

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Aplikace různých generací fotovoltaických panelů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš BATĚK**
Osobní číslo: **E14N0045P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Aplikace různých generací fotovoltaických panelů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

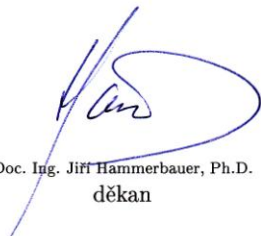
1. Popište a vysvětlete technické možnosti využití solárního záření.
2. Vysvětlete vlastnosti jednotlivých generací fotovoltaických panelů.
3. Prakticky porovnejte a zhodnoťte vlastnosti fotovoltaických panelů různých generací.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. přednášky z předmětu KEE/SOES

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Bělík, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na jednotlivé generace fotovoltaických panelů. Na začátku této práce jsou uvedeny základní informace o zdroji a vlastnostech solárního záření. Dále jsou zde popsány technické možnosti využití solárního záření. Následně jsou v této práci vysvětleny vlastnosti jednotlivých generací fotovoltaických panelů spolu s jejich vzájemným porovnáním. Výstupem je praktické porovnání a zhodnocení vlastností vybraných fotovoltaických panelů a návrh fotovoltaického systému.

Klíčová slova

Obnovitelný zdroj energie, spektrum solárního záření, solární záření, intenzita solárního záření, fotoelektrický jev, fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, fotovoltaický systém, účinnost

Abstract

This diploma thesis is focused on the individual generations of photovoltaic panels. At the beginning of this work, there are given basic information about the source and characteristics of solar radiation. There are also described the technical possibilities of using solar radiation. Consequently in this thesis there are explained the characteristics of each generation of photovoltaic panels, together with their mutual comparison. The output is a practical comparison and evaluation of properties of selected photovoltaic panels and proposal of photovoltaic system.

Key words

Renewable resources of energy, solar spectrum, solar radiation, intensity of solar irradiance, photoelectric effect, photovoltaic cell, photovoltaic panel, photovoltaic system, efficiency, amount of produced energy

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 12.5.2016

Bc. Tomáš Batěk

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a za čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Ondřejovi Niklovi za pomoc při realizaci samotného měření fotovoltaických panelů. Na závěr bych chtěl poděkovat celé své rodině za pomoc a velkou podporu při celém průběhu studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	11
1 ZDROJ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ = SLUNCE.....	12
1.1 OBECNÉ INFORMACE	12
1.2 FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKY	12
1.3 CHEMICKÉ SLOŽENÍ	13
1.4 STRUKTURA SLUNCE	13
1.5 ZDROJ ENERGIE SLUNCE A JEJÍ PŘENOS.....	16
1.5.1 Zdroj energie.....	16
1.5.2 Energie ze Slunce na Zemi.....	17
2 VLASTNOSTI SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ.....	18
2.1 FOTON	18
2.1.1 Vlastnosti	18
2.2 SPEKTRUM SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ	19
2.3 INTENZITA SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ.....	22
2.4 PŘÍMÉ X DIFÚZNÍ ZÁŘENÍ	22
2.5 SOLÁRNÍ KONSTANTA.....	24
3 TECHNICKÉ MOŽNOSTI VYUŽITÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ	25
3.1 PASIVNÍ SOLÁRNÍ SYSTÉMY	25
3.2 AKTIVNÍ SOLÁRNÍ SYSTÉMY	27
3.2.1 Tepelné solární systémy.....	27
3.2.2 Fotovoltaické systémy.....	30
4 FOTOELEKTRICKÝ JEV	32
4.1 VNĚJŠÍ FOTOELEKTRICKÝ JEV	32
4.1.1 Fotoemise.....	32
4.2 VNITŘNÍ FOTOELEKTRICKÝ JEV	33
4.2.1 Fotovodivost.....	33
4.2.2 Fotovoltaický jev.....	34
5 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A PANELY	36
5.1 TYPY FV ČLÁNKŮ	37
5.1.1 FV články 1. generace	37
5.1.2 FV články 2. generace	39
5.1.3 FV články 3. generace	42
5.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A PANELŮ.....	44

6 PRAKTICKÉ POROVNÁNÍ A ZHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ	48
6.1 MĚŘENÍ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ	49
6.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A DALŠÍCH VLASTNOSTÍ PANELŮ	52
7 NÁVRH FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU	58
7.1 POPIS MODELOVÉHO OBJEKTU A MÍSTNÍCH PODMÍNEK	58
7.2 VÝPOČET ÚČINNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ	60
7.3 VÝPOČET POČTU PANELŮ A ENERGETICKÁ BILANCE JEDNOTLIVÝCH FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ	62
ZÁVĚR	66
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	67
PŘÍLOHA.....	1
PŘÍLOHA A: OBRÁZEK Č. 1.2 ENERGETICKÁ BILANCE ZEMĚ	1
PŘÍLOHA B: KATALOGOVÉ LISTY JEDNOTLIVÝCH FV PANELŮ	2
PŘÍLOHA C: ORIGINÁLY NAMĚŘENÝCH HODNOT	9

Seznam symbolů a zkratek

ly	Light year
a-Si.....	Amorfní křemík
μ -Si.....	Mikrokrytalický křemík
a-Si:H.....	Amorfní hydrogenovaný křemík
μ -Si:H.....	Mikrokrytalický hydrogenovaný křemík
AM.....	Air mass
STC	Standard test Conditions
MPP	Maximum power point
PB.....	Pracovní bod
FF.....	Fill factor [-]
NOCT.....	Nominal operating cell temperature [°C]

Úvod

Zejména v posledních letech se můžeme více setkávat s řešením problematiky zabývající se způsoby výroby energií a to ať už té elektrické nebo tepelné. A to nejen z pohledu spotřeby, ale také jakým způsobem a odkud danou energii získáváme. Zatím stále ještě nejvyužívanějším druhem paliva na světě jsou fosilní paliva, mezi něž se řadí černé (hnědé) uhlí, ropa a v neposlední řadě i zemní plyn. Problémem těchto paliv je jejich negativní vliv na životní prostředí. Zejména při spalování ropy a uhlí se do ovzduší dostává kromě oxidu uhličitého CO_2 , jenž vzniká při každém spalování, také oxid siřičitý SO_2 , způsobující kyselý dešť, které jsou příčinou poškozování rostlinstva a celkového okyselování půdy a vody. Druhým nejvíce využívaným typem paliva je jaderné palivo - uran, z něhož získáváme energii pomocí jaderných reakcí. Při využívání tohoto paliva nevznikají žádné škodlivé látky, avšak je zde problém s použitým palivem, které je stále radioaktivní a musí být zajištěno jeho bezpečné skladování, ať již dočasné či trvalé. Třetí a stále více využívanou skupinou jsou obnovitelné zdroje energie. Mezi tyto zdroje patří například voda, vítr, biomasa a sluneční záření.

V České republice je nejvíce diskutovaným obnovitelným zdrojem sluneční záření přeměňované pomocí fotovoltaických panelů na elektrickou energii. Hlavním důvodem je tzv. solární boom, který začal okolo roku 2005 a skončil před zhruba dvěma lety. Příčinou jeho začátku byly pobídky od státu na zřizování těchto obnovitelných zdrojů a vysoké výkupní ceny za vyrobenou elektrickou energii. Další výhodou je účinnost a efektivnost tohoto druhu přeměny energie.

Aktuálnost a zajímavost této problematiky mne dovedla k tomu, že jsem si ji vybral jako téma své diplomové práce. Hlavní úkolem této práce je praktické porovnání 4 typů FV panelů z hlediska účinnosti a prakticky ověřit získané teoretické informace jejich měřeními za rozdílných okolních podmínek, aby bylo možné určit, který z klimatických faktorů nejvíce ovlivňuje parametry FV panelů. V závěru této práce bude ještě proveden návrh fotovoltaického systému pro každý ze 4 měřených FV panelů.

1 Zdroj solárního záření = Slunce

V této kapitole bych se rád zmínil o zdroji solárního záření pro naši planetu Zemi a nejen pro ni, tedy o Slunci. Samozřejmě některé informace jsou běžně známé, další však již příliš ne. A vzhledem k tomu, že sluneční záření je nejen zdrojem tepelné a světelné energie, ale také jednou z nutných podmínek pro existenci života na naší planetě, je myslím namístě tyto informace zmínit. Vybrané z nich pak hrají významnou roli při energetickém využití záření.

1.1 Obecné informace

Slunce je středem naší planetární soustavy a zároveň je pro nás nejbližší a nejdůležitější hvězdou. Je to koule žhavého plazmatu, jež vyrábí obrovské množství energie. Obíhá po eliptické dráze dlouhé 25 000-26 000 ly od středu Mléčné dráhy. Vzdálenost k Zemi činí 147 098 074-152 097 701 km v závislosti na vzájemné poloze těchto dvou těles. Rychlost otáčení je různá na pólech a na rovníku. Na pólu se otočí jednou za 36 dní, na rovníku za 25 dní. Solární záření k nám od Slunce dorazí za 8 minut a 19 sekund. Stáří Slunce se odhaduje přibližně na 4,6 miliardy let a životnost dalších 7 miliard let.[7]

1.2 Fyzikální charakteristiky

V následující tabulce jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti Slunce:

Tab. 1.1: Fyzikální charakteristiky Slunce [7]

Průměr	1,392.10 ⁶ km
Zploštění	9. 10 ⁻⁶
Povrch	6,09. 10 ¹² km ²
Objem	1,41. 10 ¹⁸ km ³
Hmotnost	1,9891. 10 ³⁰ kg
Průměrná hustota	1,408 g.cm ⁻³
Hustota v jádru	130 g.cm ⁻³
Hustota na povrchu	0,001 g.cm ⁻³
Gravitace: na povrchu	273,95 m.s ⁻² > (27,9G)
Úniková rychlost na povrchu	617,54 km.s ⁻¹
Povrchová teplota	5780 K
Spektrální třída	G2
Teplota koróny	5.10 ⁶ K
Teplota jádra	15,7.10 ⁶ K (ve středu)
Zářivý výkon	3,827.10 ²⁶ W
Intenzita záření	2,009.10 ²⁶ W.sr ⁻¹
Magnetické pole	(10- 300).10 ⁻⁶ T

Pro zajímavost bych zde ještě uvedl několik informací. Průměr Slunce je 109 krát větší než je průměr Země. Povrch je dokonce větší 11 900 krát větší, u objemu je rozdíl ještě větší, ten je u naší nejbližší hvězdy 1300 000 krát větší než naší planety. Pokud bychom Slunce dali na ramennou váhu, vyvážílo by ji až 332 950 Zemí a zároveň hmotnost tohoto zářivého vesmírného tělesa představuje 99,8% hmotnosti sluneční soustavy.

1.3 Chemické složení

Přesné chemické složení Slunce není dosud úplně známé. Dosavadně známé složení bylo získáno zkoumáním spektrálních čar. Dalším poznatkem je to, že chemické složení se mění v závislosti na hloubce a není homogenní. Vlivem jaderných reakcí jádro obsahuje více hélia, než jeho povrch. Z celkového množství hélia je rovných 64% obsaženo v jádře spolu s necelými 34% celkového množství vodíku. Pokud bychom tyto dva prvky vyjádřili v hmotnostních poměrech, je Slunce složeno přibližně ze 75 % vodíkem a z 5 % héliem. Zastoupení jednotlivých prvků v této hvězdě je uvedeno v procentech počtu atomů v tabulce č. 2.

Tab. 1.2: Chemické složení Slunce v procentech počtu atomů [7]

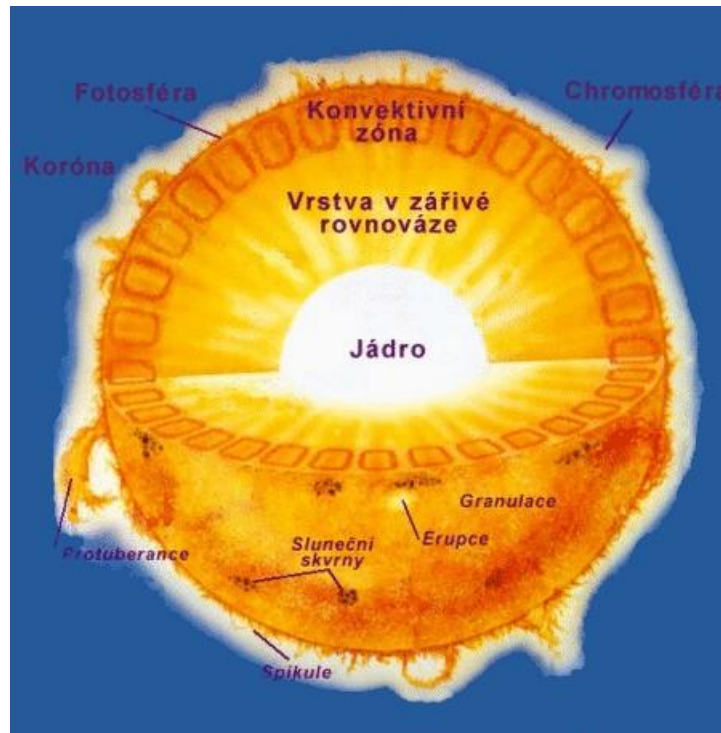
Prvek	Procento atomů [%]
Vodík	92,1
Hélium	7,8
Kyslík	0,061
Uhlík	0,030
Dusík	0,0084
Neon	0,0076
Železo	0,0037
Křemík	0,0031
Hořčík	0,0024
Síra	0,0015
Ostatní	0,0015

1.4 Struktura Slunce

Slunce se skládá celkem z 6 vrstev a to:

- Jádro
- Vrstva v zářivé rovnováze
- Konvektivní zóna
- Fotosféra
- Chromosféra
- Koróna

Jednotlivé vrstvy jsou přehledně znázorněny na obrázku č. 1.1. Základní charakteristiky jednotlivých vrstev jsou popsány níže.



Obr. 1.1: Řez Slunce s vyznačením jednotlivých vrstev [8]

Jádro je zdrojem energie Slunce. Jeho hustota je stokrát větší než je hustota vody a jak již bylo zmíněno teplota v samotném nitru Slunce je okolo $15 \cdot 10^6$ K. Jádru Slunce je v podstatě dokonalý reaktor, v němž probíhá mnoho reakcí, díky kterým dochází k syntéze vodíku na hélium a zároveň dojde k uvolnění velkého množství energie ve formě fotonů a to při teplotě $13 \cdot 10^6$ K a tlaku $2 \cdot 10^{10}$ MPa. K reakcím tedy nedochází v samotném středu, ale v oblastech jemu blízkých. Nejčastější reakcí je tzv. proton-protonový cyklus, kdy dojde ke sloučení čtyř protonů v jednu α -částici (jádru helia), přičemž dva z protonů se přemění na neutrony. Většina energie (fotonů) je dále předána hmotě Slunce, to znamená, že dojde k transformaci na fotony o mnohem delších vlnových délkách, tedy na světlo. Podrobněji se vzniku energie bude věnovat následující kapitola.

Vrstva v zářivé rovnováze je první vrstvou, která se nachází nad jádrem. Její šířka dosahuje přibližně $0,5 \cdot 10^6$ km. Zářivá rovnováha je založena na tom, že co atomy pohltí, to také později vyzáří. Pohlcováním a následným náhodným vyzářováním fotonů dochází k jejich výraznému zpomalování. Cesta fotonu od jádra Slunce k jeho povrchu přes zářivou vrstvu trvá několik set tisíc let.

Konvektivní zóna je další vrstvou. Jsou zde proudy horké plazmy, které stoupají vzhůru konvektivní zónou za současného vyzařování energie z této hmoty a tím dochází k jejímu ochlazení. Ochlazená plazma klesá zpět ke středu Slunce, kde dochází opět k jejímu ohřátí prouděním a tím začne stoupat výše. Šířka tohoto pásu je cca $0,9 \cdot 10^6$ km.

Fotosféra je viditelným povrchem Slunce. Teplota zde dosahuje 5 780 K. Poznávacím znakem fotosféry je tzv. granulace. Tento jev reprezentován viditelnými vrcholky vzestupných a sestupných proudů z konvektivní zóny. Hojně se zde také vyskytují sluneční skvrny. Z této vrstvy také vytryskávají oblaka plazmatu, které jsou řízeny magnetickými poli. Tento proces je nazýván protuberance.

Chromosféra je tenká vrstva těsně nad povrchem. Teplota zde paradoxně stoupá se vzrůstající vzdáleností od povrchu. To je zřejmě způsobeno rozpadem nestabilních plazmatů. Vyskytují se zde chromosférické erupce, jež způsobují náhle zjasnění

Koróna je vrstvou nacházející se nad chromosférou a lze ji považovat za horní atmosféru Slunce, která nemá zřetelné hranice a zasahuje daleko do sluneční soustavy. Překvapivě je teplota koróny, jež je blízko Slunce, vyšší (1 500 000 K) než je teplota fotosféry (5 780 K). Hlavním jevem, který zde způsobuje ohřev, je rozpad magnetoakustických vln šířících se plazmatem. Za normálních podmínek je koróna neviditelná, díky jejímu přezáření fotosférou. Pouhým okem je viditelná pouze při úplném zatmění nebo pomocí speciálního dalekohledu takzvaného koronografu. [7][8]

1.5 Zdroj energie Slunce a její přenos

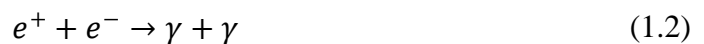
1.5.1 Zdroj energie

Zdrojem energie jsou tedy termonukleární reakce probíhající v oblastech blízkých jádru Slunce. Jak již bylo zmíněno, nejčastější reakcí je proton- protonový cyklus. Jedná se o řadu tří po sobě jdoucích jaderných reakcí, při kterých ve výsledku vznikne z jader vodíku 1_1H (protonů) jádro helia 4_2He a uvolní se energie ve formě fotonů záření:

1. **Reakce** - fúzí dvou jader vodíku 1_1H (protonů) vznikne deutron 2_1D a uvolní se pozitron e^+ a neutrino ν_e . Tento proces je velmi pomalý, jelikož protony musí využít tunelového jevu, aby prošli Coulombovskou bariérou. Další překážkou omezující rychlost tohoto procesu je zde působící slabá interakce.



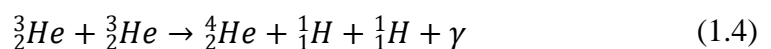
Pozitron ihned anihiluje s elektronem a vzniknou dva fotony gama záření.



2. **Reakce** - do vzniklého deutronu 2_1D naráží jádro vodíku 1_1H (proton). Jejich sloučením vznikne lehké jádro helia 3_2He a foton záření gama.



3. **Reakce** - sloučením dvou lehkých jader helia 3_2He vzniká jádro helia 4_2He a dvě jádra vodíku 1_1H (protony). A opět se uvolňuje energie ve formě fotonů gama záření.



Během proton - protonového cyklu se uvolní přibližně 25 MeV energie. Pokud bychom tuto energii vyjádřili v základních jednotkách tedy v joulech, zjistíme, že je velice malá. Její hodnota činí $4,01 \cdot 10^{-12}$ J. Nutno však podotknout, že takových reakcí (proton - protonových cyklů) proběhne na Slunci za jednu sekundu 10^{37} , což ve výsledku znamená, že dojde k uvolnění $3,827 \cdot 10^{26}$ J zářivé energie, která je dále vyzařována do kosmu. Celkový tok vyzařované energie neboli zářivý výkon Slunce je tedy $3.827 \cdot 10^{26}$ W a intenzita záření též nazývaná jako měrný tok na jeho povrchu činí $6.107 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. [1] [9]

1.5.2 Energie ze Slunce na Zemi

Sluneční záření není ve vesmíru ničím pohlcováno a na hranici atmosféry se dostává ve stejné formě, v jaké opustilo povrch Slunce, ale při velmi zmenšené intenzitě a to díky tomu, že výkon se s rostoucí vzdáleností rozptýlí na velkou plochu. Na Zemi dopadají asi jen 2 miliardy (7,7.10¹⁷ W) z celkového výkonu vyzařovaného Sluncem. Podobně malé výkony dopadají i na ostatní planety. Velká část záření tedy uniká do mezihvězdného a mezigalaktického prostoru.

