C. Para následne poháňa turbínu generátoru a produkuje elektrinu. Para z turbíny je privedená na kondenzátor, kde sa ochladzuje a je pumpami hnaná späť do výmenníkov, kde sa premení opäť na paru.

Elektrárne sú dimenzované na využívanie predovšetkým solárnej energie. Aby boli schopné elektrárne dodávať elektrickú energiu aj v prípade zhoršených svetelných podmienok alebo počas noci, sú elektrárne vybavené bojlermi na zemný plyn alebo iné fosílné palivo. V prípade takýchto hybridovaných elektrární tvorí zemný plyn 25% celkového výkonu.

Elektrárne s paralelnými žľabmi spolu so solárnymi vežami zdieľajú veľmi zaujímavý a elegantným spôsob uskladňovania energie. Prebytočné teplo vyprodukované počas dňa, je uskladnené pomocou roztavenej soli, ktorá pozostáva zo 60% z dusičnanu sodného a 40% z dusičnanu draselného. Tento spôsob využíva napríklad španielska elektráreň Andasol. V prípade Andasolu jeho tepelné nadrže sú schopné uskladniť

1010MWh. Tieto nádrže sú schopné zásobovať turbínu parou 7,5 hodiny plnej záťaže. Táto elektrárňa disponuje 2 takými nádržami s roztavenou soľou s rozmermi 14 metrov na výšku a 38 metrov na priemere [6],[27].

2.2.2 Zhodnotenie elektrární s parabolickým žľabom.

Parabolické žľaby predstavujú veľa pozitív a však aj negatív, ktoré je treba brať pri projektovaní elektrární na zreteľ. Medzi pozitíva patrí:

- Profit z nízkonákladovej solárnej energie s dlhodobou životnosťou.
- Pokrytie dennej špičky spotreby energie, za pomoci hybridizácie a termálnych nádrží. Schopnosť zásobovania aj počas noci a zvýšenej oblačnosti.
- Počas slnečných dní neprodukujú žiadne emisie.
- Pozitívny dopad na ekonomiku a na vytváranie pracovných miest pri stavbe a udržovaní elektrárne v chode.

Medzi negatívne dopady patrí:

- Dostupnosť vody môže byť veľkým problémom pre elektrárne, ktoré sú situované v púštnych oblastiach.
- Pri havárii môže kvapalina slúžiaca na transport tepla uniknúť a kontaminovať pôdu.
- Parabolické žľaby vyžadujú veľkú plochu.

Pre posúdenie je treba zhodnotiť aj ekonomickú stránku. Vo všeobecnosti platí, že so zvesujúcim sa počtom žľabov sa redukuje cena elektriny. Redukcia sa deje najmä pri produkovani veľkého počtu, čo znižuje cenu na meter štvorcový. Používanie nízkonákladových tepelných úložísk, poskytuje dlhodobé zníženie cien, a tým pádom sa stáva viac atraktívne pre trh. Ako už bolo zmieňované, najlepšie lokality pre elektrárne sú púštne oblasti. Avšak v týchto oblastiach žije veľmi málo ľudí a doprava energie do väčších miest je problematická a nákladná. Preto vývoj z dlhodobého hľadiska často závisí na ochote vlád a spoločností, stavania elektrického vedenia z elektrární v odľahlých miestach do miest [6],[27].

2.2.3 Elektrárň Andasol

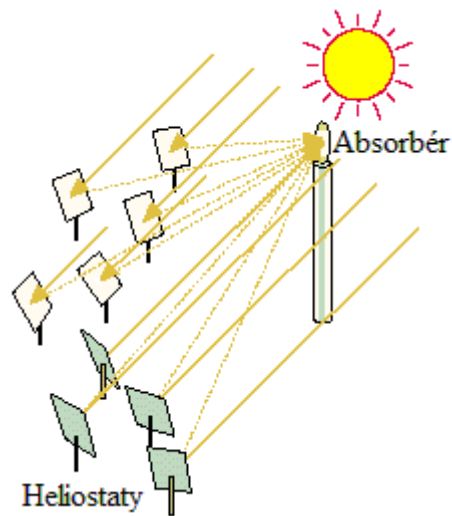
Názov elektrárne pochádza z kombinácie slov Andalúzia a Sol (po španielsky Slnko). Elektrárň sa nachádza vo výške 1100 metrov nad morom v suchej oblasti. Na oblasť dopadá veľa slnečného žiarenia a to 2200 kWh/m^2 za rok. Celá elektrárň pozostáva z 3 celkov a to Andasol-1 (2008), Andasol-2 (2009) a Andasol-3 (2011), každá s produkciou 180 GWh za rok. Andasol je využívaný na naplnenie dopytu elektriny pre aklimatizácie, pričom špička spotreby je v skorých poobedných hodinách, kedy maximum dosahuje dopadnuté slnečné žiarenie a výroba elektriny. Andasol je prvou elektrárnou tohto typu v Európe a produkuje elektrinu pre 600.000 ľudí. Solar-electric účinnosť dosahuje 16% a účinnosť turbíny pri plnej záťaži je 38,1% [6],[33].