Sluneční záření vstupuje do atmosféry přibližně ve výšce 1 000 km od povrchu Země. Hlavními složkami atmosféry jsou dusík a kyslík. Tyto atmosférické plyny ve výškách nad 60 km pohlcují ultrafialové a rentgenové záření a ionizují se a vytváří vrstvu zvanou ionosféru. Ve výškách okolo 20 až 30 km se nachází vrstva s vysokým obsahem ozónu, která pohlcuje zbývající nebezpečné ultrafialové záření, které prošlo výše zmíněnými vrstvami. V nejnižší vrstvě atmosféry v troposféře zachycuje sluneční záření vodní pára, CO₂, prach a kapky vody v mrazech.

Díky mrakům, částicám prachu a zemskému povrchu se z celkového toku energie odráží zpět do vesmíru zhruba 34%. Zemská atmosféra pohlcuje a rozptyluje okolo 19% celkového toku energie. Zbývajících 47% (14%+23%+10%) celkového toku je absorbováno zemským povrchem a mění se na teplo, které je z povrchu Země vyzařováno jako infračervené záření (14%). V atmosféře je infračervené záření pohlcováno víceatomovými plyny a díky tomu dojde ke zvýšení teploty zemského povrchu. Tento jev je nazýván tzv. skleníkovým efektem. Velké množství energie, která dopadá na rozsáhlé vodní plochy v podobě oceánů a moří, se spotřebuje na vypařování vody (23%). Díky vzdušným proudům je vodní pára vynášena směrem vzhůru. V chladnějších vrstvách atmosféry pára kondenzuje a předává své skupenské teplo okolnímu vzduchu. Zbylé sluneční záření, pohlcené samotným zemským povrchem (10%), je odváděno konvekcí. Velmi malé množství energie, které dopadá na Zemi, připadá na biologické reakce, jež probíhají v biosféře (cca 1%). Jednoduché znázornění této energetické bilance je vyobrazeno na obrázku č. 1.2 [10] v příloze A.[1] [10]

2 Vlastnosti solárního záření

V této kapitole jsou uvedeny a popsány základní informace a vlastnosti solárního záření, mezi které patří například spektrum, vlnová délka a intenzita solárního záření. Před samotným rozбором vlastností jsem zde uvedl ještě několik informací o základní částici sluneční radiace, tedy o fotonu.

2.1 Foton

Foton je v částicové fyzice elementární částice, kterou využíváme k popisu kvanta elektromagnetické energie. Obvykle se značí řeckým písmenem γ .

2.1.1 Vlastnosti

Veškeré elektromagnetické záření má tzv. duální charakter, to znamená, že má charakter jak částice tak vlnění. Skládá se z částic fotonů, jež vznikají právě jeho kvantováním, ale za určitých podmínek mají vlastnosti vln. Při nízkých frekvencích se projevují vlnové vlastnosti elektromagnetického záření, naopak při vysokých frekvencích se projevují částicové vlastnosti.[1] [10]

Energie, hmotnost

Fotony mají nekonečný poločas rozpadu, jsou tedy velmi stabilní. Vznikají a zanikají při interakcích. Jejich elektrický náboj je nulový. Spin mají roven 1, jsou to tedy bosony. Bosony jsou subatomární částice, které mají celočíselný spin a symetrickou vlnovou funkci. Foton existuje jen a pouze v pohybu a ve vakuu se vždy pohybuje rychlostí světla. A díky tomu má nulovou klidovou hmotnost. Avšak v důsledku neustálého pohybu je nenulová energie této částice. Čím rychleji kmitají, tím větší mají energii. Tuto energii lze vypočítat pomocí vzorce (2.1.).

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad [\text{J}] \quad (2.1)$$

Kde: h ...je Planckova konstanta ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s)

f ...je frekvence (Hz)

c ...je rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹)

λ ...je vlnová délka (m)

Energii lze též vyjádřit pomocí relativistického vztahu ekvivalence hmotnosti a energie (2.2), to znamená, že lze fotonu přiřadit určitou hmotnost. Nejedná se však o klidovou ale o pohybovou hmotnost, která se projevuje znaky setrvačnosti i gravitace. Tato energie a pohybová hmotnost zapříčiňují, že dle obecné teorie relativity působí na foton gravitace a zároveň i foton samotný působí gravitačně na své okolí. Tyto jevy lze vypořizovat například na ohybu záření kolem kosmického tělesa.

$$E = m \cdot c^2 \quad [\text{J}] \quad (2.2)$$

Kde: c ...je rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

m ...je hmotnost (kg)

Hybnost

Hybnost lze vypočítat pomocí relativistického vztahu pro energii pohybující se částice (2.3) a faktu, že foton má klidovou hmotnost rovnou nule $m_0=0$. Pak je hybnost možné vypočítat dosazením do vzorce (2.4).

$$E = \sqrt{m_0^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \quad [\text{J}] \quad (2.3)$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad [\text{Kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.4)$$

Klidová hmotnost fotonu je sice nulová, ale můžeme určit jeho pohybovou hmotnost (2.5) ze vztahu (2.3) a předpokladu $p = m \cdot c$.

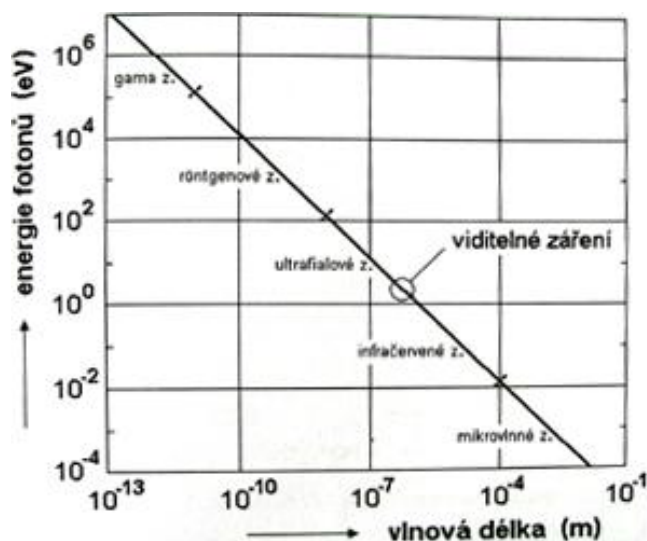
$$m = \frac{h \cdot f}{c^2} = \frac{h}{c \cdot \lambda} \quad [\text{kg}] \quad (2.5)$$

[1][10]

2.2 Spektrum solárního záření

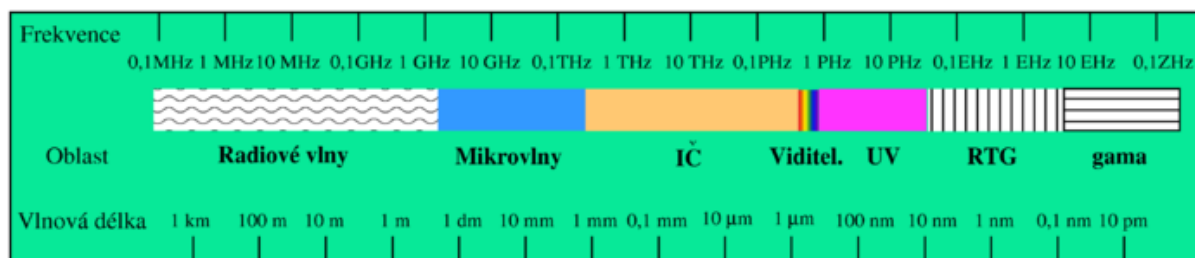
Sluneční energie je na Zemi a do okolního vesmíru přenášena pomocí elektromagnetického záření různých vlnových délek tvořících spektrum solárního záření, projevujících se jako tok částic zvaných fotony. Na základě faktů, které nám říkají, že vlnová délka je přímo úměrná době kmitu $\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T$ a nepřímo úměrná frekvenci f , lze tvrdit, čím menší je vlnová délka, tím větší je energie fotonu, což je možné vidět v grafu na obrázku číslo 2.1.

I když má každé záření různou vlnovou délku či energii fotonů, ve vakuu se všechna šíří rychlostí světla, tj. jak jsem se již zmínil $3 \cdot 10^8$ m/s.



Obr. 2.1: Graf závislosti energie fotonů na vlnové délce [7]

Celé spektrum solárního záření je zobrazeno na obrázku číslo 2.2. Tomuto zobrazení se říká tzv. Maxwellova duha. Mezi jednotlivými zářeními neexistují jasné hranice.



Obr. 2.2: Spektrum solárního záření [7]

Největší vlnové délky v rozmezí od několika milimetrů až po stovky metrů mají rádiové vlny a dosahují frekvencí nižších než $3 \cdot 10^9$ Hz. Tyto vlny jsou využívány k přenosu dat či ke komunikaci a jsou vyzařovány anténami běžných délek. Fotony tohoto záření mají energii v rozmezí od $6,2 \cdot 10^{-10}$ - $1,24 \cdot 10^{-5}$ eV.

Dále následují mikrovlny, které mají vlnovou délku přibližně $0,1 \cdot 10^{-3}$ - $0,1$ m s frekvencí $3 \cdot 10^9$ - $300 \cdot 10^9$ Hz. Jsou využívány radary, mobilními telefony, GPS přístroji a asi nejznámějším komerčním využitím jsou mikrovlnné trouby pro ohřev potravin. Fotony tohoto záření mají energii v rozmezí od $1,24 \cdot 10^{-5}$ - $1,24 \cdot 10^{-2}$ eV.

Třetím v pořadí je infračervené záření, které dosahuje vlnových délek od $790 \cdot 10^{-9}$ m do 0,1 m a frekvencí $300 \cdot 10^9$ - $400 \cdot 10^{12}$ Hz. Je vyzařováno rozžhavenými tělesy a vnímáme ho jako tepelné záření. Energie fotonů je přibližně 0,0124 - 1,57 eV.

Jediným elektromagnetickým zářením, které dokáže člověk vnímat svým zrakem, je viditelné světlo, jež je absorbováno a emitováno elektrony při přechodu mezi jednotlivými energetickými hladinami záření. Viditelné světlo obsahuje vlnové délky $390 \cdot 10^{-9}$ – $790 \cdot 10^{-9}$ m a je jednou z nejvýznamnějších složek solárního záření, které dopadá na povrch Země. Frekvenční pásmo začíná na $400 \cdot 10^{12}$ Hz a končí na hranici $700 \cdot 10^{12}$ Hz. Energie fotonů se pohybuje mezi 1,57 - 3,18 eV. Viditelné světlo je možné pomocí skleněného hranolu rozložit podle vlnových délek na jednotlivé spektrální barvy.

Ultrafialové záření pokrývá vlnové délky od $10 \cdot 10^{-9}$ m do $390 \cdot 10^{-9}$ m a dosahuje frekvencí 10^{15} Hz – 10^{17} Hz. Fotony tohoto záření mají vysokou energii a díky ní mohou štěpit chemické vazby a poškozovat DNA, což může vést až ke vzniku rakovinného bujení a dalších onemocnění. Pro lepší představu, tato se energie pohybuje mezi 3,18 eV a 124 eV. Naštěstí značnou část UV záření zadrží atmosféra naší planety.

Krátké vlnové délky v rozmezí od $0,1 \cdot 10^{-9}$ m do $10 \cdot 10^{-9}$ m má rentgenové záření. Frekvence kmitů lze nalézt v pásmu 10^{17} Hz – 10^{20} Hz. Díky velmi vysoké energii fotonů ve škále od $1,24 \cdot 10^2$ do $1,24 \cdot 10^6$ eV je toto záření velmi pronikavé, avšak atmosférou nedokáže projít. Využívá se například v lékařství pro diagnostická vyšetření jako je skiografie (klasický rentgen) či počítačová tomografie neboli CT. V průmyslu se používá při defektoskopických zkouškách.

Zářením s nejkratšími vlnovými délkami pod $0,1 \cdot 10^{-9}$ m je záření gama. Frekvence tohoto záření je vyšší než $2,42 \cdot 10^{18}$ Hz. Jedná se o radioaktivní záření, které vzniká při radioaktivních a jiných dalších jaderných a subjaderných dějích. Projevuje se velkou pronikavostí a má ionizující účinky. Využívá se například v lékařství v neurochirurgii jako tzv. Leksellův gama nůž.

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, část záření je pohlcena atmosférou. To se však týká jen některých vlnových délek. UV záření je do vlnové délky $290 \cdot 10^{-9}$ m zcela absorbováno, od $290 \cdot 10^{-9}$ m do $320 \cdot 10^{-9}$ m jen z části. Absorbérem je zde ozónová vrstva.

U IR záření se to týká jen určitých vlnových délek a ty jsou pohlcovány CO₂ a vodou. Viditelné světlo je absorbováno jen částečně, což závisí na tloušťce vrstvy atmosféry, kterou světlo musí projít. [11][12] [7]

2.3 Intenzita solárního záření

Intenzita solárního záření $I [W.m^{-2}]$ je základní veličinou, kterou využíváme při popisu slunečního záření. Je definována jako množství zářivé energie, které za jednotku času dopadá na jednotkovou plochu orientovanou kolmo ke slunečním paprskům. Na plochu České republiky dopadne za rok záření o energii v rozmezí 950 - 1 340 kWh.m⁻². Intenzita slunečního záření se mění během roku i během jednoho ročního období a to jak vlivem absorbujících účinků atmosféry, tak i vzájemnou polohou Země vůči Slunci. Dalšími faktory způsobující její kolísání jsou počasí a denní doba. V souvislosti s počasím a denní dobou kolísá záření v našich zeměpisných podmínkách mezi 0 W.m⁻² v noci a 1 000 W.m⁻² ve dne při jasné obloze v poledních hodinách. 1 000 W.m⁻² je však hodnotou získanou za ideálních podmínek, které mohou nastat jen výjimečně. [13] [7]

2.4 Přímé x difúzní záření

Rozlišujeme dva typy solárního záření a to záření přímé a difúzní.

Přímé sluneční záření není při průchodu atmosférou odraženo ani pohlceno a poté znovu vyzářeno. Taktéž nedochází k jeho rozptylu. Hlavním znakem je mnohonásobně vyšší intenzita v jednom směru než v ostatních na rozdíl od difúzního záření, jež má intenzitu ve všech směrech stejnou. To znamená, že přímé solární záření je silně závislé na úhlu dopadu paprsku. Dále je také omezeno propustností atmosféry, která je zohledňována v součiniteli znečištění (zákalu). Může nabývat průměrných hodnot:

Z = 1 Rayleighova atmosféra - ideální atmosféra - bez vodní par, aerosolů, prachu

Z = 2 hory Z = 2 až 3 venkov

Z = 3 až 4 město

Z = 4 až 5 průmyslová oblast

Z = 8 silně znečištěné prostředí, smog

Součinitel znečištění atmosféry se v průběhu roku mění především zásluhou rozdílného množství vlhkosti vzduchu. V zimě je méně vlhkosti než v létě. V tabulce č. 2.1 můžeme vidět běžné součinitele zákalu atmosféry v průběhu roku.

Tab. 2.1: Běžné součinitele znečištění atmosféry v průběhu roku

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Prům.
hory	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,3	2,3	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,9
venkov	2,1	2,2	2,5	2,9	3,2	3,4	3,5	3,3	2,9	2,6	2,3	2,2	2,8
město	3,1	3,2	3,5	4,0	4,2	4,3	4,4	4,3	4,0	3,6	3,3	3,1	3,8
průmyslová oblast	4,1	4,3	4,7	5,3	5,5	5,7	5,8	5,7	5,3	4,9	4,5	4,2	5,0

[1] [14]

Na povrchu Země je intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na plochu kolmou k paprskům:

$$I_{PN} = I_0 \cdot A^{-Z} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.6)$$

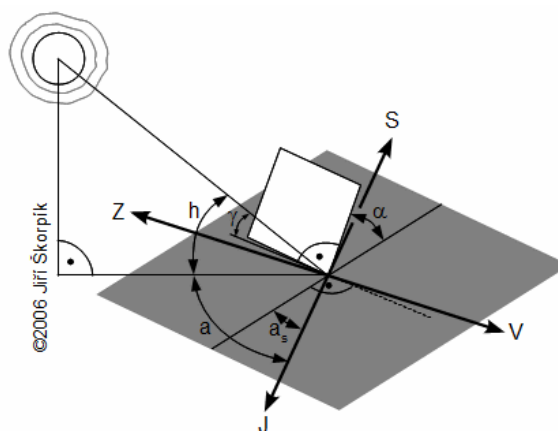
Kde: $I_0 \dots$ je solární konstanta ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
 $A \dots$ je součinitel závisující na výšce h Slunce nad obzorem (rad , $^\circ$)
 $Z \dots$ je součinitel znečištění (zakalení) atmosféry (-)

Na obecnou plochu položenou na zemském povrchu dopadá sluneční záření o intenzitě:

$$I_P = I_{PN} \cdot \cos \gamma \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.7)$$

Kde: $\gamma \dots$ je úhel dopadu svíraný paprsky Slunce a normálou osluněné plochy

Pokud se nemění poloha osluněné plochy, mění se úhel γ v závislosti na čase tedy poloze Slunce. Jestliže poloha plochy není konstantní, úhel γ se mění v závislosti na výšce Slunce.



Obr. 2.3: Dopad slunečního záření na obecně položenou plochu
 a azimut Slunce; a_s azimut osluněné plochy; α sklon plochy od vodorovné roviny; h výška Slunce nad obzorem; γ úhel dopadu slunečních paprsků. [13]

Difúzní záření vzniká rozptylem o molekuly plynů, prachu a o mraky v atmosféře. Na povrch Země dopadá se stejnou vlnovou délkou jako sluneční záření přímé. K difúznímu záření se však ještě připočítává část přímého záření, která se odrazí od různých ploch v okolí. Při zatažené obloze je také jediným zářením, které dopadá na zemský povrch. Aby bylo možné spočítat jeho velikost, je předem nutné znát úhel osluněné plochy, difúzní horizontální intenzitu (2.8) a přímé horizontální záření (2.9). Pak jej lze spočítat pomocí vzorce (2.10).

$$I_{Dh} = 0,33 \cdot (I_0 - I_{PN}) \sin h \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.8)$$

$$I_{Ph} = I_{PN} \cdot \sin h \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.9)$$

$$I_D = 0,5 \cdot (1 + \cos \alpha) \cdot I_{Dh} \cdot r \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot (I_{Dh} + I_{Ph}) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.10)$$

Kde: h ... je výška Slunce nad obzorem

α ... je úhel osluněné plochy

r ... je reflexivita povrchů (albedo)

Celkové sluneční záření (2.11) na určitou plochu je pak dáno součtem přímého a difúzního záření a je označováno jako Globální záření.

$$I = I_p + I_D \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.11)$$

[2]

2.5 Solární konstanta

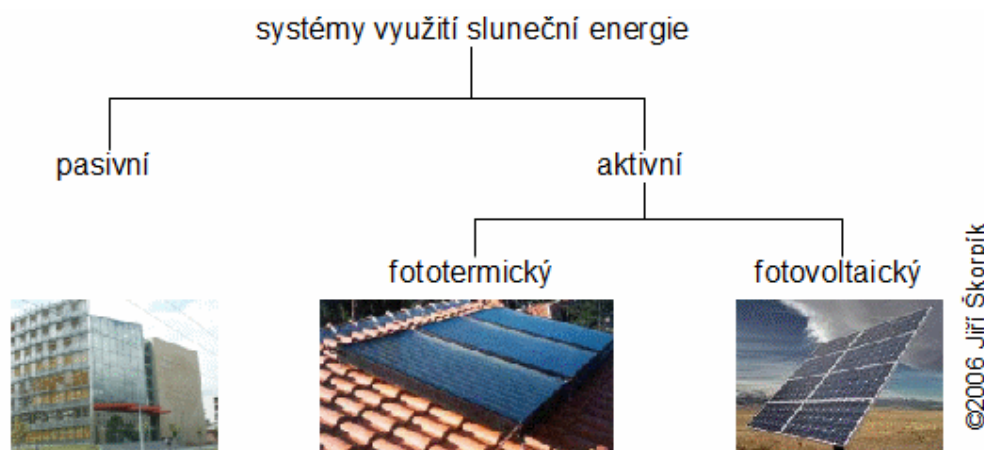
Solární konstanta se značí I_0 a je udávána v jednotkách $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Vyjadřuje celkové kvantum energie, které dopadá za jednotku času na jednotku plochy kolmou ke směru šíření záření umístěnou ve střední vzdálenosti Země od Slunce. Je měřena mimo zemskou atmosféru, přesněji řečeno na její hranici. Tato konstanta nezahrnuje pouze viditelné záření, ale celé spektrum solárního záření.