Obr. 2.2.3.1. Elektrárň Andasol 1 a Andasol 2 [34].

2.3 Solárna veža

Tento typ elektrárni pozostáva z jednej centrálnej veže a jednotlivých zrkadiel tzv. heliostatov. Heliostaty sú rozmiestené dookola centrálnej veže, na vrch ktorej sústredujú slnečné žiarenie. Zrkadlá môžu nadobúdať rôznych veľkostí od 1m^2 po 200m^2 . Heliostaty väčších rozmerov bývajú zväčša zakrivené, menšie sú ploché. Každý heliostat je zasadený do kovového rámu a opatrený dvoj-osím natáčacím systémom. Heliostaty rozostavané v ôkol centrálnej veže dosahujú niekoľko 100-násobné koncentrácie na vrchole veže, čím môžu dosiahnuť vysokých teplôt a účinností. Na druhú stranu heliostaty nedosahujú tak vysokých optických účinností ako parabolické žľaby. To je spôsobené niekoľkými faktormi, a to vzájomným tienením, účinná oblasť otočená k slnku je výrazne menšia ako celková plocha zrkadla (tzv. kosínusový efekt), a tým, že nie všetky odrazené lúče dopadajú presne na vrch veže [6],[27].



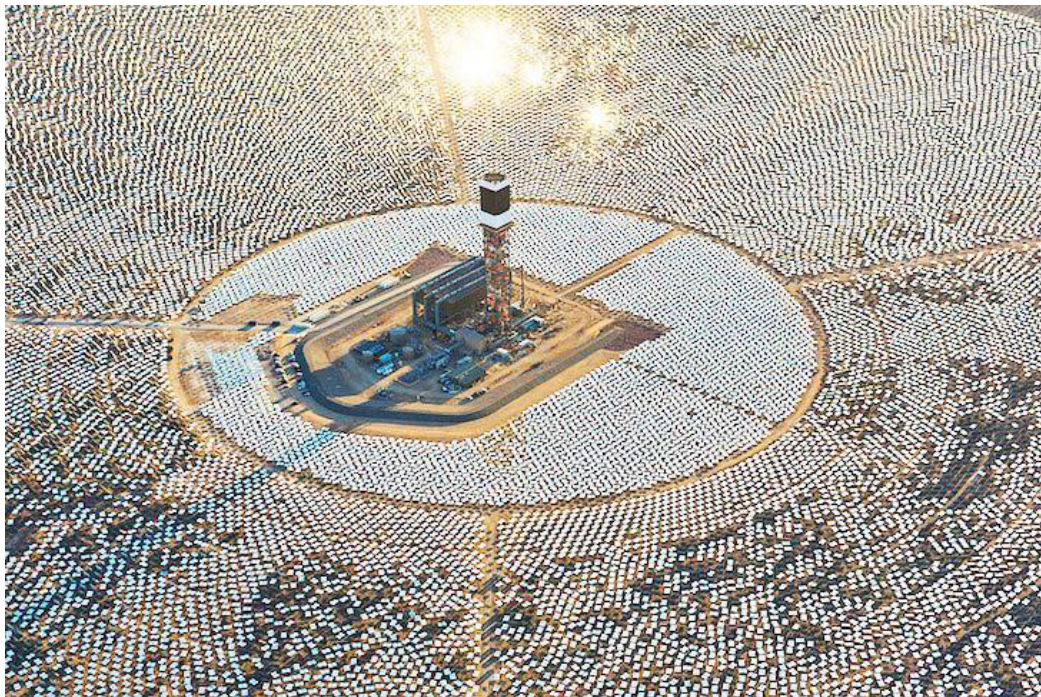
Obr. 2.3.1. Schematické zobrazenie solárnej veže a heliostatov [30].

2.3.1 Elektrárne so solárnymi vežami

Na vrchole solárnych veží, kde sa koncentrujú slnečné lúče sa nachádza absorbér s médiom, ktoré prenáša teplo. Podľa množstva prijatej radiácie, pracovnej teploty, termálnych strát a ceny sa volí tvar absorbéru, ktorý môže byť napríklad cylindrický alebo kavitačný. Pracovnou látkou v tomto prípade môže byť vodná para, tekutý sodík alebo roztavená soľ. U solárnych veží sa využíva ako uskladňovacie médium napríklad olej, zmiešaný s rozdrvenými kameňmi, roztavený soľ alebo tekutý sodík. Solárne veže sú schopné dosiahnuť v absorbéry vysoké teploty, a to až $800\text{-}1000^\circ\text{C}$. Vďaka tomu môže elektráreň fungovať buď na Braytonovom cykle s parnou turbínou alebo Rankinovom s parnou turbínou. Výhodou Braytonovho cyklu je vysoká termická účinnosť. Cyklus vyžaduje vyššie pracovné teploty, a to okolo 1000°C , pričom musí byť použitý kavitačný absorbér, ktorý však má určitý horný limit, koľko heliostatov môže byť použitých. Rankinov cyklus pracuje pri nižších teplotách, a to $500\text{-}550^\circ\text{C}$. V tomto prípade sa používa cylindrický absorbér, ktorý dovoľuje použitie väčšieho počtu heliostatov. Elektrárne môžu byť taktiež hybridované [6],[27].

2.3.2 Elektrárň Ivanpah

Je najväčšou elektrárnou tohto typu na svete. Je postavená v Mohavskej púšti a pozostáva z 3 centrálnych veží a 173.500 heliostatov. Každý heliostat má rozlohu 15m² a pozostáva z 2 zrkadiel. Ako pracovné médium sa používa voda a elektrárň pracuje na Rankinovom cykle. Elektrárň má kapacitu 377MW a účinnosť solar–electric 28.72%. V máji 2016 zachvátil požiar jednu z centrálnych veží. Príčinou požiaru boli heliostaty, ktoré boli odstavené z dôvodu údržby, tie koncentrovali lúče na zlú oblasť veže. Ivanpah sa potýkal v tom období s väčšími problémami a hrozilo zavretie elektrárne. Nebola schopná naplniť predpokladanú kapacitu, pričom v roku 2014 dosahovala iba na 46% a 2015 67% z predpokladanej kapacity. Medzi ďalšie problémy, s ktorými sa Ivanpah potýkal, bol veľký úhyn vtákov. Vtáci, ktorí lovia hmyz blízko elektrárne, sa dostávajú do kolízie s lúčmi smerujúcimi k centrálnej veži a vznietia sa. Sťažnosti prichádzali aj od pilotov, prelietajúcich ponad elektrárň, na oslepenie spôsobené odleskom z elektrárne. Ekológovia protestovali proti vytvoreniu elektrárne, pretože sa nachádza na území vzácnych púštnych korytnáčiek [35],[36],[37].



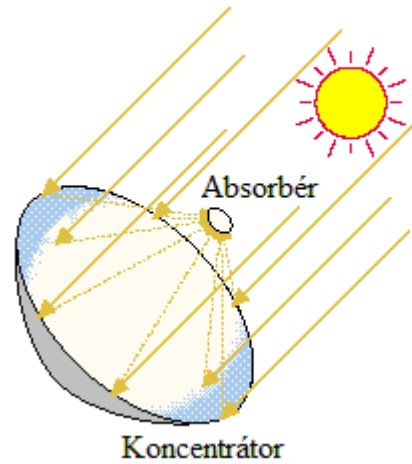
Obr. 2.3.2.1. Jedna z troch solárnych veží elektrárne Ivanpah [38].

2.4 Solar dish

Solar dish využíva koncentrátor parabolického typu, ktorý má tvar taniera (dish). Tanier odráža slnečné lúče do svojho ohniska, v ktorom sa nachádza absorbér s motorom. Nahromadená energia potom poháňa motor, ktorý generuje elektrinu. Ako motor sa z drvivej väčšiny používa Stirlingov motor. Stirlingov motor sa dá nahradiť napríklad Braytonovým cyklom s plynovou mikroturbínou. A však táto náhrada nedosahuje takých kvalít ako Stirling a preto nikdy nebola implementovaná. Typické rozmery koncentrátorov sa pohybujú okolo 100m^2 a najväčšie dosahujú až 400m^2 . Dish je upevnený v mohutnom ráme a používa dvoj-osí natáčací systém pre presné sledovanie Slnka. Dish je schopný niekoľko 1000-násobných koncentrácií, a však väčšinou nepresahuje viac ako 1000, z dôvodu zachovania rozumnej účinnosti absorbéru a vyvarovania sa zbytočným technickým obťažnostiam s nadmerným teplom. Vďaka tomu práve Solar dish so Stirlingovým motorom drží rekord v účinnosti, a to 31,25%. Dish má



Obr. 2.4.2. Fotografia systému solar dish [39].