Před začátkem kosmických programů byla tato konstanta počítána z pozemních měření slunečního záření a odhadů průchodu sluneční radiace atmosférou pro různé části spektra. Tehdy měla hodnotu $1\,322 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (C. G. Abbot). Díky rozvoji kosmického programu bylo možné tuto hodnotu změřit přesněji zásluhou družic umístěných přímo na hranici atmosféry. Díky tomu byla stanovena velikost solární konstanty na $1\,370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Ve skutečnosti však není úplně konstantní vlivem excentricity oběžné dráhy Země, což způsobuje určité změny v její velikosti. Nemění se však o více jak 3 %. Menší změny dosahující maximálně několika desetin procenta jsou způsobeny aktuálně probíhajícími slunečními cykly. [1] [13] [15]

3 Technické možnosti využití solárního záření

Energii slunečního záření můžeme využívat mnoha způsoby. Nejjednodušším způsobem je fototermální přeměna v tepelnou energii, kdy absorpcí solárního záření na povrchu kapalin a tuhých látek se energie fotonů mění v teplo. Takto získanou tepelnou energii můžeme využívat pro ohřev TUV či pro vytápění. Další možností jak využít sluneční záření je jeho zachycování ještě ve formě fotonů a přeměňovat ho na elektrickou energii pomocí fotovoltaických panelů. Lze jej také využít pro absorpční chlazení, které je používáno u určitých druhů klimatizací či chladniček.

Sluneční energii je tedy možné využívat k výrobě jiného druhu energie několika způsoby a to buď za pomoci aktivních, nebo pasivních systémů.



Obr. 3.1: Obecné rozdělení systému využití sluneční energie [13]

3.1 Pasivní solární systémy

S pasivními solárními systémy se setkáváme běžně ve svém životě, aniž bychom o tom věděli. Pasivním solárním systémem je každá budova, která ze svého okolí využívá tepelnou energii získanou nejen fototermální přeměnou solárního záření a to díky své urbanistické, architektonické a stavebně konstrukční koncepci. Pasivním systémem však nemusí být celá budova, ale třeba jen její určité části. K přenosu energie není potřeba žádných technických prostředků, dochází k jejímu přirozenému transportu. Účinnost, s kterou využíváme záření, je u každé budovy nebo její části rozdílná.

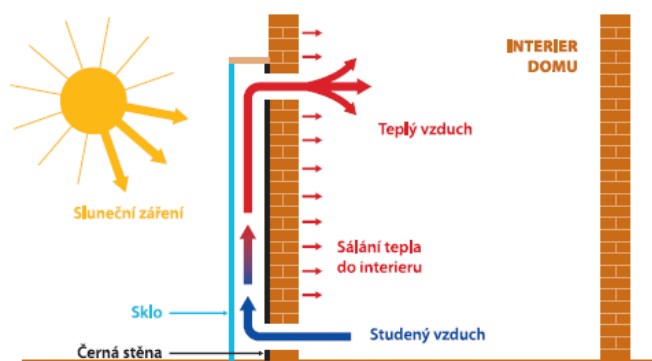
Problematikou pasivního využívání solárního záření k vytápění ale i k chlazení budov se zabývá speciální obor tzv. solární architektura. Nejdůležitějšími zásadami u tohoto oboru jsou

umístování prosklených ploch a tepelně akumulčních stěn na jižní stranu objektu, omezení členitosti objektu a tím i povrchu obvodových stěn, přes které by mohlo docházet k ochlazování. Dále je kladen velký důraz na tepelnou izolaci a využívání obnovitelných zdrojů pro energetické zásobování daného objektu. Cílem je dosáhnout co nejmenší spotřeby energie zejména pro vytápění především za pomoci slunečního záření. Domy stavěné s ohledem na výše zmíněné zásady solární architektury jsou nazývány Slunečními domy.



Obr. 3.2: Ukázka slunečního domu [16]

Mezi pasivní systémy patří akumulční solární stěny. Jedná se o základní prvek solární architektury. Prosklená jižní strana funguje jako kolektor, podlaha a stěny jsou realizovány z materiálů s vysokou tepelnou kapacitou a slouží jako tepelné zásobníky, čímž zabráňují přehřátí vnitřních prostor objektu při slunečním svitu a při poklesu teploty uvolňují teplo do prostoru sáláním. Na tomto principu funguje například tzv. Trombeho stěna. Je tvořena masivní stěnou, která je ze strany exteriéru natřena tmavou barvou, nejčastěji černou. Před touto konstrukcí je ve vzdálenosti 0,1 m umístěna skleněná průčelní plocha. U podlahy a stropu jsou uzavíratelné průduchy, kterými můžeme regulovat tento systém.



Obr. 3.3 Trombeho stěna [17]

Dále mezi tyto systémy patří například energetické fasády, které jsou ve své podstatě jednoduchými vzduchovými kolektory. Před normální fasádou budovy, která plní funkci absorpční plochy, je umístěn transparentní plášť tvořený skleněnou deskou. Sluneční záření ohřívá zeď a od ní dále vzduch, který proudí vlivem přirozené konvekce. V zimním provozu lze tímto způsobem vytápět celou budovu. V letních měsících je energetická fasáda schopna mnohem lépe odvádět tepelnou zátěž z osluněné strany budovy než samotná klasická fasáda. V létě tedy nepracuje jako solární kolektor, ale jako větrací šachta s přirozenou cirkulací vzduchu.

Vzduchový kolektor lze též umístit na střešní konstrukci a pak je nazýván energetickou střechou. Aby bylo možné dosáhnout dostatečného účinného vztlaku v letním provozu s přirozenou cirkulací, je nutné mít výškový rozdíl mezi vstupem a výstupem do kolektoru, Hodí se tedy především pro šikmé střechy s úhlem sklonu alespoň 30°. Ve většině případů se kombinuje se stěnovým kolektorem.

Pasivní metoda využití slunečního záření je jednoduchá a poměrně levná, avšak sama o sobě má omezené uplatnění. [1][18][12]

3.2 Aktivní solární systémy

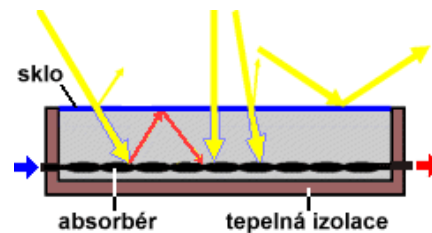
Aktivní solární systémy lze rozdělit do dvou základních skupin a to na tepelné systémy a fotovoltaické systémy. Jako další skupinu bychom mohli považovat ještě netradiční systémy, kam patří například umělá fotosyntéza. Tyto systémy přeměňují sluneční záření přímo na jinou formu energie.

3.2.1 Tepelné solární systémy

3.2.1.1 Nízkoteplotní solární systémy

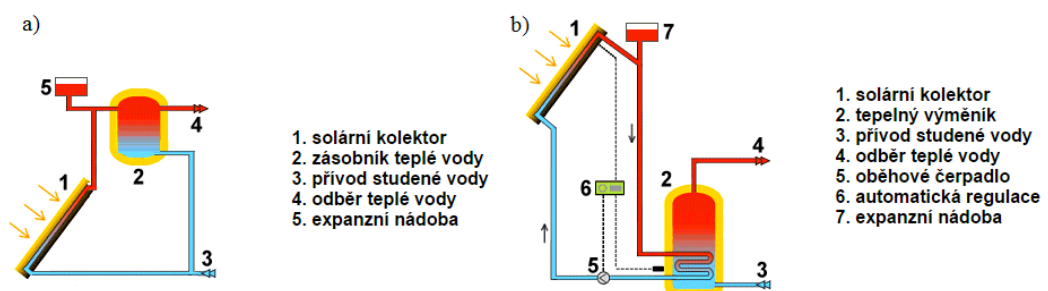
První skupinou tepelných solárních systémů jsou nízkoteplotní solární systémy. U těchto systémů se využívá rovinných solárních kolektorů, které žádným způsobem nekonzcentrují záření. Jejich účinná plocha nejen zachycuje, ale i pohlcuje slunečního záření a to jak přímé, tak i difúzní. Hustota světelného toku je v tomto případě malá. Díky tomu lze dosáhnout maximální teploty jen 200 °C. Rovinný kolektor se skládá z několika součástí. V rámu je uložen absorbér, který bývá pokryt vhodnou povrchovou vrstvou zvyšující pohltivost a omezující odrazivost, a potrubní systém. Zadní plocha a boky rámu jsou tepelně izolovány.

Přední plocha nad absorberem je tvořena průhledným krytem, ve většině případů sklem. Konstrukce těchto kolektorů je tedy jednoduchá, pevná a poměrně levná oproti sběračům fokusačním, které však již patří do skupiny vysokoteplotních solárních systémů, které budou popsány později. Účinnost přeměny slunečního záření na tepelnou energii se pohybuje mezi 30- 50 %. Tento typ systému se nejčastěji využívá k přípravě TUV, ohřevu bazénové vody a v některých případech pro přitápění do topného systému ve spojení s krátkodobou nebo dlouhodobou akumulací tepla



Obr. 3.4: Schéma plochého rovinného kolektoru [19]

Základním prvkem nízkoteplotního tepelného solárního systému je ve valné většině případů solární kapalinový kolektor (může být i vzduchový), ke kterému jsou pomocí potrubí s tepelnou izolací připojeny další elementy tvořící primární okruh. Jedná se o oběhové čerpadlo, pojistný ventil, expanzní nádobu, automatický odlučovač plynů, zpětnou klapku, uzavírací armatury, akumulační nádobu aj. V tomto uspořádání jde o jednookruhové systémy. Ty jsou vhodné pro sezónní použití. Pokud je soustava vybavena výměníkem, přibude do obvodu ještě sekundární okruh a systém se stává dvouokruhovým. Tento typ se hodí pro celoroční použití, a tak je nutné, aby primárním okruhem cirkulovala nemrznoucí kapalina (solanka, kapaliny na bázi propylenglykolu, ad.), aby v zimních měsících nedocházelo k zamrznutí. V sekundárním okruhu již opět proudí voda jako v případě jednookruhového systému. Oběh teplonosné látky může být buď samotížný, nebo s nucenou cirkulací (pomocí oběhového čerpadla), a to při atmosférickém nebo vyšším tlaku. Solární systémy lze kombinovat i s jinými zdroji tepla (například tepelnými čerpadly, elektrickými a plynovými kotli). [1][2] [12]



Obr. 3.5: a) Jednookruhový kapalinový solární systém, b) Dvouokruhový kapalinový solární systém [12]

3.2.1.2 Vysokoteplotní solární systémy

Vysokoteplotní systémy využívají sběračů s koncentrací zářivé energie. Ty se skládají ze sběrné odrazové plochy (zrcadla) a absorbéro. Poměr plochy zrcadla a plochy absorbéro udává míru koncentrace hustoty toku záření (vztah 3.1).

$$\delta = \frac{S_Z}{S_A} \quad [-] \quad (3.1)$$

Kde: S_A ...je plocha absorbéro (m^2)

S_Z ... je plocha zrcadla (m^2)

U fokusačních sběračů, ale i u sběračů se systémem otočných rovinných zrcadel neboli heliostatů je velmi důležité aby plocha pohlcující záření S_A byla menší než sběrná plocha S_Z . Tím se zajistí zvýšení hustoty toku zářivé energie, která dopadá na absorbér. V důsledku čehož je možné dosáhnout vyšších teplot. Zmenšením plochy absorbéro současně omezíme ztráty tepla do okolí. Nevýhodou vysokoteplotních systémů je, že dokážou využít pouze přímé záření. Účinnost se pohybuje mezi 50 – 75%.

Jedním z příkladů mohou být sběrače se zrcadly tvaru parabolického nebo kruhového válce, které soustřeďují sluneční záření na absorbér, jenž je obvykle tvořen trubicí umístěnou v ohniskové přímce zrcadla. Tato trubice je buď natřena černou barvou, nebo pro lepší účinnost pokryta selektivní vrstvou. Ta může být ještě uložena do skleněné trubky pro další zvýšení účinnosti. V absorbéro proudí kapalina (olej nebo voda), která může být v závislosti na množství dopadajícího přímého záření ohřívána na teplotu 250 - 700 °C. Požadovaného výkonu dosáhneme spojením jednotlivých sběračů do větších soustav. Je také velmi důležité, aby zrcadla byla otočné alespoň v jedné ose, nejlépe však kolem dvou os. Tím je docíleno, že Slunce bude vždy v rovině určené ohniskovou a vrcholovou přímkou zrcadla.

Dále do této skupiny patří sběrače se zrcadly ve tvaru rotačního paraboloidu, které jsou neúčinnějšími fokusačními sběrači. Dokážou dát největší koncentraci světelného toku záření, a proto jsou používány pro aplikace, kde je potřeba dosáhnout vysokých teplot. Přímé sluneční záření se opět soustřeďuje do ohniska, kde je umístěný absorbér, v němž je ohřívána proudící kapalina. Parabolické zrcadlo musí být otočné v azimutu a výšce, aby jeho osa stále mířila směrem ke Slunci, což je u větších sběračů problematické a nákladné z důvodu velké hmotnosti zrcadla. Nejsou tedy využívány pro velké aplikace. Pro dosažení větších výkonů

se používají Fresnelova zrcadla, která se skládají z jednotlivých segmentů (kruhových kuželů), která jsou levnější a snadnější na výrobu, než parabolická zrcadla. U velkých slunečních pecí nebo elektráren se používají pohyblivá rovinná zrcadla neboli heliostaty, jež v případě slunečních věžových elektráren soustřeďují sluneční záření přímo do ohniska, kde se nachází parní generátor, který pohání parní turbínu a ta následně elektrický generátor. U slunečních pecí nejsou heliostaty směřovány přímo do ohniska nýbrž na pevné parabolické zrcadlo, které je namířeno přesně do pevného ohniska. Takovou konstrukcí je možno dosáhnout teplot 3 000 až 4000 °C. Tyto pece jsou využívány pro tavení těžko tavitelných kovů. [6]



a) b) c)
Obr. 3.6: Ukázka jednotlivých typů sběračů: a) sběrače se zrcadly tvaru parabolického válce, b) sběrače se zrcadly tvaru paraboloidu, c) Heliostaty [20]

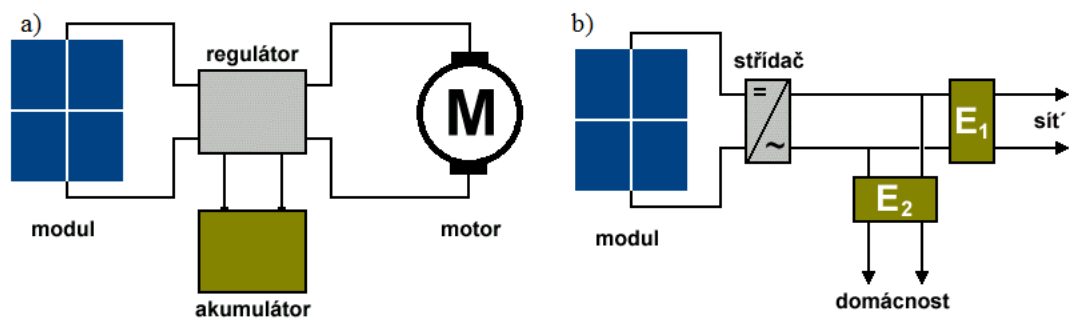
3.2.2 Fotovoltaické systémy

Druhou skupinou aktivních solárních systémů jsou fotovoltaické systémy tvořené FV panely, které přeměňují sluneční záření přímo na elektrickou energii. Každý FV panel se skládá z jednotlivých fotovoltaických článků. FV článek pracuje na principu založeném na fotovoltaickém jevu, při kterém dochází vlivem absorpce solárního záření k uvolňování elektronů z látky (fotovoltaický jev bude podrobněji popsán v kapitole č. 4), a tím dojde ke vzniku napětí. V článku tak vznikají volné elektrické náboje, které jsou ve formě elektrické energie odváděny přes elektrody například ke spotřebiči nebo přes měnič do elektrické sítě.

Podle využití můžeme fotovoltaické panely rozdělit na:

Ostrovní systémy jsou systémy, které nejsou připojeny na rozvodnou síť. Vyrobená elektrická energie je buď spotřebovávána připojenými zařízeními, anebo akumulována do akumulátorových baterií. Využívá se hlavně v místech, kde není možné připojení k distribuční síti a to ať z technického či ekonomického hlediska.

Solární systémy zapojené do sítě jsou systémy, v nichž je vyprodukovaná elektrická energie dodávána do elektrické sítě. Výhodou tohoto systému je, že vyrobenou energii můžeme spotřebovávat, a v případě jejího přebytku dodávat do sítě. V době nedostatku vlastního výkonu je pak také možné odebírat elektrickou energii z distribuční sítě. To však již není ekonomicky výhodné. [21]



Obr. 3.5: Jednoduché schematické znázornění a) Solárního ostrovního systému a b) solárního systému se zapojením do sítě [12]

4 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev byl objeven v roce 1839 Alexandrem E. Becquerelem. V roce 1905 byl tento jev Albertem Einsteinem popsán a objasněn. Za tento počín, přesněji řečeno za vysvětlení vnějšího fotoefektu neboli fotoemise, byl v roce 1921 oceněn Nobelovou cenou za fyziku. Kromě vnějšího fotoefektu je v dnešní době znám i fotoefekt vnitřní, který má dvě formy a to fotovodivost a fotovoltaický jev. [1]

4.1 Vnější fotoelektrický jev

4.1.1 Fotoemise

Fotoemise je fotoelektrickým jevem, který pozorujeme u kovů. Při dopadu záření na povrch kovového materiálu jsou elektrony uvolňovány z jeho vodivostního pásu a samotný krystal kovu opouštějí. K fotoemisi elektronů dochází bezprostředně po dopadu elektromagnetického záření s dostatečně velkým množstvím energie, a to i bez ohledu na jeho intenzitu.

Na základě experimentu provedeného na speciální fotonce bylo zjištěno, že pro každý kov existuje mezní frekvence f_0 (té odpovídá mezní vlnová délka λ_0). K emisi elektronů pak dochází pouze v případě, je-li frekvence dopadajícího záření rovna nebo vyšší než f_0 (respektive při vlnové délce λ_0 a nižších).

Dále bylo prokázáno, že energie emitovaných elektronů není závislá na intenzitě záření, ale je určena pouze jeho frekvencí. To samé platí i pro jejich rychlost, kde ještě záleží na kovovém materiálu. Naopak množství uvolněných elektronů je přímo úměrné intenzitě.

[1][10]

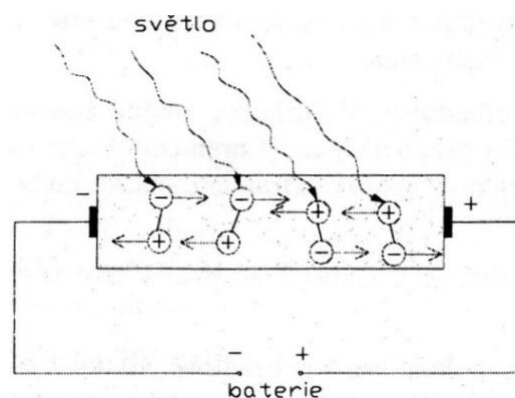
4.2 Vnitřní fotoelektrický jev

Vnitřní fotoelektrický jev pozorujeme u polovodičů. Vlivem dopadajícího elektromagnetického záření dochází k uvolňování elektronů z elektronových obalů atomů. Tyto elektrony zpravidla samotný polovodič neopouštějí, pouze zvyšují jeho vodivost. [1]

4.2.1 Fotovodivost

Fotovodivost je jevem, při kterém dochází k pohlcení elektromagnetického záření uvnitř pevné látky. Díky absorpci může dojít u některého z elektronů k jeho vybuzení do vyššího energetického stavu, tím se z něj stává volný elektron, který může způsobit zvýšení vodivosti materiálu. U polovodičů a izolantů je tedy zvýšení vodivosti závislé na počtu absorbovaných kvant. Krystalickými polovodičovými materiály jsou například křemík a germanium.