Obr. 2.4.1. Schématické zobrazenie systému solar dish [30].

veľkú výhodu, že sa dá použiť ako stand alone (ostrovný) systém, a tak ako všetky koncentračné systémy môže byť hybridovaný. A však aj cez tieto všetky pozitíva, komerčne nie je veľmi rozšírený, a to z dôvodu jeho vysokej ceny a absencie uskladňovacieho systému [6],[27].

3 Diskusia

Budúcnosť fotovoltaiiky je viac než pozitívna. V roku 2016 zaznamenala nárast 25% oproti roku 2015. Celkový podiel PV panelov na celosvetovej produkcii elektriny bol 1,2% na konci roku 2015 [40]. Osvedčila sa ako veľmi spoľahlivý zdroj energie. Za posledné roky zaznamenala veľký pokles ceny a rast inštalovanej kapacity. Tieto javy demonštrujú potenciál a výhľady fotovoltaiických systémov do budúcnosti. Za tento pokles je zodpovedné zvýšenie účinnosti PV panelov a zníženie ich výrobných nákladov. Treba konštatovať, že zníženie oproti rokom 2007-2009 bolo tak markantné, aj vďaka tomu že krajiny Európskej únie začali podporovať rôzne projekty, čo viedlo k zvýšeniu dopytu. Na to ponuka nevedela rýchlo zareagovať a cena za 1 kg kremíku sa vyšplhala na 400\$. Prognóza pre celkovú inštalovanú kapacitu v roku 2020 sa odhaduje na 613 GW [40].

Technológie CSP zaznamenali zníženie svojho rastu medzi rokmi 2014 a 2015. Avšak mnohé projekty boli vo výstavbe v roku 2016 a niekoľko elektrární by malo byť tento rok uvedených do prevádzky. Španielsko je v oblasti CSP svetovým lídrom a spolu s USA držia 90% celosvetovej inštalovanej kapacity. Avšak Španielsko neotvorí v najbližšej dobe žiadnu novú elektrárňu a nie sú naplánované ani žiadne ďalšie projekty. Nárast kapacity nastane najmä vďaka severnej Afrike. Vo fáze projektovania a výstavby, sú to mnohé projekty v Egypte, Maroku a Alžírsku. Alžírskaya vláda oznámila, že chce do roku 2030 vystavať CSP projekty o kapacite 2GW. Veľký nárast môže nastať vďaka Číne, ktorá pokiaľ dostojí svojím vyhlásením, zosadí Španielsko ako svetové lídra v CSP. Má totiž v pláne zapojiť 5–10GW [40]. Najviac plánovaných a zavedených projektov využíva žľaby. Menej zaužívané sú solárne veže.

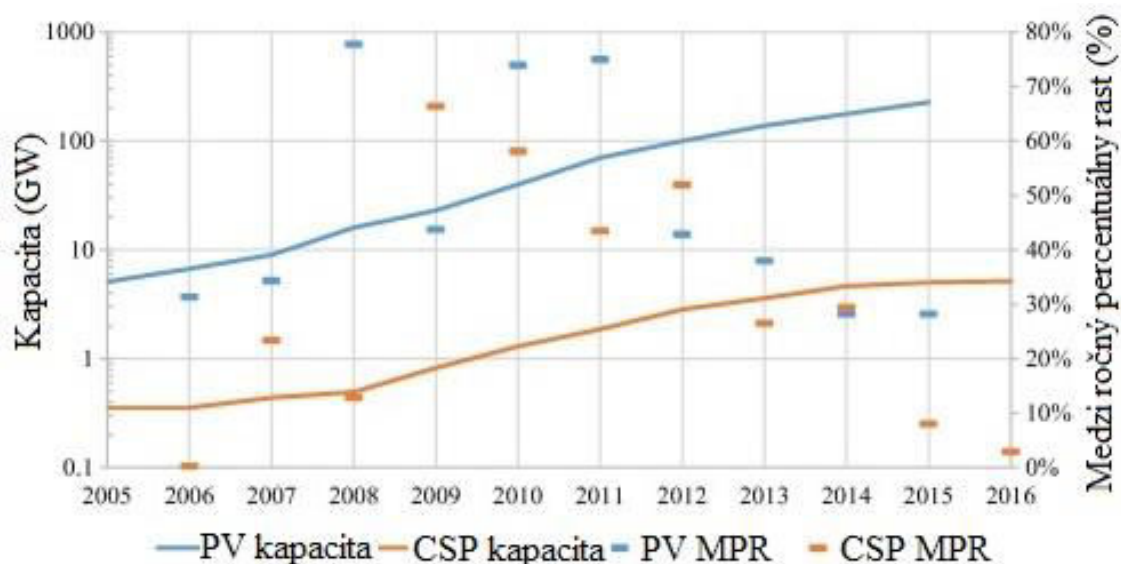
CSP sú konštrukčne veľmi pôsobivé a zaujímavé. Medzi ich najhlavnejšie výhody voči fotovoltaiickým panelom je ich vysoká účinnosť, ktorú komerčne vyrábané články nedosahujú. Ďalšou výhodou CSP oproti PV systémom je ich jednoduché uskladnenie energie vo forme tepla, pomocou roztavenej soli v tepelných rezervoároch. PV články vyžadujú batérie, ktoré sú jednak nákladné a taktiež vyzdvihujú otázky ohľadne bezpečnosti životného prostredia ako napríklad pri ťažbe lítia. Nové náleziská lítia sú napríklad aj v Českej Republike, ktoré by znížili ceny lítia, a tak aj cenu batérií.

Na druhú stranu PV články predstihujú CSP vďaka svojim nízkym nárokom na údržbu. Znížená potreba údržby pramení z ich spôsobu konverzie. Neobsahujú žiadne rotačné časti a generovanie elektriny nastáva priamou konverziou, bez použitia pracovných médií. Poruchovosť PV panelu sa jednoducho indikuje znížením ich výkonu a ich údržba

vyžaduje najmä čistenie povrchu panelu. CSP obsahujú omnoho viac segmentov, ktoré vyžadujú častú údržbu a kontrolu, ako napríklad rotujúce časti, potrubie, systémy na sledovanie polohy Slnka atď. Markantnou nevýhodou CSP oproti PV je aj ich vyššia spotreba vody. Obmedzenie svojej využiteľnosti nastáva aj pri zemepisnej polohe. Pre najlepšie využitie sa CSP využívajú v teplých oblastiach, s nízkou oblačnosťou a veľkou intenzitou slnečného žiarenia. Je to spôsobené tým že CSP pre svoje fungovanie vyžaduje priame slnečné žiarenie, pričom PV panely sú schopné generovať prúd aj z difúzneho žiarenia.

Klimatické obmedzenie sa odráža na v číslach inštalovanej kapacity, pričom celosvetová kapacita CSP v roku 2015 bola 4,8 GW, kapacita PV dosiahla 227 GW [40]. Pre porovnanie oboch technológií je dôležité zhodnotiť aj ich rozsah využitia. PV panely sú využiteľné ako pre bytové a komerčné účely, tak aj pre elektrárne veľkých výkonov. Naopak CSP sú vhodné len pre veľké aplikácie, mimo Solar dish, ktorý nie je vo veľkej miere komerčne zaužívaný.

Z nasledujúcich poznatkov jasne vyplýva, že potenciál CSP pre strednú Európu je takmer nulový. Tak isto prevádzkovať elektrárne tohto typu v púšti prináša veľmi veľa problémov, najmä s vodou, dopravou elektrickej energie alebo problémy podobné v prípade Ivanpahu. Naproti tomu PV panely majú veľký potenciál, tak ako pre suché klimatické podmienky tak aj pre naše zemepisné pásmo.



Obr. 3.1. Graf znázorňujúci rast celkovej celosvetovej inštalovanej kapacity na ľavej strane na logaritmickú os. A percentuálny medziročný rast na strane pravej [41].