Připojením baterie k takovému materiálu (obr. 4.1) dojde k přenosu náboje a obvodem začne protékat proud. Sluneční záření podporuje vznik tohoto proudu, který je však v podstatě zajištěn baterií. Přímá přeměna energie záření na elektrický proud tak v tomto případě zatím nenastává. Uvnitř látky sice dochází k transformaci energie záření na energii elektronů, ale energie potřebná k tomu, aby nastal jejich usměrněný pohyb, tj. elektrický proud, je odebírána z baterie. Aby vznikaly volné náboje pouze vlivem působení záření, musí být energie dopadajících kvant tak veliká, aby stačila k překonání energetického rozdílu mezi valenčním a vodivostním pásem polovodiče. [1]



Obr. 4.1: Fotovodivost[1]

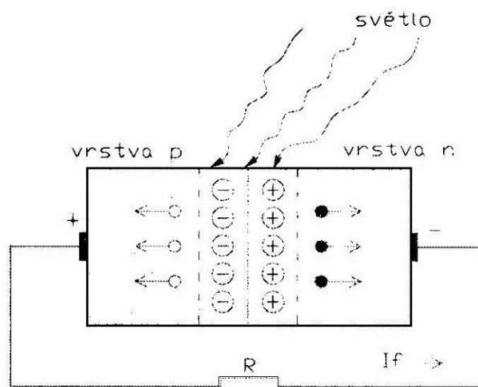
4.2.2 Fotovoltaický jev

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2, díky fotovoltaickému jevu dochází v solárních článcích k přímé přeměně slunečního záření na elektrickou energii. Solární články se sestávají z polovodičů. Polovodiče jsou látky, které svými vlastnostmi leží mezi kovy a dielektriky. Hlavním rozdílem oproti kovům je ten, že polovodiče neobsahují volné elektrony, ty v nich však mohou vzniknout a to buď jejich zahřáním, nebo právě dopadem záření. Nejčastěji používaným polovodičovým materiálem je křemík. Částice jsou v atomu drženy méně pevnými kovalentními vazbami, a k uvolnění elektronů z vazby křemíku stačí, aby byla přivedena energie o velikosti alespoň 1,12 eV. Žádaných elektrických vlastností je možné dosáhnout záměrným znečištěním křemíku určitými cizími atomy. Dotace se ve většině případů provádí troj nebo pěti mocnými prvky a je měněna v širokých mezích v závislosti na požadované elektrické vodivosti. Takto znečištěný křemík je nazýván dotovaným (příměsovým) polovodičem.

Čtyři valenční elektrony atomu Si tvoří vazby elektronových párů se sousedními atomy. U krystalických článků při tom vzniká pravidelná krystalická mřížka. Článek je realizován dvěma spolu hraničícími odlišně dotovanými polovodičovými oblastmi. Mezi kladně dotovanou (p) a záporně dotovanou (n) oblastí vzniká vnitřní elektrické pole, které je způsobeno difúzí nadbytečných elektronů z polovodiče typu n do polovodiče typu p v prostoru PN přechodu. Tím vzniká oblast tzv. vrstva prostorového náboje, která se vyznačuje malým počtem volných nosičů náboje. V oblasti p vrstvy prostorového náboje zbývají záporné, v oblasti n vrstvy zbývají kladně nabitě atomy daného dotujícího prvku, čímž vzniká elektrické pole opačně orientované vůči směru pohybu nosičů náboje. Difuze elektronů tedy nemůže probíhat donekonečna.

Po dopadu světla na solární článek (přesněji na PN přechod), může zářivá energie fotonů uvolňovat elektrony z jejich vazeb v atomové mřížce. Fotony se přitom absorbují. Uvolněné elektrony (záporný náboj) se pak mohou volně pohybovat a na svém původním místě ponechají kladný náboj nazývaný jako díra. Vlivem elektrického pole článku jsou elektrony a díry přitahovány do opačných směrů. Záporné náboje postupují k přední straně článku a kladné k zadní straně. Tím obě strany získají opačnou polaritu. V důsledku rozdílné polarity přední a zadní strany mezi nimi vzniká elektrický potenciál (elektrické napětí). Na solárním článku se tedy objeví napětí difúzí nosičů náboje k elektrickým kontaktům. Jedná se o tzv.

napětí naprázdno, které je u křemíkových krystalických solárních článků v rozmezí 0,6 V až 0,7 V. Uzavřením elektrického obvodu začne protékat proud. Některé volné elektrony nedoputují ke kontaktům článku, a dojde k jejich rekombinaci. Rekombinovaný elektron se však nepodílí na průtoku proudu. [5]



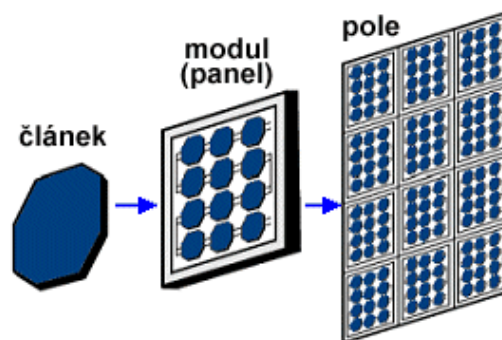
Obr. 4.2: Fotovoltaický jev[1]

5 Fotovoltaické články a panely

FV článek je velkoplošný polovodičový prvek alespoň s jedním PN přechodem. Ve valné většině případů se skládá z vhodně upraveného polovodičového materiálu, kovových kontaktů a z tenké vrstvy materiálu, která slouží ke zlepšení optických vlastností. Mimo polovodičů se dají použít i organické materiály ve formě polymerních vrstev. Princip funkce je vysvětlen v předchozí kapitole 4.2.2.

Články se samostatně téměř nepoužívají. A to především z důvodu jejich malého výstupního napětí a výkonu. Při napětí 0,5 V je schopen dodávat přibližně 1,2 až 1,4W. Abychom získali požadované výstupní napětí a výkon, je nutné pospojovat více článků najednou do tzv. modulů, neboli FV panelů. Sériovým zapojením se jejich napětí sčítají a výstupní proud je roven proudu generovaného jedním článkem. Naopak v paralelním zapojení se sčítají proudy a napětí zůstává stejné. Většinou jsou solární články jednoho panelu spojeny sériovým zapojením.

FV Panely pak zapojujeme obvykle kombinací výše zmíněných zapojení do FV polí tzv. solárních generátorů. [1] [22]



Obr. 5.1: Ukázka FV článku, FV panelu a FV pole [12]

5.1 Typy FV článků

První skutečný FV článek byl vyroben z krystalického křemíku v roce 1954 v laboratořích firmy Bell. K výraznějšímu rozvoji fotovoltaiky došlo v 60. letech minulého století s nástupem kosmického výzkumu, kdy byly solární články využívány jako zdroj elektrické energie pro vesmírné družice. Další významný posun v oblasti vývoje nastal v roce 1973 v důsledku celosvětové ropné krize. Největšího pokroku bylo dosaženo v posledních 10 až 15 letech. FV články jsou tedy vyvíjeny více než 50 let. Za tuto dobu vzniklo mnoho typů článků s odlišnými konstrukcemi využívající různé materiály. Pro snazší orientaci mezi jednotlivými typy lze články rozdělit do tří skupin tzv. generací. Mezi jednotlivými informačními prameny však lze zaznamenat rozdíly v podobě toho, který typ panelu patří do jaké skupiny, a tak je nutné brát toto dělení s určitou rezervou. [23]

5.1.1 FV články 1. generace

Fotovoltaické články první generace využívají jako základ destičky z krystalického křemíku. Výhodou těchto článků je poměrně vysoká účinnost blízká se 20 % (záleží na přesném typu) a výkonová stabilita po celou dobu životnosti. Jedná se o nejrozšířenější typ solárních článků s téměř 90 % podílem na celkovém trhu, i přesto, že hlavními nevýhodami jsou velká energetická náročnost výrobního procesu a spotřeba materiálu, což se projevuje ve formě vyšších nákladů. Komerčně se tyto články začaly prodávat v sedmdesátých letech. Do této skupiny patří monokrystalické a polykrystalické solární články, které budou v následujících odstavcích detailněji popsány. [23]

5.1.1.1 Monokrystalické články

Monokrystalické články jsou nejstarším typem článků. Vyrábějí se z monokrystalického křemíku, tj. z vysoce čistého materiálu, který se rovněž běžně používá v mikroelektronických aplikacích. Nejčastěji se vyrábí tzv. Czokralského metodou: Z vysoce čisté křemíkové taveniny o teplotě 1420 °C se pomocí pomalu otáčejícího zárodku krystalu vytahuje válcová monokrystalická tyč s průměrem až 0,3 m a délkou několika metrů. Tento proces krystalizace je velice energeticky náročný. Takto vzniklé tyče se přiřezávají na čtvercový průřez a poté se řežou na jednotlivé destičky tzv. wafers s tloušťkou $1 \cdot 10^{-4}$ až $3 \cdot 10^{-4}$ m, které jsou dále seřezávány do požadovaného tvaru (kruhové, polo čtvercové nebo čtvercové články). Úpravou tvaru tyčí a následným řezáním se stane velká část základního materiálu odpadem.

Následně se lapují, čímž dojde k úpravě drsnosti materiálu, odstranění nečistot a nepravidelností. Někdy je ještě povrch článku uměle zvětšován malými mikroskopickými strukturami pomocí laseru, mechanickým či chemickým zpracováním. Surové destičky se následně dotují příměsí typu P (bórem), na které se napaří tenká vrstva dotovaná difúzí fosforu (dotace N). Po umístění kontaktů je článek kompletní. Díky létům vývoje je povrch článku ještě pokryt antireflexní vrstvou, která zlepšuje optické vlastnosti. Povrch výsledného článku je homogenně tmavomodrý až černý. Z výše zmíněného popisu výrobního procesu je zcela patrné, proč je jejich výroba tak nákladná. S použitím novějších výrobních postupů jsou však výrobní náklady postupně snižovány. Jedním z nich je například technologie Ribbon Silicon, kdy je z taveniny tažen přímo tenký pásek, kdy je ze stejného množství materiálu možno vyrobit až dvojnásobně větší plochu článků. Teoretická účinnost monokrystalického článku se pohybuje kolem 24 %. Reálně lze dosáhnout hodnot pohybujících se mezi 12 až 18 %. Jsou vhodné pro použití v oblastech s vysokým podílem přímého slunečního záření. [1][5][24]

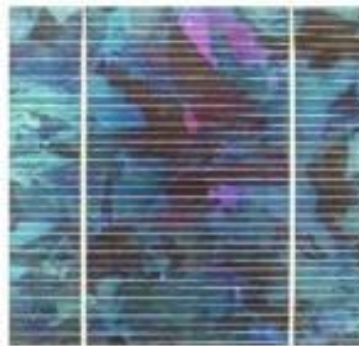


Obr. 5.2: Ukázka monokrystalického článku [25]

5.1.1.2 Polykrystalické články

Polykrystalické články jsou tvořeny několika krystaly křemíku. Od monokrystalických jsou velmi snadno rozpoznatelné podle jasně viditelných hranic jednotlivých krystalů. Články se vyrábějí odléváním čistého křemíku zahřátého na teplotu 1500 °C do vhodných forem ve vakuu. Po odlití je křemík regulovaně ochlazován až k teplotě tání. Tím vzniknou polykrystalické Si bloky 0,4x0,4x0,3 m, které se rozřežou na tyče a ty poté na samotné plátky. Odpad z řezání je zde také menší. Výroba polykrystalického křemíku je levnější a jednodušší oproti výrobě křemíku monokrystalického. Další výrobní kroky jsou shodné jako u monokrystalických článků. Tímto způsobem vyrobené články mají o něco horší elektrické vlastnosti zásluhou vyššího odporu na styku jednotlivých krystalických zrn. Nevýhodou

oproti předchozímu typu je ale menší účinnost pohybující se 11 až 13 %. Naopak výhodou je že jsou částečně schopné absorbovat i difúzní záření a při mírně oblačnosti dochází k menšímu poklesu výkonu. Proto jsou vhodnější pro použití v našich podmínkách.[1][5][24]



Obr. 5.3: Ukázka polykrystalického článku [25]

5.1.2 FV články 2. generace

Mezi hlavní důvody vedoucí k vývoji 2. generace patřily především požadavky na snížení výrobních nákladů, zejména zmenšením energetické náročnosti výrobního procesu a omezením spotřeby drahého základního materiálu- křemíku. Tyto články mají 100krát až 1000krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvu (thin- film), a proto jsou označovány jako tenkovrstvé. Díky úspoře materiálu tak došlo ke kýženému snížení výrobních nákladů a v případě velkosériové výroby i k poklesu ceny. Dalšími plusy jsou menší citlivost na teplotu a zastínění, geometrická volnost, možná průhlednost materiálu. Dále je zde umožněna volba substrátu. V případě použití flexibilních materiálů, kterými jsou například organické, kovové či textilní fólie, je možné rozšířit pole aplikací. Díky flexibilitě článků a následně pak celého modulu je do jisté míry možné měnit jejich tvar, což významně usnadňuje jejich montáž na nosnou konstrukci, která není zcela rovná. Jsou rovněž velmi lehké a manipulace s nimi je mnohem snadnější, než s články umístěnými na skleněných tabulích. Nízká váha též zaručuje minimální zátěž nosných prvků. Mezi mínusy některých článků 2. generace patří menší účinnost pohybující se kolem 10 %. Do této skupiny řadíme články z amorfního (a-Si) a mikrokrystalického (μ -Si) křemíku, silicon-germania (SiGe), siliconkarbidu (SiC), ale také tzv. směsné polovodiče z materiálů jako Cu, In, Ga, S, Se, označované obecně jako CIS struktury. Ještě lze zmínit články CdTe, Cds a GaAs. Tenkovrstvé články se začali komerčně prodávat v 80. letech. [1][5]

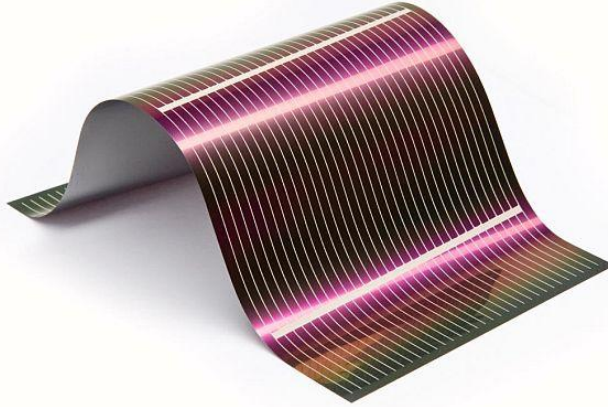
5.1.2.1 Amorfni články

Patří mezi klasické představitele tenkovrstvých článků. Základním materiálem je amorfni křemík, který netvoří pravidelnou krystalickou strukturu, ale neuspořádanou síť. Je získáván chemickým odlučováním z plynného silanu při teplotách nepřevyšujících 200 °C. Při výrobě článků je ve vodíkové atmosféře nanášen napařením na plastovou, skleněnou nebo kovovou tabuli opět při teplotě 200 °C. Tloušťka nanesené vrstvy není větší než $1 \cdot 10^{-6}$ m. Díky tomu je jejich produkce materiálově a energeticky mnohem méně náročná oproti 1. generaci a tím ve výsledku i levnější. Z důvodu krátké difúzní vzdálenosti dotovaného amorfniho křemíku je do prostoru mezi vrstvy P a N umístěna nedotovaná tzv. intrinsická vrstva, v níž je životnost nosičů náboje významně delší a ty pak nemohou okamžitě rekombinovat a nohou se podílet na generování elektrické energie. Tyto tři vrstvy tvoří tzv. pin strukturu. Mezi klady amorfniho článků mimo finančních a materiálových úspor patří vysoká absorpce světla, velké napětí naprázdno a menší pokles účinnosti při zastínění. Za zmínku ještě stojí nízký teplotní součinitel výkonu, což značí, že s rostoucí teplotou nedochází k tak podstatným změnám účinnosti jako je tomu u krystalických článků. Mezi jejich zápory patří malý výkon a účinnost, která vlivem stárnutí vyvolaného světlem v prvních 6 až 12 měsících ještě klesá. Po uplynutí této doby se však ustálí na stabilní hodnotě, která je po tomto počátečním stárnutí uváděna výrobcem jako jmenovitý výkon. Solární panely jsou tedy dodávány s přibližně asi o 15 % větším výkonem. Výsledná účinnost se pohybuje kolem 7%. [1][5] [26]

5.1.2.2 CIS a CIGS struktury

Solární články CIS a CIGS mají v současné době nejvyšší účinnost ze všech tenkovrstvých technologií. U nejlepších článků může komerční účinnost dosahovat až 15,7 %. Postup výroby je následující: nejdříve se nosné sklo nebo plastová či kovová fólie při teplotě cca 500 °C ve vakuové komoře potáhne napařovací technologií tenká kontaktní vrstva z molybdenu, na kterou se opět tou samou technologií nanese absorpční vrstva CIS (Cu, In, S) nebo CIGS (Cu, In, Ga, S) s vodivostí typu p. Přidáním vrstvy galia dochází k rozšíření absorpčního pásma. Následuje selenizace ve vodíkové atmosféře při teplotách 400 °C a vyšší. Pak se chemickou depozicí vytvoří nárazníková vrstva sulfidu kademnatého (CdS) s vodivostí typu n omezující ztráty způsobené chybami v krystalové mřížce, která je překryta funkční vrstvou oxidu zinečnatého dotovaného hliníkem. Na rozdíl od článku z amorfniho křemíku, články CIS a CIGS nepodléhají procesu stárnutí vyvolaného světlem. Dokáží též absorbovat i difúzní záření. Mezi jejich nevýhody lze zařadit použití toxických

materiálů a problémy v oblasti výkonové stability ve vlhkém a horkém prostředí, je tedy nutné klást velký důraz na dobré zapouzdření. Články jsou tmavošedé až černé barvy. [5] [27]



Obr. 5.4: Ukázka flexibilního FV panelu složeného z článků CIGS [27]

5.1.2.3 CdS a CdTe články

Články sulfidu kadmennatého jsou tvořené pn přechodem CuS a CdS dosahující účinnosti kolem 7 %. V dnešní době se již tyto články nepoužívají. Jejich výhodou byla nízká hmotnost, kvůli které byly používány v kosmických aplikacích. Mezi nevýhody patřili časová nestabilita a výše zmíněná menší účinnost. Novější variantou tohoto typu článku jsou články s heterogenním přechodem CdS a CdTe. Označovány jako články telluridu kadmennatého. Vyrábí se metodou napařování nebo napařování při teplotách okolo 700 °C ve vakuových komorách. Základním substrátem je ve většině případů sklo, na které je nejdříve napařena transparentní vrstva oxidu a poté vrstvy sulfidu a telluridu kadmennatého. Dnes se tyto články vyrábějí s účinností mezi 10 a 11 %. Jejich výroba je levná a poměrně jednoduchá. Další předností je nízký teplotní součinitel výkonu. Lze je také využívat v oblastech s částečným zastíněním. Nevýhodou je opět použití toxických prvků. [1][28]

5.1.2.4 GaAs

Tyto články vynikají vysokou účinností přesahující 20 %. Jde tedy o účinnější články, než jsou články z krystalického křemíku. Jsou odolnější vůči tvrdému kosmickému záření a jsou schopné pracovat i při teplotách nad 100 °C bez snížení výkonové stability. Mezi jejich nevýhody patří vysoká cena a větší hustota oproti krystalickému křemíku, tedy vyšší hmotnost. V poslední době se také usilovně pracuje na vývoji článků kombinující právě krystalický křemík a arsenid galia (GaAs), zejména kvůli jejich rozdílné spektrální citlivosti.

Čímž dojde k využití širšího spektra solárního záření a zvětšení účinnosti. Z důvodu vysoké ceny nejsou články GaAs komerčně příliš rozšířené. [1]

5.1.3 FV články 3. generace

3. generace ve své podstatě není novým typem solárních článků. Jedná se spíše o plány v oblasti výzkumu. Hlavními úkoly jsou především požadavky na maximalizaci počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron- díra a o maximální využití energie dopadajících světelných kvant. Jde tedy o řešení problematiky spojené s překročením tzv. Shockley-Quiesserovy hranice, která omezuje účinnost dosavadních článků. Omezení spočívá v předpokladu, že jeden foton vytváří jeden využitelný exciton s energií rovné zakázanému pásmu a přebytečná energie se mění na teplo. Touto hranicí je dána maximální teoretická účinnost článků pohybující se kolem 32 %. Po jejím překonání by se mohla teoretická účinnost zvýšit až na 87 %.