4 Závery

Získavanie elektriny zo Slnka je sľubná cesta ako znížiť znečistenie ovzdušia a CO₂. Celkovo na energetickom trhu tvorí len malé množstvo vyrobenej elektriny. V prípade fotovoltaiky je potenciál veľký, vďaka širokej škále jej uplatnenia. Stand alone systémy dokážu zásobovať rôzne malé a stredné aplikácie, čo v mnohých prípadoch je veľmi výhodné, najmä pre aplikácie, ktoré sa kvôli polohe nedajú pripojiť do siete. Ich najväčšou prednosťou je ich možnosť využitia v malom meradle. Inštalácia či už malého modulu na streche rodinného domu, integrované moduly ako fasáda výškových budov alebo elektrární malých rozmerov zásobujúcich malú dedinu, je skvelá cesta k zníženiu emisií a spotreby energie z fosílnych palív. Ich dlhá životnosť, nízka nutnosť údržby a návratnosť prevažujú ich nízku účinnosť a potrebu dodatočných prístrojov. Ich účinnosť za posledné roky stúpila, a však bude trvať dlho než sa účinnosť laboratórne testovaných článkov bude dať porovnať s tými komerčne dostupnými.

Technológia CSP je z inžinierskeho hľadiska viac než príťažlivá a pôsobivá. Lukratívna je ich vysoká účinnosť a uskladňovanie energie, bez použitia batérií. Technológia tepelných elektrární je už dlhodobo zaužívaná a zvládnutá, tak isto ako technológia parabolického žľabu, ktorá je najpoužívanejšou v CSP sfére. Na druhú stranu tieto výhody prevažujú nevýhody, ktoré sú spojené s údržbou, spotrebou vody, obmedzením na projekty veľkých rozmerov a ohrozením živočíšstva v okolí elektrární. Tieto projekty pre dosiahnutie vysokých výkonov musia byť lokalizované v teplých klimatických podmienkach, a však tento fakt zase naráža na obmedzenú dodávku vody, ktorá je na chod nevyhnutná. V porovnaní týchto dvoch technológií má vyšší potenciál a využiteľnosť rozhodne fotovoltaika.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Carbon dioxide levels rose at record pace for 2nd straight year. National Oceanic and Atmospheric Administration [online]. 2017 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.noaa.gov/news/carbon-dioxide-levels-rose-at-record-pace-for-2nd-straight-year>
- [2] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. Fotovoltaika, elektrina ze slunce. 2. vyd. Brno: ERA, 2008, vii, 81 s. : il. ; 21 cm. ISBN 9788073661335.
- [3] Only Solar [online]. In: . [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.ONLYSOLARS.COM/solar-pv-cells-photovoltaics-solar-photovoltaic-cells-photovoltaic-systems.htm>
- [4] HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. Ostrava: HEL, 2011, 176 s. : il. (převážně barev.), mapy ; 21 cm. ISBN 9788086167336.
- [5] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: ILSA, 2009, 160 s. : il. (některé barev.), mapy, portréty ; 24. ISBN 9788090431102.
- [6] KALOGIROU, Soteris. GALE GROUP. Solar energy engineering: processes and systems. Second edition. Academic Press, 2013. ISBN 9780123972705.
- [7] VOS, Alexis de. Thermodynamics of solar energy conversion. Weinheim: Wiley-VCH, 2008, xiii, 192 s. : il. ; 25 cm. ISBN 9783527408412.
- [8] BEITNER, P. a T. TIAN. 2015 Renewable Energy Data Book [online]. In: . USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66591.pdf>
- [9] KILLNER, John, Stephen J. SKINNER a Peter P. EDWARDS, IRVINE, Stuart J.C, ed. Functional Materials for Sustainable Energy Applications. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-059-1.
- [10] MAEHLUM, Mathias Aarre. Solar Cell Comparison Chart – Mono-, Polycrystalline and Thin Film. Energy Informative [online]. 2013 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://energyinformative.org/solar-cell-comparison-chart-mono-polycrystalline-thin-film/>
- [11] Applications – Solar. In: Gass recovery & recycle limited [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://gr2l.co.uk/applications-solar/>