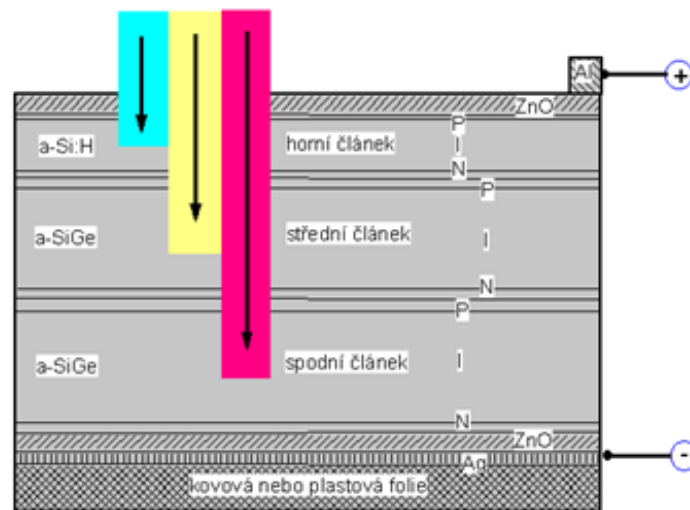
Existuje mnoho směrů, kterými se tento výzkum ubírá:

- Tandemové tenkovrstvé články
- Články s vícenásobnými pásy
- články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články (např. na bázi objemových heteropřechodů)

V dnešní době jsou zatím jediným případem dobře fungujících článků vycházejících z výzkumu tandemové a vícevrstvé články na bázi tenkých filmů. Každá vrstva (článek) má jinou spektrální citlivost a každá transformuje energii fotonů v úzkém rozsahu blízko její pásmové propusti. Články na sebe nelze libovolně vrstvit, je potřeba se řídit pravidlem, které říká, že vrchní vrstvu musí tvořit polovodič schopný pohlcovat fotony s nejvyšší energií a další vnitřní vrstvy aby byly řazeny s ohledem na postupně se snižující energii fotonů. Tandemový solární článek může mít například strukturu skládající se z p-i-n přechodu amorfního hydrogenovaného křemíku (a-Si:H) a p-i-n přechodu mikrokrytalického

hydrogenovaného křemíku (μ -Si:H), který je možné nahradit slitinou SiGe. Jejich poměrem je možné upravovat optické a elektrické vlastnosti dané vrstvy. Tento materiál je využíván u trojvrstvých článků. Schéma třívrstvého článku skládajícího se z p-i-n přechodu amorfního hydrogenovaného křemíku (a-Si:H) a dvou p-i-n přechodů SiGe je možné vidět na obrázku č. 5.3.

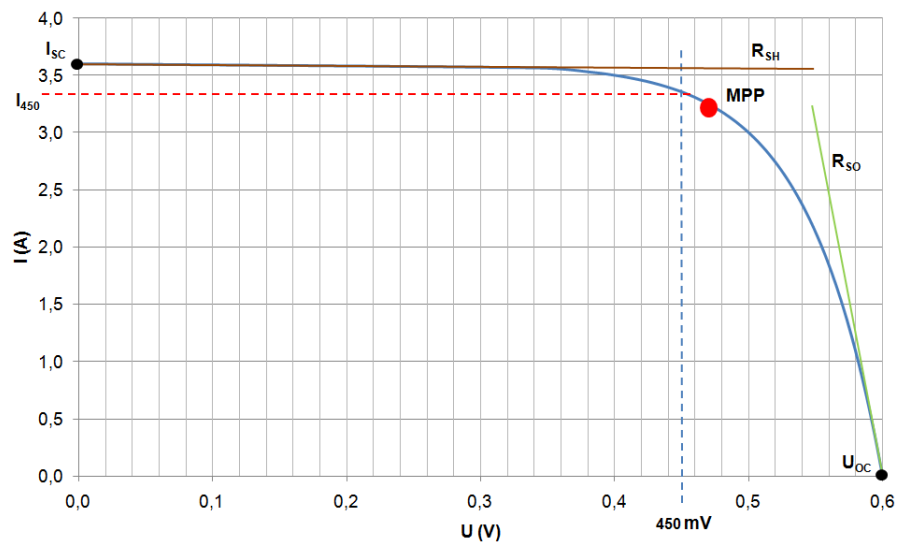
Aby vícevrstvé články fungovaly správným způsobem, je nutné, aby každý z článků generoval stejný proud. Jestliže by tomu tak nebylo, došlo by ze strany horšího článku k omezení celkové účinnosti. Výsledné napětí jednotlivých článků se pak sčítá.[1][7] [23] [29]



Obr. 5.5: Schematické znázornění struktury třívrstvého solárního článku [30]

5.2 Základní parametry fotovoltaických článků a panelů

Aby bylo možné porovnávat jednotlivé parametry FV článků nebo panelů mezi sebou, musí být měřeny za přesně daných podmínek: při intenzitě osvětlení $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, spektrálním složení světla odpovídající slunečnímu spektru (AM 1.5 Global) a při teplotě 25°C . Ty jsou označovány jako standardní podmínky (zkratka STC). AM 1.5 je modelové spektrum slunečního záření prošlého 1,5násobnou tloušťkou zemské atmosféry. Pro popis elektrických vlastností používáme tzv. V-A charakteristiku čili křivkou vyjadřující závislost proudu na napětí. Z této charakteristiky lze vyčíst i další parametry viz Obrázek 5.6. Níže jsou jednotlivá kritéria detailněji popsána na příkladu fotočlánku. [31]



Obr. 5.6: Příklad V-A charakteristiky článku s vyznačenými parametry [32]

Proud I_{450}

- Je základním parametrem udávající proud protékající FV článkem při napětí 0,45 V. Při znalosti tohoto proudu lze pak mnohem lépe určit bod maximální výkonu MPP.

Proud nakrátko (zkratový proud) - I_{sc}

- Proud nakrátko je proudem protékajícím článkem při napětí 0 V. Jedná se o maximální proud, který může solární článek při daném slunečním záření generovat. Velikost zkratového proudu se pohybuje v rozmezí od několika desítek mA až jednotek A. U FV panelů se pohybuje velikost v jednotkách A. Jeho velikost je ovlivněna intenzitou solárního záření, teplotou, či spektrální citlivostí a plochou FV článku.

Napětí naprázdno - U_{OC} (V_{OC})

- Napětí naprázdno je napětí, které můžeme naměřit na kontaktech FV článku bez připojené zátěže při dané teplotě a intenzitě záření. Proud je tedy nulový. U monokrystalických článků je toto napětí přibližně 0,6 V. V případě panelů se bavíme o jednotkách až desítkách V.

Pracovní bod - PB

- Pracovní bod je bodem na V-A charakteristice, ve kterém FV článek právě pracuje. Jeho poloha závisí na druhu spotřebiče a měla by být shodná s pozicí bodu maximálního výkonu MPP. Jestliže je PB totožný s bodem U_{OC} a I_{SC} , výkon dodávaný článkem je nulový. Tento bod je také výrazně ovlivňován teplotou. Díky vysoké intenzitě dopadajícího záření může teplota okolního vzduchu vzrůst až na 40 °C, což spolu v kombinaci s bezvětrím omezující přirozené chlazení, způsobuje zvýšení teploty povrchu článku až na 80 °C, čímž dojde ke změně elektrických vlastností, přesněji řečeno ke snížení svorkového napětí článku. Tento pokles napětí způsobuje zmenšení velikosti dodávaného výkonu do zátěže a tím ke zvětšení ztrát při výrobě až na 75 %. Pro kompenzaci takového jevu může být využito optimalizačního zařízení pracující na principu řízení ideálního odporu zátěže.

MPP - Maximum Power Point

- Jedná se o bod nacházející se v ohbí V-A charakteristiky, jenž představuje maximální výkon, který je článek schopen dodat. Články mají výkonové maximum někde mezi 1,5, až 3 W. Tento výkon vypočteme podle vzorce (5.1).

$$P_m = U_m \cdot I_m \quad [W] \quad (5.1)$$

Kde: P_m (P_{MPP})... je maximální výkon, který může článek dodávat (W)

I_m (I_{MPP})... je proud, při kterém FV článek dodává maximální výkon (A)

U_m (V_{MPP})... je napětí, při kterém FV článek dodává maximální výkon (V)

Fill factor (činitel naplnění) - FF

- Fill factor je poměrem mezi maximálním výkonem P_m a výkonem daným napětím naprázdno U_{OC} a proudem nakrátko I_{OC} . Jeho velikost závisí na morfologii materiálu, odporu aktivní polovodičové vrstvy a na kvalitě kontaktů. V ideálním případě je činitel naplnění roven jedné, reálně se však k této hodnotě pouze blíží. Čím vyšší je jeho hodnota, tím větší je výkon, který článek může dodat do zátěže. Je definován vztahem (5.2).

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad [-] \quad (5.2)$$

Kde: I_m ...je proud, při kterém FV článek dodává maximální výkon (A)

U_m ... je napětí, při kterém FV článek dodává maximální výkon (V)

U_{OC} ... je napětí naprázdno (V)

I_{SC} ...je proud nakrátko (A)

Účinnost fotovoltaického článku - η

- Účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii je dána vlastnostmi materiálu, ze kterého je článek vyroben. Vhodnou volbou materiálu ovlivňujeme spektrální citlivost na dopadající záření tzn., že tím určujeme, jaká vlnová délka bude v článku využívána s největší účinností. Účinnost je možnost spočítat dosazením do vztahu (5.3)

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{E \cdot A_c} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.3)$$

Kde: P_m ...je maximální výkon, který může článek dodávat (W)

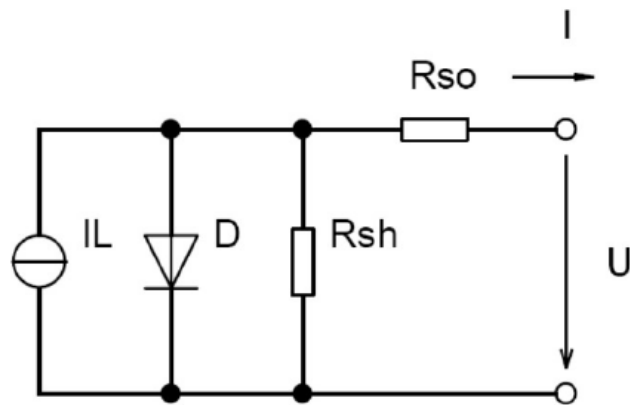
P_{rad} ... je výkon dopadajícího záření (W)

E ...je intenzita osvětlení (ozáření) při daných podmínkách neboli intenzita solárního záření I ($W \cdot m^{-2}$)

A_c ...je celková plocha FV článku (m^2)

Sériový R_{SO} a paralelní R_{SH} odpor

- Velikosti sériového a paralelního odporu určují kvalitu FV článku. Pokud je hodnota sériového odporu příliš vysoká, bude na něm vznikat úbytek napětí, což má za následek snížení svorkového napětí právě o tento úbytek. Jeho velikost je závislá na odporu substrátu, vrstev, přechodů a kontaktů. Nízká hodnota paralelního odporu naopak značí vadu článku, která se projevuje jako vnitřní zkrat. Tyto vady mohou být způsobeny svodovým proudem na okraji článku nebo defekty v krystalické mřížce. [32]



Obr. 5.7: Náhradní schéma fotovoltaického článku [32]

6 Praktické porovnání a zhodnocení vlastností vybraných fotovoltaických panelů

Pro praktické porovnání mi bylo vedoucím diplomové práce nabídnuto několik panelů. Z této nabídky jsem si vybral celkem 4 moduly. Prvním byl panel Q.SMART UF L 95 od firmy Q.Cells tvořený články CIGS. Dalším v pořadí byl panel CX 60 od firmy Calyxo, složený z článků CdTe. Panelem číslo tři byl flexibilní CIGS panel WSLE-0500-024-ST-06-B od firmy Ascent solar. Posledním byl panel s monokrystalickými články, který je součástí hybridního kolektoru PowerVolt 190/500, od firmy Solimpeks. Pro zjednodušení v orientaci, o jaký typ panelu se jedná, bude v následujících bodech první panel označován jako CIGS panel, druhý jako CdTe panel, třetí jako flexi CIGS panel a čtvrtý jako monokrystalický panel.

V tabulce č. 6.1 jsou uvedeny jednotlivé parametry modulů, jež byly stanoveny výrobcem na základě jejich měření při STC. Další informace o měřených panelech jsou k dispozici v katalogových listech v příloze B.

Tab. 6.1: Parametry jednotlivých FV panelů při STC udávaných výrobcem

		Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
Rozměry	[m]	1190x789,5x7,3	1200x600x6,9	1950x330x2	1601x828x90
P_{MPP}	[W]	95	60	50	190
V_{OC}	[V]	89	88,9	24,5	45,2
V_{MPP}	[V]	66,4	63,9	17,3	36,5
I_{SC}	[A]	1,68	1,15	3,4	5,6
I_{MPP}	[A]	1,43	0,96	2,9	5,2
η	[%]	10,1	8,3	7,8	14,3
FF	[%]	64	60	60	75

6.1 Měření fotovoltaických panelů

Veškerá měření jsem prováděl na střeše budovy Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni. K měření jsem používal analyzátor I-V400, který je možno vidět na obrázku č. 6.1.

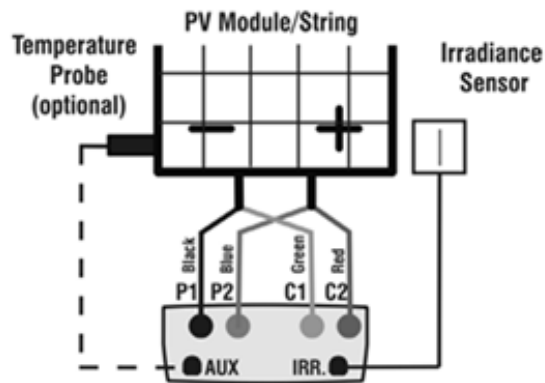


Obr. 6.1: Analyzátor I-V400

Tímto přístrojem je možné měřit nejenom jednotlivé moduly, ale také stringy (více panelů zapojených do série). Nesmí být však překročen proudový (0,1 A- 10 A) a napěťový rozsah (0,5- 1 000 V) analyzátoru, jinak by mohlo dojít k jeho zničení. Dále jím lze měřit proudové, napěťové a výkonové parametry panelů, tedy V-A charakteristiky, které lze zobrazit přímo na displeji analyzátoru ihned po měření a také jejich teplotu pomocí externího teplotního čidla, či velikost intenzity záření, pokud je připojen měřicí referenční článek.

Z naměřených hodnot je také analyzátor schopen dopočítat i další parametry jako je například činitel naplnění neboli Fill factor. Data lze pak z přístroje USB kabelem přenést do počítače, kde si můžeme změřené V-A charakteristiky pomocí dodaného softwaru zobrazit spolu s dalšími hodnotami. Tyto data lze následně vyexportovat do souboru pdf nebo xls, díky čemuž lze získaná data zobrazovat i na počítačích bez tohoto softwaru.

Analyzátor byl připojen k měřenému panelu podle schématu zapojení na obrázku č. 6.2. Jak je vidět, zapojení bylo realizováno pomocí 4 barevně odlišených testovacích kabelů, přičemž přes kabely zapojené na vstupy C1 a C2 se měřily hodnoty proudu, přes kabely zapojené na vstupy P1 a P2 se měřily napěťové hodnoty.



Obr. 6.2: Zapojení analyzátoru

Nejprve jsem vždy měřený panel spolu s referenčním článkem pro měření intenzity solárního záření umístil na pomocný přípravek (obr. č. 6.3 vlevo), a poté připojil analyzátor ke konektorům panelu (Obr. č. 6.3 vpravo). Následně jsem pak zahájil samotné měření. Vždy jsem se v jednom měřicím dnu snažil změřit jednotlivé panely při lepších a horších okolních podmínkách, aby bylo možné zjistit, jak velkým způsobem se jejich změna projeví na hodnotách měřených parametrů. Pro získání přesnějších hodnot jsem měření provedl dvakrát za sebou. Vybrané naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách č. 6.2, č. 6.3, č. 6.4 a tabulce č. 6.5, kde symbol I bez indexů neoznačuje velikost elektrického proudu, ale intenzitu solárního záření. Veškeré naměřené hodnoty jsou pak uloženy na přiloženém CD. Vyhodnocení výsledků měření a porovnání dalších vlastností panelů je uvedeno v kapitole 6.2.



Obr. 6.3: Fotografie CIGS panelu umístěného na pomocném přípravku (vlevo) s detailem připojení analyzátoru k panelu (vpravo)

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty ze dne 21. 10. 2015

Měření 21. 10. 2015		Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
Číslo měření		1	2	1	2	1	2	1	2
P_{MPP}	[W]	28,82	60,67	16,95	35,88	10,64	33,16	46,5	162,75
V_{OC}	[V]	80,11	86,41	86,29	90,53	21,17	24,8	39,33	42,16
V_{MPP}	[V]	57,88	60,31	64,96	67,96	15,72	19,01	32,15	33,73
I_{MPP}	[A]	0,5	1,01	0,26	0,53	0,68	1,74	1,45	4,83
I_{SC}	[A]	0,68	1,36	0,35	0,6	0,89	1,98	1,5	4,82
I	[W.m ⁻²]	323	587	257	624	203	537	233	787
t_v	[°C]	17,5	12,8	12,3	12,5	19,8	15,2	16,3	15,6
FF	[%]	53	52	57	66	57	67	79	80

Tab. 6.3: Naměřené hodnoty ze dne 7. 12. 2015

Měření 7. 12. 2015		Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
Číslo měření		1	2	1	2	1	2	1	2
P_{MPP}	[W]	38,46	47,75	29,88	36,65	28,19	28,02	110,07	113,32
V_{OC}	[V]	82,14	83,84	86,77	87,32	23,7	23,65	40,31	40,47
V_{MPP}	[V]	59,17	60,67	65,24	64,53	18,15	18,15	32,33	32,01
I_{MPP}	[A]	0,65	0,79	0,46	0,57	1,55	1,54	3,42	3,54
I_{SC}	[A]	0,87	1,08	0,57	0,69	1,8	1,81	3,64	3,73
I	[W.m ⁻²]	417	522	414	509	406	464	495	554
t_v	[°C]	14,7	15,3	15,7	15,5	15,5	15,4	18,6	18,8
FF	[%]	54	53	61	61	66	66	75	75

Tab. 6.4: Naměřené hodnoty ze dne 12. 4. 2016

Měření 12. 4. 2015		Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
Číslo měření		1	2	1	2	1	2	1	2
P_{MPP}	[W]	13,02	65,22	11,72	60,73	8,24	39,84	36,55	156,66
V_{OC}	[V]	69,47	79,01	76,62	86,9	20,4	22,75	39,1	40,83
V_{MPP}	[V]	49,88	53,52	53,74	62,1	15,44	16,37	32,51	32,94
I_{MPP}	[A]	0,26	1,22	0,22	0,98	0,53	2,43	1,12	4,76
I_{SC}	[A]	0,34	1,66	0,27	1,17	0,71	2,7	1,23	4,75
I	[W.m ⁻²]	164	801	195	817	183	714	170	783
t_v	[°C]	27,8	30,3	29,7	24,2	23,2	30,1	25,6	21
FF	[%]	55	50	56	60	57	65	76	81

Tab. 6.5: Naměřené hodnoty ze dne 29. 4. 2016

Měření 29. 4. 2015		Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
Číslo měření		1	2	1	2	1	2	1	2
P_{MPP}	[W]	64,58	64,66	55,97	55,75	42,89	43,31	142,98	143,15
V_{OC}	[V]	80,05	80,12	86,24	85,98	23,27	23,38	38,96	38,94
V_{MPP}	[V]	56,67	56,74	65,33	61,6	16,72	17,29	29,44	29,44
I_{MPP}	[A]	1,14	1,14	0,88	0,91	2,56	2,5	4,86	4,86
I_{SC}	[A]	1,59	1,58	1,08	1,08	3,08	3,07	5,34	5,34
I	[W.m ⁻²]	752	753	773	780	656	703	731	732
t_v	[°C]	23,1	23,2	19,3	18,4	25	24,8	17,4	17,4
FF	[%]	51	51	60	60	60	60	69	69

6.2 Zhodnocení výsledků měření a dalších vlastností panelů

Před samotným vyhodnocením naměřených dat bych rád provedl porovnání jednotlivých panelů z pohledu velikosti aktivní plochy, tedy plochy tvořené samotnými FV články, a jejich konstrukce.