- [12] SEEGOPAL, Purnesh. The great solar conversion efficiency race is still on. Pangaea Ventures [online]. 2016 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.pangaeaventures.com/blog/the-great-solar-conversion-efficiency-race-is-still-on>
- [13] Triple-junction thin-film silicon solar cell fabricated on periodically textured substrate with a stabilized efficiency of 13.6%. Applied Physics Letters [online]. 2015, 106(21) [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1063/1.4921794. ISSN 0003-6951. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4921794>
- [14] [online]. In: . [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.solars-china.com/images/filmsolar1.jpg>
- [15] WESOFF, Eric. First Solar Hits Record 22.1% Conversion Efficiency for CdTe Solar Cell. Greentech Media [online]. 2016 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/First-Solar-Hits-Record-22.1-Conversion-Efficiency-For-CdTe-Solar-Cell>
- [16] ZSW Sets New World Record for Thin-film Solar Cells. ZSW [online]. 2016 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.zsw-bw.de/en/newsroom/news/news-detail/news/detail/News/zsw-sets-new-world-record-for-thin-film-solar-cells.html>
- [17] KUMBHARE, Maithili Ganpati a P. SATHYA. Design and Analysis of Indium Gallium Nitride based PIN solar cell. In: International Journal of Renewable Energy Research-IJRER [online]. 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/4317>
- [18] New world record for solar cell efficiency at 46% – French-German cooperation confirms competitive advantage of European photovoltaic industry. Fraunhofer ISE [online]. Freiburg, Nemecko, 2014 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>
- [19] WENHAM, S.R. Applied Photovoltaics. 2nd ed. London: Routledge, 2007. ISBN 9781844074013.
- [20] Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny [online]. In: . 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>

- [21] TSEITLIN, Dmitry. The Status and Outlook for the Photovoltaics Industry 2007 [online]. In: . 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/tseitlin/thestatusandoutlookforthephotovoltaicsindustry2007-bp-2713503>
- [22] In: Binaryorbit [online]. 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.binaryorbit.org/>
- [23] Micro Machining to Make Fresnel Lenses For Solar Panels. In: New energy and fuel [online]. 2014 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2014/02/12/micro-machining-to-make-fresnel-lenses-for-solar-panels/>
- [24] OVERTON, Thomas W. Desert Sunlight Solar Farm, Desert Center, California. Power [online]. 2015, , 2-3 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.powermag.com/desert-sunlight-solar-farm-desert-center-california/?pagenum=1>
- [25] Project Overview. First Solar [online]. 2015 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.firstsolar.com/Resources/Projects/Desert%20Sunlight%20Solar%20Farm>
- [26] O'NEILL, Shannon. One of the Nation's Biggest Solar Farm Open in California. In: Energy Vulture [online]. 2015 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://energyvulture.com/tag/desert-sunlight-solar-farm/>
- [27] GINLEY, David S, CAHEN, David, ed. Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability [online]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012 [cit. 2017-05-18]. ISBN 978-113-9182-133. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpFMEEES00E/viewerType:toc/root_slug:fundamentals-materials/url_slug:kt009BRSP1?b-q=Heliostat&b-group-by=true&b-search-type=tech-reference&b-sort-on=default
- [28] XU, Xinhai, K. VIGNAROOBAN, Ben XU, K. HSU a A.M. KANNAN. Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2016, 53, 1106-1131 [cit. 2017-05-18]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.015. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115009855>
- [29] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.

- [30] A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems. In: ScienceDirect [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0927024816305268>
- [31] New parabolic trough collector from 3M and Gossamer. In: Sun & wind energy [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.sunwindenergy.com/news/new-parabolic-trough-collector-3m-and-gossamer>
- [32] Solar thermal power plants. In: Volker-quaschnig [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals2/index.php>
- [33] Anadasol [online]. In: . National renewable energy laboratory, 2017 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=3
- [34] SPAIN SOLAR ENERGY. In: Marker Redondo photography [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://redondo.photoshelter.com/image/I00001ZqgF5rSd_w
- [35] MEJIA, Brittany. Fire breaks out at world's largest solar power plant near Nevada border. In: Los Angeles Times [online]. 2016 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.latimes.com/local/lanow/la-me-ln-solar-plant-fire-20160520-snap-story.html>
- [36] DANIELSKI, David. Ivanpah solar plant, built to limit greenhouse gases, is burning more natural gas. In: The press-enterprise [online]. 2017 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.latimes.com/local/lanow/la-me-ln-solar-plant-fire-20160520-snap-story.html>
- [37] HO, C.K., C.A. SIMS a J.M. CHRISTIAN. Evaluation of Glare at the Ivanpah Solar Electric Generating System. In: ScienceDirect [online]. Elsevier, 2015 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.latimes.com/local/lanow/la-me-ln-solar-plant-fire-20160520-snap-story.html>
- [38] WANG, Lucy. Ivanpah: The World's Largest Solar Thermal Plant Just Switched Online for the First Time. In: Inhabitat [online]. 2014 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://inhabitat.com/ivanpah-worlds-largest-solar-thermal-plant-officially-goes-in-service-today/>
- [39] Heat engine. In: Blue surge [online]. 2014 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://www.bluesurge.com.pk/product_categories.php?pc_id=5
- [40] REN21, ed. Renewables 2016 Global Status Report [online]. In: . Paris [cit. 2017-05-19]. ISBN 978-3-9818107-0-7.