Tab. 6.6: Velikosti celkové a aktivní plochy jednotlivých panelů a podíl aktivní plochy na celkové ploše

		Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
Plocha panelu [m ²]	Celková A_C	0,940	0,720	0,644	1,326
	Aktivní A_A	0,900	0,674	0,520	1,125
Podíl A_A na A_C [%]		95,83	93,59	80,76	84,87

Celková plocha A_C není u žádného z panelů tvořena pouze FV články (aktivní plochou A_A), to znamená, že pouze určitá část panelu přeměňuje energii dopadajících kvant záření na elektrickou energii. Zbývající plocha dopadající záření nevyužije a přemění jej na teplo. Tím však dojde k negativnímu ovlivnění funkčních vlastností. Vlivu teploty se budu dále věnovat při vyhodnocování naměřených dat. Jak je možné vidět na hodnotách uvedených v tabulce č. 6.6, největší podíl na celkové ploše mají články u panelů CIGS a CdTe. U prvně zmíněného zabírají články téměř 96% A_C a u druhého bezmála 94% A_C . Důvodů proč tomu tak je, je hned několik. Jde především o technologii výroby, která umožňuje řadit články těsně vedle sebe a tím efektivně využívat danou plochu panelu. Dále tyto panely nejsou uloženy v žádném nosném rámu, na každé straně je vždy pouze pruh určité šíře, do kterého již články nezasahují, sloužící jako styčná plocha pro montážní svorky. Absence nosného rámu však přináší jistá úskalí v podobě menší mechanické pevnosti a odolnosti konstrukce panelu. I když jsou tyto dva panely z obou stran kryty tvrzeným sklem, může se při neopatrném zacházení či

špatném upevnění stát, že dojde snáze k jejich mechanickému poškození nebo dokonce zničení.

U flexibilního panelu CIGS články představují pouze okolo 81 % celkové plochy, což je zapříčiněno umístěním instalační krabice s výstupními kontakty na přední straně panelu. Pokud by byla osazena na zadní straně jako u většiny panelů, mohl by být podíl A_A na A_C vyšší. Díky své flexibilitě je tento panel poměrně dobře odolný vůči mechanickým deformacím a lze jej do určité míry tvarově přizpůsobit nosné konstrukci. Necelých 85% celkové plochy monokrystalického panelu tvoří články. Zbylých 15 % je reprezentováno nosným rámem, který však zlepšuje mechanickou pevnost a do jisté míry i odolnost panelu, a mezerami mezi jednotlivými články, které by bylo možné zmenšit vhodnějším tvarem článku, čímž by došlo ke zvětšení aktivní plochy. Tento krok by však vyžadoval změny ve výrobním procesu.

A nyní se již dostávám k samotnému vyhodnocení naměřených dat, které jsou uvedeny v tabulkách č. 6.2 až 6.5 výše. Jedinými parametry, které jsem nezískal měřením pomocí analyzátoru, jsou účinnost a teploty jednotlivých panelů. Bylo tedy nutné obě veličiny dopočítat. Účinnost jsem navíc vypočítal pro dva případy, a to pro případ uvažování jak celkové, tak aktivní plochy, abych mohl ukázat, jak se různá velikost aktivní plochy projevuje na účinnosti panelů. Účinnost jsem vypočítal podle vztahu č. 5.3. Teplotu FV panelu t_{FV} je možno spočítat vztahem č. 6.1, Je však nutné brát v úvahu, že takto vypočtená hodnota je pouze jakýmsi odhadem, jelikož zde nejsou započteny okolní vlivy, jako je rychlost a směr proudění větru či vlhkost vzduchu.

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{I \cdot A} \cdot 100 = \frac{28,82}{323 \cdot 0,94} \cdot 100 = 9,50 \quad [\%]$$

$$t_{FV} = t_v + \left(\frac{NOTC - 20}{800} \right) \cdot I = 17,5 \cdot \left(\frac{50 - 20}{800} \right) \cdot 323 = 30 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.1)$$

Kde: t_v ...je teplota okolí při měření [$^{\circ}\text{C}$]

NOTC...je nominální pracovní teplota panelu při intenzitě záření $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, teplotě okolí $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a rychlosti větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ uvedená v katalogovém listu příslušného FV panelu [$^{\circ}\text{C}$]

I ...je intenzita slunečního záření při daných [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

Hodnoty NOTC pro každý panel jsou uvedeny v příslušných katalogových listech FV panelů v příloze A.

Tab. 6.7: Vypočtené teploty FV panelů a účinnosti FV panelů při uvažování celkové nebo aktivní plochy, s dosazením hodnot naměřených 21. 10. 2015

Měření 21. 10. 2015		Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
Číslo měření		1	2	1	2	1	2	1	2
η pro A_C	[%]	9,50	11,00	9,16	7,99	8,15	9,60	15,05	15,60
η pro A_A	[%]	9,91	11,48	9,79	8,53	10,09	11,88	17,74	18,38
t_{FV}	[°C]	30,0	35,5	21,9	35,9	27,4	35,3	23,6	40,2

Tab. 6.8: Vypočtené teploty FV panelů a účinnosti FV panelů při uvažování celkové nebo aktivní plochy, s dosazením hodnot naměřených 7. 12. 2015

Měření 7. 12. 2015		Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
Číslo měření		1	2	1	2	1	2	1	2
η pro A_C	[%]	9,82	9,74	10,02	10,00	9,38	10,79	16,77	15,43
η pro A_A	[%]	10,24	10,16	10,71	10,69	11,62	13,36	19,77	18,18
t_{FV}	[°C]	30,9	35,5	31,2	34,6	32,8	30,7	34,1	36,1

Tab. 6.9 Vypočtené teploty FV panelů a účinnosti FV panelů při uvažování celkové nebo aktivní plochy, s dosazením hodnot naměřených 12. 4. 2016

Měření 12. 4. 2016		Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
Číslo měření		1	2	1	2	1	2	1	2
η pro A_C	[%]	8,45	8,67	8,35	10,32	7,00	8,67	16,22	15,09
η pro A_A	[%]	8,82	9,04	8,92	11,03	8,66	10,74	19,11	17,78
t_{FV}	[°C]	34,2	61,3	37,0	54,8	30,1	56,9	30,9	45,5

Tab. 6.10: Vypočtené teploty FV panelů a účinnosti FV panelů při uvažování celkové nebo aktivní plochy, s dosazením hodnot naměřených 29. 4. 2016

Měření 29. 4. 2016		Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
Číslo měření		1	2	1	2	1	2	1	2
η pro A_C	[%]	9,14	9,14	10,06	9,93	10,16	9,57	14,75	14,75
η pro A_A	[%]	9,54	9,54	10,74	10,61	12,58	11,85	17,39	17,38
t_{FV}	[°C]	52,2	52,4	48,3	47,7	49,6	51,2	40,2	40,3

Jak se dalo předpokládat, pokud by byla celková plocha panelu rovna aktivní ploše, tedy pouze ploše článků, fotovoltaické panely by dosahovali vyšších hodnot účinností. U flexibilního panelu CIGS by se jednalo v průměru až o 2 % nárůst účinnosti a v případě monokrystalického panelu až o 3 % zvýšení účinnosti za podmínek, které byly při jednotlivých měřeních. Při optimálních klimatických podmínkách by mohl být nárůst ještě markantnější, zejména pak u monokrystalického panelu. U panelů CIGS a CdTe, by k tak výraznému nárůstu nedošlo, protože podíl jejich aktivní plochy na celkové ploše by se již příliš nezvýšil.

Významný vliv na fotovoltaický článek a jeho parametry má velikost intenzity solárního záření. S rostoucí intenzitou by měla růst přímo úměrně velikost proudu nakrátko, což se při měření také potvrdilo, jelikož velikost proudu se zvyšuje s rostoucím počtem nábojů uvolněných díky dopadajícím světelným kvantům. Při pohledu do tabulek č. 6.2 až 6.9 je také vidět, že při každém zvýšení intenzity došlo k nárůstu výkonu u všech panelů, avšak současně došlo u CIGS panelu při měření 29. 10. 2015, u panelu CdTe při měření 21. 10. 2015 a 12. 4. 2016, u flexi CIGS panelu při měření 21. 10. 2015, 7. 12. 2015 a 12. 4. 2015 a u monokrystalického panelu při měření 7. 12. 2015 a 12. 4. 2016 k poklesu účinnosti o přibližně 1 %. K významnějšímu poklesu účinnosti těchto panelů mohlo dojít vlivem vyšší teploty panelu způsobené právě zvýšenou intenzitou. Jelikož teploty panelů v jednotlivých měřeních jsem přímo neměřil, ale dopočítával, rozhodl jsem se proto provést kontrolní měření, při kterém jsem měřil přímo teploty panelů a zároveň jsem si poznamenal, při jaké intenzitě bylo těchto teplot dosaženo, tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 6.11. Z hodnot kontrolního měření vyplývá, že s rostoucí intenzitou opravdu může stoupat teplota panelu, což může ve výsledku znamenat výše zmíněné snížení účinnosti. Výsledná teplota panelu je však ovlivněna i dalšími faktory, jak již bylo zmíněno výše.

Tab. 6.11: Hodnoty z kontrolního měření pro ověření závislosti teploty FV panelu na intenzitě záření

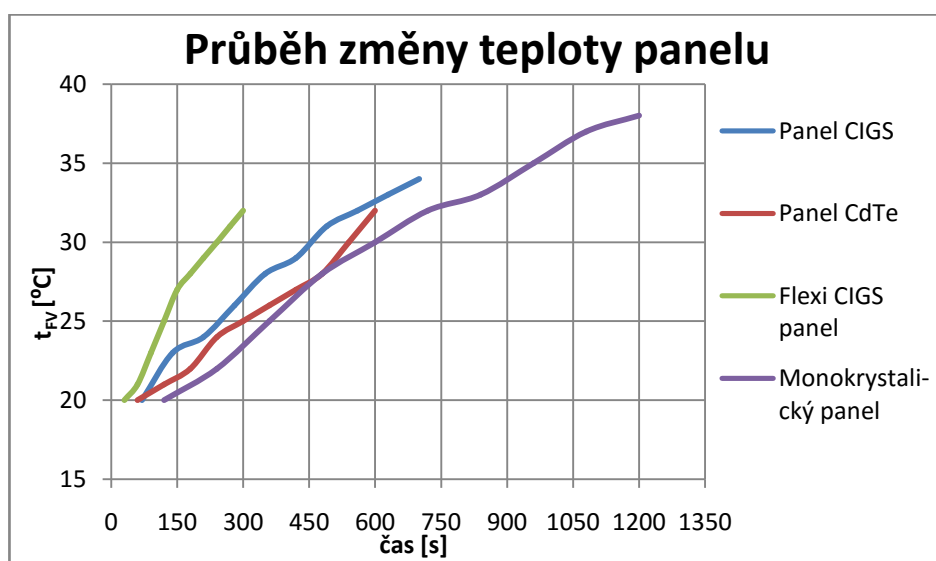
Kontrolní měření č. 1 3. 5. 2016		Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
t_{FV} na začátku měření	[°C]	21	21	21	21
t_{FV} při cca $I=115 \text{ W.m}^{-2}$	[°C]	23	22	24	26
t_{FV} při cca $I=550 \text{ W.m}^{-2}$	[°C]	32	32	31	33
t_{FV} při cca $I=770 \text{ W.m}^{-2}$	[°C]	34	33	35	35

Teplota FV panelu se však nemění skokově, ale s určitou setrvačností, to znamená že, při zvýšení nebo snížení intenzity solárního záření nedojde k jejímu okamžitému nárůstu nebo poklesu. Abych mohl určit, který panel má největší tepelnou setrvačnost, bylo nutné provést další měření. Nejprve jsem si změřil teploty panelů, když byly umístěny ve stínu (při intenzitě 30 W.m^{-2}), čímž jsem si zajistil stejnou počáteční teplotu všech panelů. Následně jsem každý modul vystavil intenzitě přibližně 790 W.m^{-2} a měřil dobu, za kterou dojde ke změně jejich teploty o $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejrychleji se z $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ohřál flexibilní CIGS panel a to za 30 s, panel CdTe se ohřál za 60 s, panel CIGS za 70 s a monokrystalický panel až za 120s. Největší tepelnou setrvačnost má tedy monokrystalický panel. Z těchto hodnot však není zjevný průběh změny. Proto jsem následně provedl 2. kontrolní měření, kdy jsem opět vystavil

jednotlivé panely intenzitě přibližně 790 W.m^{-2} a odečetl jsem jejich teplotu v příslušný časový interval. Pro každý panel jsem takto odečetl 10 hodnot. Výsledky tohoto měření jsou v tabulce č 6.12. Velikosti teplot byly významným způsobem ovlivněny silným prouděním vzduchu.

Tab. 6.12: Teploty FV panelů odečtených v příslušných časových intervalech při intenzitě 790 W.m^{-2}

Kontrolní měření č. 2 3. 5. 2016		Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
Časový interval odečtu	[s]	70	60	30	120
1. odečet t_{FV}	[°C]	20	20	20	20
2. odečet t_{FV}	[°C]	23	21	21	22
3. odečet t_{FV}	[°C]	24	22	23	25
4. odečet t_{FV}	[°C]	26	24	25	28
5. odečet t_{FV}	[°C]	28	25	27	30
6. odečet t_{FV}	[°C]	29	26	28	32
7. odečet t_{FV}	[°C]	31	27	29	33
8. odečet t_{FV}	[°C]	32	28	30	35
9. odečet t_{FV}	[°C]	33	30	31	37
10. odečet t_{FV}	[°C]	34	32	32	38



Obr. 6.4: Průběhy změny teploty jednotlivých FV panelů

Dalším zjištěním z měření 21. 10. 2015 a 12. 4. 2016 byl nárůst napětí naprázdno V_{OC} při výrazném zvýšení intenzity záření zejména u panelů CIGS a CdTe. Napětí by však mělo růst jen mírně. První příčinou tohoto jevu by mohl být samotný analyzátor, který při nižší intenzitě vlivem vyššího vnitřního odporu příliš zatíží měřený panel a tím způsobí pokles měřeného napětí naprázdno. Z tohoto důvodu jsem provedl 3. kontrolní měření, tentokrát jsem však pro měření použil digitální voltmetr, abych vyloučil chybu analyzátoru. Kontrolní měření však potvrdilo výsledky získané při měřeních.

Tab. 6.13: Hodnoty z 2. kontrolního měření pro ověření vlivu intenzity na napětí naprázdno

Kontrolní měření č. 3 3. 5. 2016	Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
V_{OC} při cca $I=115 \text{ W.m}^{-2}$ [V]	72,9	80,7	20,9	39,2
V_{OC} při cca $I=550 \text{ W.m}^{-2}$ [V]	78,3	85,4	22,4	42,1
V_{OC} při cca $I=770 \text{ W.m}^{-2}$ [V]	82,2	87,2	23,5	43,6

7 Návrh fotovoltaického systému

Z naměřených hodnot při jednotlivých měření by bylo jen velmi obtížné určit, kolik daný typ panelu dokáže vyprodukovat elektrické energie za měsíc nebo rok, a proto jsem se rozhodl pro každý z měřených panelů vytvořit návrh fotovoltaického systému pro modelový objekt, na jehož konci budou známi množství energie, které by mohly FV systémy tvořené jednotlivé typy panelů dodat za období jednoho roku v dané lokalitě objektu. Jelikož je návrh FV systému analogický pro všechny typy panelů, není zde uveden postup pro každý zvlášť, ale je zde uveden pouze jeden společný.

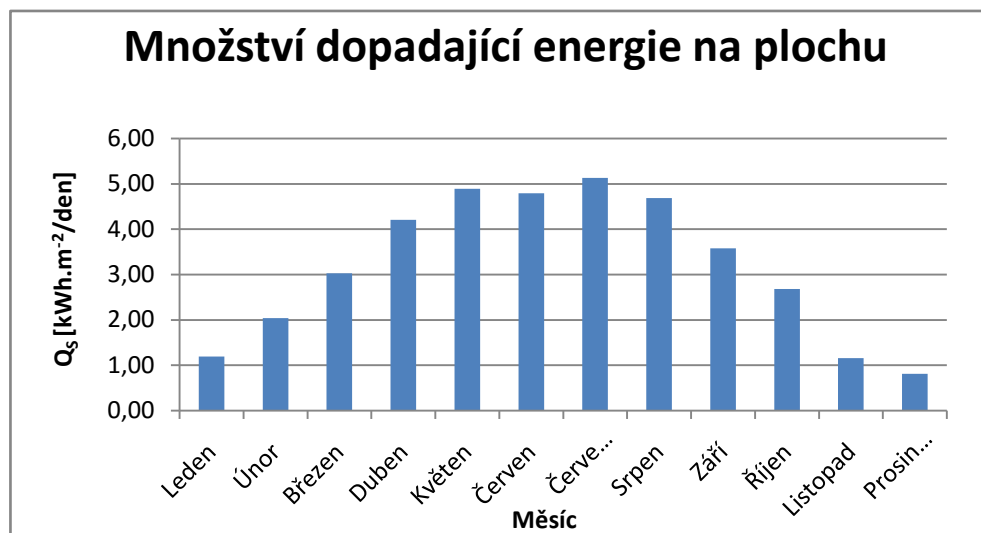
7.1 Popis modelového objektu a místních podmínek

Pro návrh fotovoltaických systémů jsem si vybral virtuální modelový objekt v podobě rodinného domu nacházejícího se v Plzni na Borských polích blízko přehrady České údolí v nadmořské výšce 353 m. n. m. Souřadnice této lokace jsou 49°43'26" N, 13°20'58" E. Panely by byly umístěny na části střechy orientované na jih s azimutem 0° a sklonem 35°. Využitelná plocha pro instalaci fotovoltaických panelů činí 30 m². Aby bylo možné návrhy spočítat, je nutné znát několik základních parametrů, mezi něž patří teplota okolí, intenzita solárního záření a v neposlední řadě také množství dopadající energie na plochu za určité období, v mém případě se jedná o hodnoty za průměrný den v měsíci. Tato data jsem získal z programu PVGIS, který je volně dostupný na webových stránkách. Odkaz je uveden v seznamu literatury a informačních zdrojů [33]. Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 7.1.

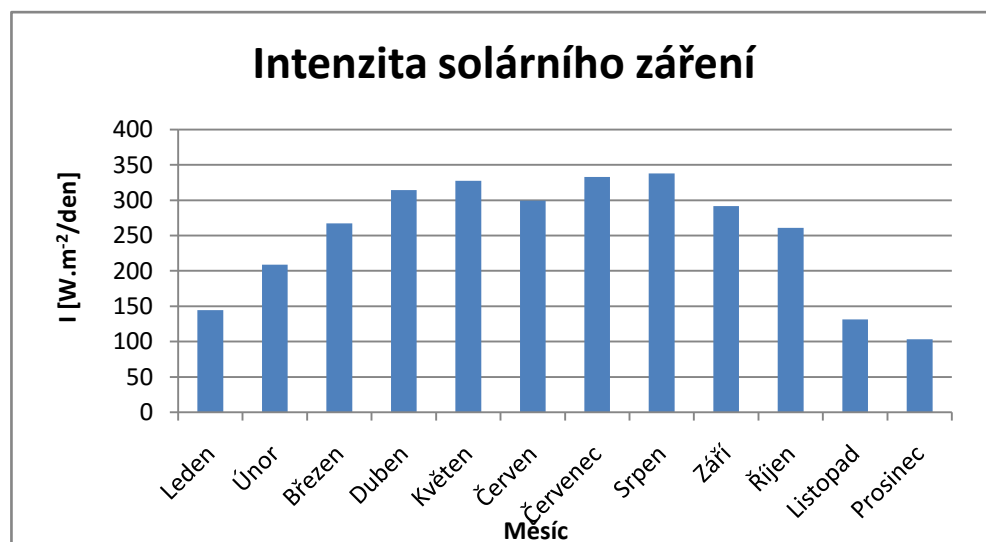
Tab. 7.1: Hodnoty získané z programu PVGIS

Měsíc	t_v [°C]	Q_s [kWh.m ⁻²]	I [W.m ⁻²]
Leden	-0,1	1,19	144,5
Únor	0	2,04	209
Březen	3,8	3,03	267,4
Duben	9,2	4,21	314,3
Květen	13,9	4,89	327,6
Červen	17,2	4,79	299,6
Červenec	18,8	5,13	332,9
Srpen	18,4	4,69	338,1
Září	13,7	3,58	291,7
Říjen	8,9	2,68	261,1
Listopad	0,9	1,16	131,5
Prosinec	0	0,81	103,4

V grafu na obrázku č. 7.1 je vyjádřeno množství dopadající energie Q_s (viz. Tabulka č. 7.1) na plochu se sklonem 35° orientovanou na jih 0° za průměrný den v měsíci. Je vidět, že nejvíce energie dopadá v letních měsících, nejvíce pak v červenci vlivem delší doby svitu Slunce. V grafu na obrázku č. 7.2 je pak zobrazena velikost intenzity solárního záření I (viz. Tabulka č. 7.1) během průměrného dne v měsíci.



Obr. 7.1: Graf množství energie dopadající na plochu během dne v měsíci



Obr. 7.2: Graf velikosti intenzity solárního záření během průměrného dne v měsíci

7.2 Výpočet účinnosti fotovoltaických panelů

Ze zhodnocení vlastností jednotlivých panelů v předchozí kapitole vyplývá, že účinnost fotovoltaických panelů je přímo závislá na intenzitě solárního záření a provozní teplotě samotného panelu, která je ovlivňována teplotou okolí a též intenzitou záření. S klesající provozní teplotou se zvyšuje účinnost. Přibližnou velikost této teploty lze určit pomocí vztahu č. 6.1.

$$t_{FV} = t_v + \left(\frac{NOTC - 20}{800} \right) \cdot I = -0,1 \cdot \left(\frac{50 - 20}{800} \right) \cdot 144,5 = 5,5 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Tab. 7.2: Vypočítaná průměrná provozní teplota FV panelů během dne v daném měsíci

	Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
Měsíc	$t_{FV} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{FV} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{FV} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{FV} [^{\circ}\text{C}]$
Leden	5,5	5,3	5,3	4,4
Únor	8,1	7,8	7,8	6,5
Březen	14,2	13,8	13,8	12,2
Duben	21,4	21,0	21,0	19,0
Květen	26,6	26,2	26,2	24,1
Červen	28,8	28,4	28,4	26,6
Červenec	31,7	31,3	31,3	29,2
Srpen	31,5	31,1	31,1	29,0
Září	25,0	24,6	24,6	22,8
Říjen	19,0	18,7	18,7	17,1
Listopad	6,0	5,8	5,8	5,0
Prosinec	4,0	3,9	3,9	3,2

Při znalosti provozní teploty t_{FV} panelů je již možné spočítat jejich účinnosti podle vztahu č. 7.1:

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_{STC} \cdot \left(1 - \gamma \cdot (t_{FV} - t_{STC}) + \lambda \cdot \log \frac{I}{I_{STC}} \right) = \\ &= 0,0101 \cdot \left(1 - 0,0038 \cdot (5,5 - 25) + 0,12 \cdot \log \frac{114,5}{1000} \right) = 0,098 \quad [-] \end{aligned} \quad (7.1)$$

Kde: η_{STC} ... je účinnost panelu při standardních podmínkách [-]

γ ... je koeficient udávající změnu výkonu v závislosti na teplotě

t_{STC} ... je teplota při standardních podmínkách $t_{STC} = 25 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$

I_{STC} ... je intenzita slunečního záření při standardních podmínkách $I_{STC} = 1000 \text{ } [\text{W}/\text{m}^2]$

λ je součinitel, který zohledňuje hladinu intenzity dopadajícího slunečního záření, 0,12 [-]

Hodnoty koeficientu γ a účinnosti za STC pro jednotlivé panely jsou uvedeny v katalogových listech v příloze B.

Tab. 7.3: Vypočtené účinnosti FV panelů v jednotlivých měsících

	Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
Měsíc	η [-]	η [-]	η [-]	η [-]
Leden	0,098	0,079	0,078	0,141
Únor	0,099	0,080	0,078	0,142
Březen	0,098	0,080	0,077	0,141
Duben	0,096	0,079	0,075	0,138
Květen	0,095	0,078	0,073	0,135
Červen	0,093	0,077	0,072	0,133
Červenec	0,093	0,077	0,071	0,132
Srpen	0,093	0,077	0,071	0,133
Září	0,095	0,078	0,073	0,135
Říjen	0,096	0,079	0,075	0,138
Listopad	0,098	0,078	0,077	0,140
Prosinec	0,097	0,078	0,077	0,139

Při porovnání reálných účinností jednotlivých FV panelů v měsíci říjnu, prosinci a dubnu vypočtených na základě naměřených hodnot uvedených v tabulkách č. 6.7 až 6.9 a na základě přepočtu účinnosti za STC v tabulce č. 7.3 zde v návrhu je vidět rozdíl v jejich velikosti.

Rozdíl oproti účinnosti vypočítané z reálných hodnot je z největší pravděpodobností způsoben daným vzorcem č. 7.1, který je pouhou matematickou aproximací. Dalším důvodem by mohl být fakt, že výrobce udává ve svých katalogových listech nejnížší garantovanou účinnost, kterou musí panel vykazovat za daných podmínek, a je tedy možné, že ve skutečnosti může mít panel účinnost vyšší.

7.3 Výpočet počtu panelů a energetická bilance jednotlivých fotovoltaických systémů

Díky rozdílným velikostem plochy jednotlivých panelů se dílčí FV systémy skládají s různého počtu panelů. Jejich počet dostaneme jednoduše podílem plochy celého FV systému A a plochy příslušného panelu A_C (viz. Tabulka č. 6.6).

$$\text{počet panelů} = \frac{A}{A_C} = \frac{30}{0,94} = 32 \quad [\text{panelů}] \quad (7.2)$$

Tab. 7.4: Počet panelů FV systému

	Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
Počet panelů FV systému	32	42	47	23

Při pohledu do tabulky č. 7.4 je možné vidět, že z největšího počtu panelů se skládá FV systém tvořený flexibilními panely CIGS, naopak nejmenší počet panelů potřebný pro vytvoření FV systému o ploše 30 m^2 je u FV systému tvořeného monokrystalickými panely.

A nyní se již dostáváme k výpočtům, na jejichž konci bude známo, kolik který FV systém vyrobí elektrické energie, během jednoho dne, měsíce i celého roku. Jestliže je známa účinnost FV panelu a množství dopadající energie Q_s , není nijak problematické spočítat celkovou energii vyrobenou plochou 1 m^2 FV panelu za den $Q_{\check{L}d}$.

$$Q_{\check{L}d} = \eta \cdot Q_s = 0,098 \cdot 1,19 = 0,12 \quad [\text{kWh.m}^{-2}] \quad (7.3)$$

Kde: Q_s ... je množství dopadající energie na plochu za průměrný den v měsíci $[\text{kWh.m}^{-2}]$
 η ... je účinnost FV panelu [-]

Tab. 7.5: Vypočítaná celková energie vyrobená plochou 1 m² FV panelu za den

	Panel CIGS	Panel CdTe	Panel flexi CIGS	Panel monokrystal
Měsíc	$Q_{\check{C}Ld}$ [kWh.m ⁻²]	$Q_{\check{C}Ld}$ [kWh.m ⁻²]	$Q_{\check{C}Ld}$ [kWh.m ⁻²]	$Q_{\check{C}Ld}$ [kWh.m ⁻²]
Leden	0,12	0,09	0,09	0,17
Únor	0,20	0,16	0,16	0,29
Březen	0,30	0,24	0,23	0,43
Duben	0,41	0,33	0,32	0,58
Květen	0,46	0,38	0,36	0,66
Červen	0,45	0,37	0,34	0,64
Červenec	0,48	0,39	0,36	0,68
Srpen	0,44	0,36	0,33	0,62
Září	0,34	0,28	0,26	0,48
Říjen	0,26	0,21	0,20	0,37
Listopad	0,11	0,09	0,09	0,16
Prosinec	0,08	0,06	0,06	0,11

Pro výpočet celkové energie vyrobené FV systémem za jeden den Q_{Zd} je nutné znát celkovou plochu všech panelů, která je v tomto případě rovna ploše části střechy orientované na jih, tedy 30 m². Vynásobením celkové energie vyrobené FV systémem za jeden den počtem dní v měsíci získáme celkové množství vyrobené energie FV systémem za měsíc Q_{Zm} . Vypočtené hodnoty Q_{Zd} a Q_{Zm} jsou uvedeny v tabulce č. 7.5.

$$Q_{Zd} = A \cdot Q_{\check{C}Ld} = 30 \cdot 0,12 = 3,6 \quad [\text{kWh}] \quad (7.4)$$

$$Q_{Zm} = n \cdot Q_{Zd} = 30 \cdot 3,6 = 108 \quad [\text{kWh}] \quad (7.5)$$

Kde: $Q_{\check{C}Ld}$... je celková energie vyrobená plochou 1 m² FV panelu za den [kWh.m⁻²]

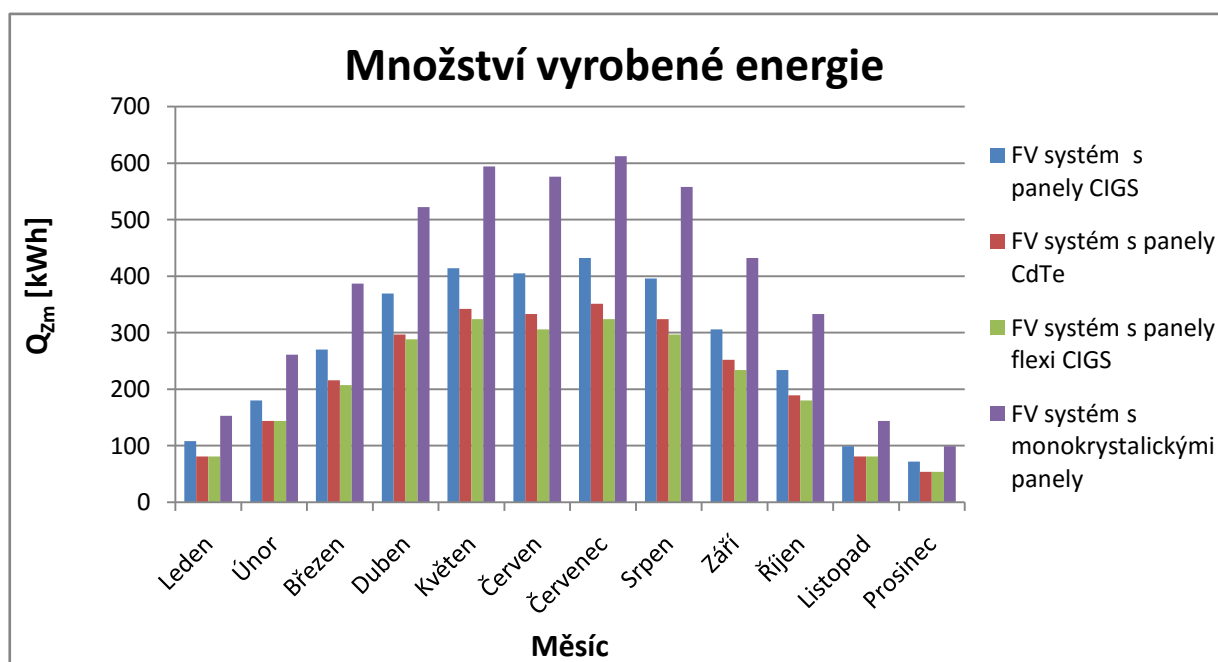
A...Plocha všech fotovoltaických panelů [m²]

n... počet dnů v měsíci [-]

Tab. 7.6: Vypočítaná celková vyrobená energie celým systémem za den a měsíc

Měsíc	Panel CIGS		Panel CdTe		Panel flexi CIGS		Panel monokrystal	
	Q _{Zd}	Q _{Zm}	Q _{Zd}	Q _{Zm}	Q _{Zd}	Q _{Zm}	Q _{Zd}	Q _{Zm}
	[kWh]		[kWh]		[kWh]		[kWh]	
Leden	3,6	108	2,7	81	2,7	81	5,1	153
Únor	6,0	180	4,8	144	4,8	144	8,7	261
Březen	9,0	270	7,2	216	6,9	207	12,9	387
Duben	12,3	369	9,9	297	9,6	288	17,4	522
Květen	13,8	414	11,4	342	10,8	324	19,8	594
Červen	13,5	405	11,1	333	10,2	306	19,2	576
Červenec	14,4	432	11,7	351	10,8	324	20,4	612
Srpen	13,2	396	10,8	324	9,9	297	18,6	558
Září	10,2	306	8,4	252	7,8	234	14,4	432
Říjen	7,8	234	6,3	189	6,0	180	11,1	333
Listopad	3,3	99	2,7	81	2,7	81	4,8	144
Prosinec	2,4	72	1,8	54	1,8	54	3,3	99

V Grafu na obrázku č. 7.3 je provedeno srovnání dílčích FV systémů z pohledu množství vyrobené energie během jednotlivých měsíců.



Obr. 7.3: Graf množství vyrobené energie jednotlivými FV systémy

Při pohledu na graf na obrázku č. 7.3 je patrné, že nejvíce elektrické energie vyrobí FV systém skládající se z monokrystalických panelů, který za rok vyrobí 4 671 kWh, druhým nejlepším je FV systém složený z CIGS panelů, který vyrobí 3 285 kWh za rok, na třetím místě figuruje FV systém tvořený panely CdTe, který vyprodukuje 2 664 kWh za rok, a na

posledním místě je FV systém složený z flexi CIGS panelů, jež vyrobí 2 520 kWh za rok. Nejlepší volbou z pohledu množství vyrobené elektrické energie by tedy byl FV systém složený z monokrystalických panelů. Pokud bychom však byli významně limitováni nosností střešní konstrukce, byl by vhodnou volbou FV systém složený flexi CIGS panelů. Váha tohoto jednoho flexibilního panelu je pouze 1,3 kg. Váhy ostatních 3 panelů převyšují hmotnost 10 kg, tudíž pro střešní konstrukci představují nezanedbatelně větší zátěž.

Závěr

Na začátku teoretické části této diplomové práce jsou zmíněny základní informace o zdroji solárního záření, tedy o Slunci. Následně jsou zde popsány vlastnosti samotného solárního záření, jež hrají významnou roli v možnosti jeho energetického využívání. Jedná se zejména o spektrum a intenzitu solárního záření. Technické možnosti využití solárního záření jsou podrobněji vysvětleny v kapitole č. 3. A jednou z možností, jak jej využít, je právě jeho přeměna na elektrickou energii pomocí fotovoltaických článků. Princip funkce samotného fotovoltaického článku, jak už jeho název napovídá, je založen na tzv. fotovoltaickém jevu. Stěžejním oddílem teoretické části je ale kapitola č. 5 zabývající se jednotlivými typy fotovoltaických článků. Články jsou zde rozděleny do tří skupin tzv. generací. U každé z nich jsou uvedeny a popsány její charakteristické vlastnosti spolu s konkrétními příklady jejich zástupců. Na konci této kapitoly jsou pak ještě shrnuty základní parametry fotovoltaických článků a panelů.

Hlavním úkolem této diplomové práce však bylo prakticky porovnat a zhodnotit vlastnosti 4 vybraných fotovoltaických panelů. Testovanými panely byly CIGS panel, CdTe panel, flexibilní CIGS panel a monokrystalický panel. Jednotlivé parametry panelů byly měřeny pomocí analyzátoru SOLAR I-V 400. Nejprve byly panely porovnány z pohledu účinnosti, která byla vypočítána pro celkovou a aktivní plochu panelu. Z tohoto porovnání vyplynulo, že nejmenší rozdíl mezi těmito účinnostmi je u panelu CIGS, a naopak největší rozdíl byl zjištěn u flexibilního CIGS panelu. Následně zde byly vyhodnoceny výsledky měření. Ze zhodnocení podle předpokladů vyplynulo, že nejvíce ovlivňuje parametry panelů intenzita solárního záření. V závěru této práce byl zpracován návrh fotovoltaického systému pro každý ze 4 panelů. Jejich porovnáním bylo zjištěno, že největší množství elektrické energie za rok dokáže vyrobit fotovoltaický systém tvořený monokrystalickými panely. Nejméně elektrické energie za rok pak dokáže vyrobit systém s flexibilními CIGS panely.

Seznam literatury a informačních zdrojů

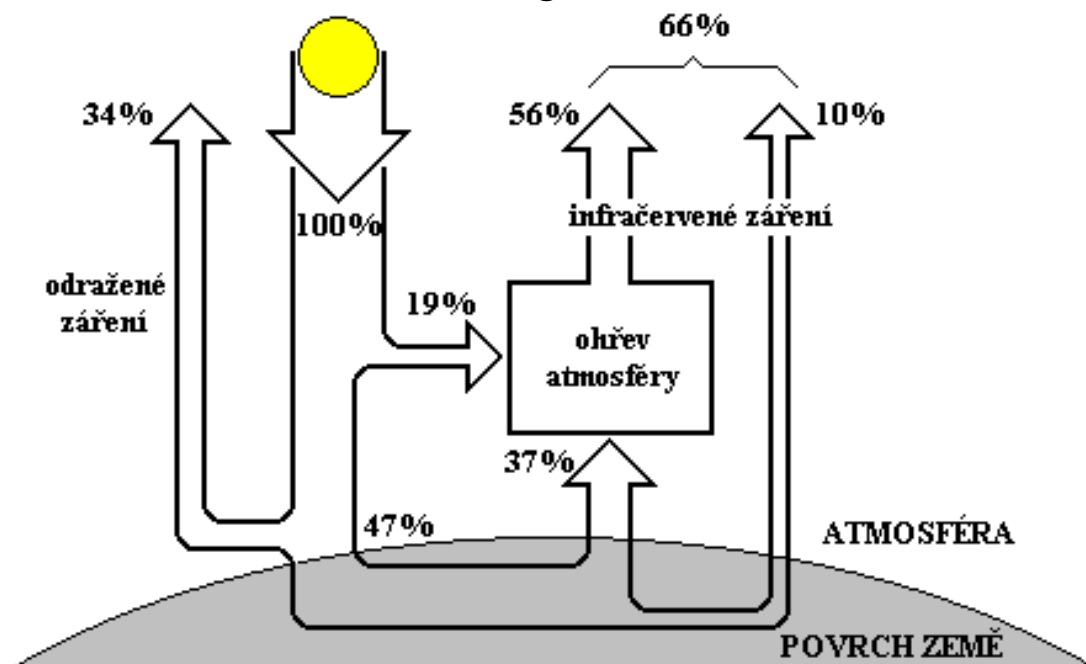
- [1] BROŽ, Karel a Bořivoj ŠOUREK. *Alternativní zdroje energie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, 213 s. ISBN 80-010-2802-X.
- [2] KAMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír KRTEK. *Obnovitelné zdroje energie*. Vyd.1. Ostrava: Ediční středisko VŠB- TU Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-445-8.
- [3] HENZE, Anderas a Werner HILLEBRAND. *Elektrický proud ze slunce: Fotovoltaika v praxi*. 1. České vydání. Ostrava- Plesná: HEL, 2000. ISBN 80-86167-12-7.
- [4] CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika*. Praha: T. Malina, 2005. ISBN: 80-900759-5-9
- [5] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: Budovy jako zdroj proudu*. 1. České vydání. Ostrava- Plesná: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [6] KLECZEK, Josip. *Sluneční energie: Úvod do helioenergetiky*. Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-509-81.
- [7] BĚLÍK, Milan. *Přednášky z předmětu KEE/SOES* [online]. [cit. 2016-05-08]. FEL ZČU Plzeň. Dostupné z: <http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/SOES/>
- [8] *Aldebaran. Základní data a charakteristiky o Slunci* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/sunsystem/slunce.html>
- [9] *Do nitra hmoty. Termonukleární reakce a hvězdy* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.spssvsetin.cz/index_htm_files/dumy/06/termonuklear.htm
- [10] *Multimediální encyklopedie fyziky* [online].. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [11] *Časopis Světlo* [online]. [cit. 2016-05-08]. 2000, **16**(4). Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/fyzikalni-podstata-svetla--16967>
- [12] Skupina ČEZ. *Solární energie* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obsah.htm>
- [13] ŠKORPÍK, Jiří. Sluneční záření jako zdroj energie, *Transformační technologie*, 2006-09, [last updated 2015-02]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/slunecni-zareni-jako-zdroj-energie.html>.
- [14] VRTEK, Mojmír. *Solární energie* [online]. [cit. 2016-05-08]. Ostrava, Dostupné z: https://kke.zcu.cz/old_web/_files/projekty/enazp/21/IUT/140_Slunecni_energie_-_Vrtek_-_P3.pdf
- [15] *ConVERTER* . Solární konstanta [online]. [cit. 2016-05-08]. 2002. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/solarni-konstanta.htm>