[41] GAUCHÉ, Paul, Justin RUDMAN, Mbalenhle MABASAO, Willem A. LANDMAN, Theodor W. von BACKSTROM a Alan C, BRENT. System value and progress of CSP. In: ScienceDirect [online]. Elsevier, 2017 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0038092X17302529>

[42] Best research-cell efficiencies. In: National renewable energy laboratory [online]. Denver, USA [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>

Zoznam použitých skratiek

PV	Fotovoltaika
CSP	Tepelné koncentračné solárne elektrárne

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1.2.6.1	Závislosť maximálnej teoretickej účinnosti na počtu vrstiev PV článku a použití koncentrátora.
Tabuľka 2.1	Charakteristika rôznych typov CSP.

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1	Ilustračná fotografia.
Obr. 1.1.1	Schéma pásiem energií atómu.
Obr. 1.1.2	Ilustračné schéma polovodiču typu N.
Obr. 1.1.3	Ilustračné schéma polovodiču typu P.
Obr. 1.1.4	Ilustračné schéma P-N prechodu.
Obr. 1.2.1	I-V charakteristika solárneho článku.
Obr.1.2.2	I-V charakteristiku solárneho článku (a), vplyv rastúceho žiarenia (b), vplyv rastúcej teploty.
Obr. 1.2.3	Zapojenie dvoch identických článkov (a) paralelne (b) sériovo.
Obr. 1.3.1	Koláčový diagram rozdelenia komerčne vyrábaných PV panelov.
Obr. 1.3.2	Závislosť účinnosti na šírke zakázaného pásu spolu s Shockley-Queisserovým limitom pre jednovrstvé PV články.
Obr. 1.3.1.1	Kremíkové ingoty.
Obr. 1.3.3.1	Schéma a-Si:H PV panelu.

Obr. 1.3.6.1	Schéma 3-vrstvového PV článku.
Obr. 1.4.1	Schéma konštrukcie PV panelu.
Obr. 1.5.1.1	Pyramídová textúra pod mikroskopom.
Obr. 1.5.2.1	Schéma zápustných kontaktov.
Obr.1.5.3.1	Porovnanie výkonov počas dňa pre statické panely a panely so sledovacím systémom.
Obr. 1.5.4.1	Schematické zobrazenie PV článku spolu s Fresnelovou šošovkou.
Obr. 1.7.1	Elektrárň Desert Sunlight Solar Farm.
Obr. 2.1.1	Schéma elektrárne, Rankinov cyklus – A, Braytonov cyklus – B.
Obr. 2.2.1.1	Schematické zobrazenie zariadenia s Rankinovým cyklom s predohrevom pary a priebeh cyklu v T-s a h-s diagrame.
Obr. 2.2.2.2	Schematické zobrazenie zariadenia s Rankinovým cyklom s predohrevom pary a priebeh cyklu v T-s a h-s diagrame.
Obr.2.2.1	Schematické zobrazenie parabolického žlabu.
Obr. 2.2.2	Fotografia parabolického žľabu.
Obr. 2.2.1.1	Graf znázorňujúci energiu využitú v elektrárni počas dňa.
Obr. 2.2.3.1	Elektrárň Andasol 1 a Andasol 2.
Obr. 2.3.1	Schematické zobrazenie solárnej veže a heliostatov.
Obr. 2.3.2.1.	Jedna z troch solárnych veží elektrárne Ivanpah.
Obr. 2.4.1	Schematické zobrazenie systému solar dish.

Obr. 3.1.

Graf znázorňujúci rast celkovej celosvetovej inštalovanej kapacity na ľavej strane na logaritmickú os a percentuálny medzoročný rast na strane pravej.

Zoznam použitých znakov

Názov	Označenie	Jednotky
Výkon	P	[W]
Prúd	I	[A]
Napätie	V	[V]
Fill factor	FF	[-]
Účinnosť	η	[%]
Koncentrácia	C	[-]
Teplota	T	[°C]
Merné teplo	q	[J.kg ⁻¹]
Merná práca	a	[J.kg ⁻¹]
Merná entalpia	h	[J.kg ⁻¹]

Zoznam príloh

Príloha 1

Graf zobrazujúci najlepšie dosiahnuté účinnosti rôznych typov PV článkov.