- [16] *Sluneční dům* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
<http://www.nazeleno.cz/stavba/slunecni-dum-temer-100-spotreby-pokryje-solarni-energie.aspx>
- [17] Trombeho stěna [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
<http://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba/okna-dvere-vyplne/1967-trombeho-stena-jednoduche-vytapeni-staveb>
- [18] *TZB INFO. Pasivní solární energie* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
<http://www.tzb-info.cz/1705-pasivni-solarni-energie-nove-trendy>
- [19] Schéma rovinného kolektoru [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
<http://docplayer.cz/6540-Obnovitelne-zdroje-energie.html>
- [20] *Skupina ČEZ: Miniencyklopedie solární energie* [online]. [cit. 2016-05-08]. 2013. ISBN 978-80-87851-16-6. Dostupné z:
https://www.cez.cz/edee/content/miniencyklopedie/7_miniencyklopedie_solarni_energie/cs/index.html#e03db9b50
- [21] *Solární-energie.info. Fotovoltaické solární systémy* [online]. [cit. 2016-05-08]. 2007. Dostupné z: <http://www.solarni-energie.info/fotovoltaicke-solarni-panely-kolektory.php>
- [22] *EkoWATT. OZE: Energie Slunce* [online]. [cit. 2016-05-08]. 2007. Dostupné z:
<http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-slunce---vyroba-elektřiny>
- [23] *Ministerstvo pro místní rozvoj. Fotovoltaika* [online]. 2014 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.mmr.cz/getmedia/b4a94988-32fd-4b69-a548-82a288467769/FVE-web_01_2014.pdf
- [24] *Publi.cz. Konstrukce a výroba FV článků a panelů* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/03.html#3-1>
- [25] *Solartechnika.sk: Monokrystalický a polykrystalický článek* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/jakou-fotovoltaickou-elektřinu-zvolit-na-dum.html>
- [26] *Greenczech. Alternativní technologie-amorfni křemík* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.greenczech.cz/novinky-info/>
- [27] *Solární novinky. Thin-film CIGS*. [Http://www.solarninovinky.cz](http://www.solarninovinky.cz) [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
<http://www.solarninovinky.cz/index.php?rs=4&rl=2010032102&rm=29#.Vy-GUfmLShf>
- [28] *Votum. CdTe technologie* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
<http://www.votum.cz/technologie-cdte/>

- [29] TZB INFO. *Fotovoltaika 2. a 3. generace* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
<http://www.tzb-info.cz/3506-fotovoltaika-druhe-a-treti-generace>
- [30] FZÚ AV ČR. *Přeměna sluneční energie v elektrickou* [online]. 2000 [cit. 2016-05-08].
Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>
- [31] Micronix. *Základní informace: Solární panely* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
<http://www.micronix.cz/solarix/zakladni-informace/solarni-panely>
- [32] BANNERT, Petr. *VOŠ a SPŠE Varnsdorf. Praktika z fotovoltaiky* [online]. 2012 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z:
http://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2BP_EkO/um/praktika_z_fotovoltaiky.pdf?lang=cs
—
- [33] PVGIS. *Photovoltaic geographical information system* [online]. [cit. 2016-05-08].
Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Příloha

Příloha A: Obrázek č. 1.2 Energetická bilance Země



Příloha B: Katalogové listy jednotlivých FV panelů



CIGS SOLAR MODULE

Q.SMART UF L 95-115

Generation 1.3 - Efficiency and esthetics have a new name

With up to 13.4 %, our CIGS solar modules of the **Q.SMART** series are the most efficient thin-film modules on the market. The outstanding low-light behaviour as well as the extra power due to positive sorting and light soaking effect make them ideal for challenging installations. **Q.SMART UF L** is our space wonder for commercial and industrial flat roofs and facades.

THE NEW Q-CELLS GENERATION

- World's best efficiencies up to 13.4 %:
Highest yields per installed area.
- Anti PID Technology (APT)¹: **No power loss caused by potential induced degradation.**
- Outstanding low-light behaviour for 360° Efficiency (TDE): **High yields even in challenging roof expositions - north, west, south or east.**

THE PROVEN Q-CELLS VALUES

- Additional Power Boost (APB) with up to 15 % additional output due to positive sorting (+5 / -0W) and light soaking effect:
More power for your money.
- Increased module surface (0.94 m²):
Optimal utilization of flat roofs.
- Frameless Design: **Ideal for roof-parallel installations on flat roofs.**
- 25 years linear performance warranty, 10 years product warranty², even for installations <30 kWp: **Secure investment.**



THE IDEAL SOLUTION FOR:



¹ APT test conditions: Cells at -600 V relative to frame, wet module surface, 25 °C, 300 h
² Performance warranty: min. 100 % of nominal power in the first 3 years; max. 0.7% degradation per year from year 4; min. 85 % of nominal power after 25 years. Full product and performance warranties in accordance with the valid regional warranty terms.

MECHANICAL SPECIFICATION		TECHNICAL DRAWING					
Length	1190 (+3/-1) mm						
Width	789.5 (+3/-1) mm						
Height	7.3 mm (+ Junction box, 15 mm)						
Weight	16.5 kg						
Front Cover	4 mm tempered low iron glass						
Back Cover	3 mm float glass						
Frame	None						
Cell Type	ClGS [Cu(In, Ga) Se ₂]						
Junction box	Protection class IP 65, with 1 bypass diode (3 A) 66 x 54 x 15 mm ³						
Cable type	Solar cable 2.5 mm ² ; (+) 855 (+30/-0) mm; (-) 735 (+30/-0) mm						
Connector	MC4						
ELECTRICAL CHARACTERISTICS							
PERFORMANCE AT STANDARD TEST CONDITIONS (STC: 1000 W/m ² , 25 °C, AM 1.5 SPECTRUM) ¹							
POWER CLASS		95	100	105	110	115	
Nominal Power (+5/-0 Wp)	P _{MAX} [W]	95.0	100.0	105.0	110.0	115.0	
Short Circuit Current	I _{SC} [A]	1.68	1.68	1.68	1.69	1.69	
Open Circuit Voltage	V _{OC} [V]	89.0	90.1	91.6	93.3	95.1	
Current at Maximum Power	I _{MPP} [A]	1.43	1.46	1.49	1.52	1.54	
Voltage at Maximum Power	V _{MPP} [V]	66.4	68.5	70.5	72.4	74.7	
Nominal Efficiency	η [%]	≥ 10.1	≥ 10.6	≥ 11.2	≥ 11.7	≥ 12.2	
PERFORMANCE AT NORMAL OPERATING CELL TEMPERATURE (NOCT: 800 W/m ² , 51 ± 2 °C, AM 1.5 SPECTRUM)							
POWER CLASS		95	100	105	110	115	
Nominal Power	P _{MAX} [W]	68.7	72.3	75.9	79.5	83.1	
Short Circuit Current	I _{SC} [A]	1.34	1.34	1.34	1.35	1.35	
Open Circuit Voltage	V _{OC} [V]	81.0	82.0	83.4	84.9	86.5	
Current at Maximum Power	I _{MPP} [A]	1.14	1.16	1.18	1.21	1.22	
Voltage at Maximum Power	V _{MPP} [V]	60.2	62.1	64.0	65.7	67.8	
¹ Measurement accuracy P _{MPP} : ±5%; measurement accuracy I _{SC} , V _{OC} , I _{MPP} , V _{MPP} : ±10%. All STC measurements based on pre-treatment of modules with 1 hour light soak (1000 W/m ² [1 kWh/m ²], in open circuit) followed by cool down to 25 °C. For the system conception, please take into account the typical relative V _{OC} and V _{MPP} power increase of 2.5% after 215 kWh/m ² light soaking. This power boost is not included in the nominal values of this data sheet.							
PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE		CHARACTERISTICS AT DIFFERENT TEMPERATURES AND IRRADIANCES					
<p>The typical relative change in module efficiency (at nominal power) at an irradiance of 200 W/m² in relation to 1000 W/m² (both at 25 °C and AM 1.5 spectrum) is -4.0% rel.</p>							
TEMPERATURE COEFFICIENTS (AT 1000 W/m ² , AM 1.5 SPECTRUM)							
Temperature Coefficient of I _{SC}	α	[%/K]	+ 0.00 ± 0.04	Temperature Coefficient of V _{OC}	β	[%/K]	- 0.29 ± 0.04
Temperature Coefficient of P _{MAX}	γ	[%/K]	- 0.38 ± 0.04				
PROPERTIES FOR SYSTEM DESIGN							
Maximum System Voltage V _{SYS}	[V]	1000 (IEC) / 600 (UL 1703)		Safety Class	II		
Maximum Reverse Current I _s	[A]	5.1		Fire Rating	C		
Wind/Snow Load	[Pa]	2400		Permitted module temperature on continuous duty	-40 °C up to +85 °C		
QUALIFICATIONS AND CERTIFICATES				PARTNER			
IEC 61646 (Ed. 2), IEC 61730 (Ed. 1) Application Class A, UL 1703 The production site is certified according to ISO 9001 for Quality Management.							
Content of this data sheet according to DIN EN 50380.							
NOTE: Installation instructions must be followed. See the installation and operating manual or contact the technical service for further information on approved installation and use of this product.							

Specifications subject to technical changes © Q-Cells SE Q-Smart UF L_G1.3_Englsh_2011-09_03

Q-CELLS SE
OT Thalheim, Sonnenallee 17-21
06766 Bitterfeld-Wolfen, Germany

TEL +49 (0)3494 66 99-0
FAX +49 (0)3494 66 99-199

EMAIL service@q-cells.com
WEB www.q-cells.com



CDTE-DÜNNSCICHTMODUL CX1

calyxo



MECHANISCHE KENNGRÖSSEN	CX1	EINSATZGEBIETE
Länge x Breite	1200 mm x 600 mm	Freiflächen 
Höhe	6,9 mm (21,0 mm inklusive Anschlussdose)	
Gewicht	12,0 kg	Dachflächen 
Frontabdeckung	3,2 mm Glas	
Rückabdeckung	3,2 mm Glas	
Zelltyp	Cadmiumtellurid / Cadmiumsulfid [CdTe/CdS]	
Anschlussdose	Schutzart IP 65	
Bypassdiode	entfällt	
Kabellänge	600 mm (+Kabel) / 800 mm (-Kabel)	
Steckverbinder	Multicontact MC4	
Zertifikat	IEC 61646; IEC 61730; CE	

PRODUKTVORTEILE

ausgezeichnetes Schwachlichtverhalten und geringe Temperaturempfindlichkeit
hoher Performance Ratio
gesicherter Recyclingprozess

A COMPANY OF 

CDTE-DÜNNSCHICHTMODUL CX1



ELEKTRISCHE KENNGRÖSSEN

NENNWERTE BEI STANDARD TESTBEDINGUNGEN (STC: 1000 W/m², 25°C, AM 1,5 SPEKTRUM)

PRODUKTNAME			CX55	CX57	CX60	CX62	CX65
Nennleistung (+2,5/-0 Wp)	P_{max}	[W]	55,0	57,5	60,0	62,5	65,0
Kurzschlussstrom	I_{sc}	[A]	1,15	1,15	1,15	1,16	1,16
Leerlaufspannung	V_{oc}	[V]	86,9	87,9	88,9	89,8	90,7
Strom bei max. Leistung	I_{mp}	[A]	0,93	0,95	0,96	0,97	0,99
Spannung bei max. Leistung	V_{mp}	[V]	60,7	62,3	63,9	65,5	67,2

NENNWERTE BEI NENNBETRIEBS-ZELLENTemperatur (NOCT: 800 W/m², 50±2°C, AM 1,5 SPEKTRUM)

PRODUKTNAME			CX55	CX57	CX60	CX62	CX65
Nennleistung	P_{max}	[W]	44,9	47,0	49,2	51,1	53,1
Kurzschlussstrom	I_{sc}	[A]	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00
Leerlaufspannung	V_{oc}	[V]	85,1	86,0	87,0	87,9	88,8
Strom bei max. Leistung	I_{mp}	[A]	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88
Spannung bei max. Leistung	V_{mp}	[V]	59,5	61,1	62,7	64,3	65,9

SCHWACHLICHTVERHALTEN

Die typische relative Änderung des Modulwirkungsgrades bei einer Einstrahlung von 200 W/m² im Verhältnis zu 1000 W/m² (gemessen bei 25°C, AM 1,5 Spektrum) ist auf Anfrage erhältlich.

TEMPERATURKOEFFIZIENTEN (BEI 1000 W/m², AM 1,5 SPEKTRUM)

Temperaturkoeffizienten von I _{sc}	α	[%/K]	+0,02
Temperaturkoeffizienten von V _{oc}	β	[%/K]	-0,24
Temperaturkoeffizienten von P _{max}	γ	[%/K]	-0,25

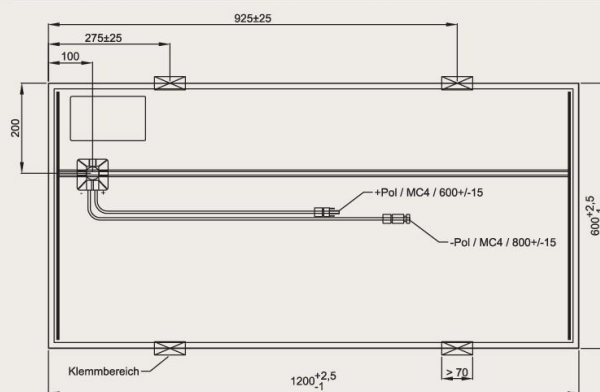
1) Alle aufgeführten Messwerte, falls nicht anders ausgewiesen, sind Nennwerte mit einer Toleranz von ±10%. Zur gültigen STC-Leistungsbestimmung muss das Modul mit einer Lichtbehandlung (1 Stunde bei 1000 W/m², offene Klemmspannung) und anschließender Abkühlphase auf 25°C vorbehandelt werden.

KENNGRÖSSEN ZUR SYSTEMEINBINDUNG

Schutzklasse		II
Brandschutzklasse		Klasse C
Wind-/Schneelast		2400 Pa
Maximale Systemspannung	V_{sys}	[V] 1000 (IEC) / 600 (CSA/UL)
Rückstrombelastbarkeit	I_r	[A] 3,0

Weitere Informationen zur freigegebenen Nutzung des Produkts sind der Installationsanleitung zu entnehmen.

TECHNISCHE ZEICHNUNG



QUALIFIKATIONEN UND ZERTIFIKATE

IEC 61646; IEC 61730 Anwendungsklasse A;
UL 1703 (in Vorbereitung); DIN EN ISO
9001:2008; DIN EN ISO 14001:2004; CE-
Kennzeichen



Safety Class II



Technische Änderungen in der Spezifikation vorbehalten © Calyxo GmbH EU/Deutsch; Rev. 10, April 2010

CALYXO GMBH

OT Thalheim, Sonnenallee 1a
06766 Bitterfeld-Wolfen, Germany

TEL +49 (0)3494 368980-0
FAX +49 (0)3494 368980-111

EMAIL calyxo@calyxo.com
WEB www.calyxo.com

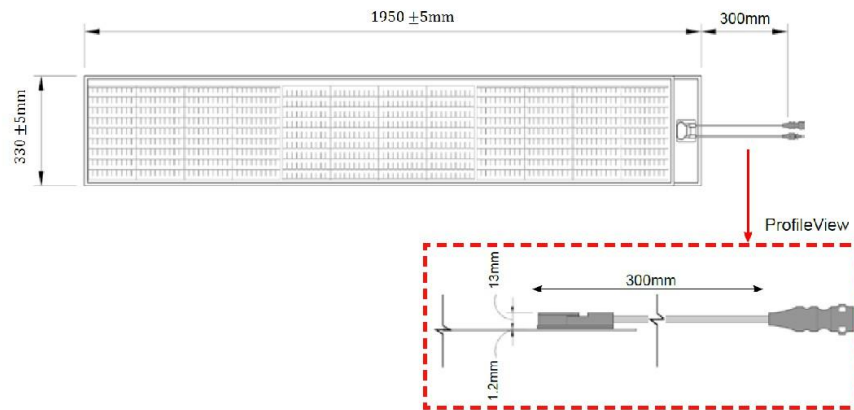
A COMPANY OF Q CELLS



WaveSol Light 2- Meter 24 Voc Specification Sheet		
Product class	WSLE-0450-024	WSLE-0500-024
Electrical specifications (Measured under Standard test conditons)		
Nominal Power (Pmax in Watts)	45	50
Voltage at Pmax (Vmp in Volts)	16.3	17.3
Current at Pmax (Imp in Amps)	2.76	2.9
Open Circuit Voltage (Voc in Volts)	23.5	24.5
Short Circuit Current (Isc in Amps)	3.35	3.4
Power tolerance not to exceed	± 10%	
Electrical tolerance not to exceed	±10 %	
Mechanical characteristics		
Length	1950 ±5mm	
Width	330 ±5mm	
Wight	1.3 kg	
Thickness	2± 0.5mm (excluding junction box=)	
Junction box	Class IP65 with bypass diode	
Output cables	300 mm Length (minimum)	
Output connectors	MC4 compatible	
NOCT (Nominal operating cell temperature)	50 °C	
Front surface	Fluoropolymer	
Back surface	Polyethylene with EVA primer	
Minimum bend radius	Cell-side out: 190 mm Cell side in: 500 mm	
Temperature coefficents		
Power	-0.50%/°C (± 10%)	
Vmp	-0.51%/°C (± 10%)	
Imp	+0.01%/°C (± 10%)	
Voc	-0.42%/°C (± 10%)	
Isc	+0.03%/°C (± 10%)	
Maximum systém voltage	600 V US / 1,000 V EU	
Max Series Fuse rating	5A	
Specifications Subject to chase		
Standard Test Conditions: 25°C, 1 kW/m2, AM 1.5		



WaveSol Light 2-Meter
Front Side View



WaveSol Light 2-Meter
Back Side View



Ascent Solar Technologies, Inc.
12300 N. Grant St.
Thornton, CO 80241
Phone: +1 (720) 872-5000
Fax: +1 (720) 872-5077
bipv@ascentsolar.com
www.ascentsolar.com



4T, a.s. - Průmyslová 566/5, 108 00 Praha 10, Česká republika

DIČ:CZ27135641, spisová značka: B 9233 vedená u rejstříkového soudu v Praze

provozovna : 4T, a.s. - Vančurova 113, 277 13 Kostelec nad Labem

T: +420.326.734.964, F: 326.734.965, E: info@4T.cz, www.4T.cz

ISO 9001: 2000

NÁZEV ZBOŽÍ : Hybridní kolektor

ČÍSLO ZBOŽÍ : SO190500

TYP : Powervolt 190/500

POPIS : Deskový hybridní kolektor pro současnou výrobu tepelné i elektrické energie, plášť z Al, trubky a absorber z Cu, povrch absorberu Monokrystalický, vhodný pro celoroční provoz. Powervolt výkon – FVE 190 Wp, Termika 500 W / 1 kolektor

	Volther kolektor hybridní	Volther kolektor hybridní
Typ	Powervolt 190/500	Powertherm 170/750
Rozměry	828x1655x90 mm	860x1660x105 mm
Váha	24 kg	34,4 kg
Obsah kapaliny	1,2 l	1,2 l
Absorber	Monokrystalický	Monokrystalický
Počet článků	72	72
Rozměry článků	125x125 mm	125x125 mm
Nominální výkon	190 W	170
Nominální proud	5,2 A	5,2 A
Zkratový proud	5,6 A	5,6 A
Optimální provozní napětí	36,5 V	36,5 V
Napětí na prázdko	45,2 V	45,2 V
Teplotní výměník	Měď	Měď
Vnitřní potrubí	Měď	Měď
Průtok	65 l/h	65 l/h
Zkušební tlak (bar)	20	20
Provozní tlak (bar)	10	10
Vrchní sklo	PV sklo	Extra Solar sklo
Těsnění	EPDM&Silicon	EPDM & Silisyum
Maximální teplota	<110 °C	<110 °C
Rám	Hliník	Hliník
Zadní strana	Hliník	Hliník
Záruka	10 let	10 let
Záruka výkonu	90% < 10 let	90% < 10 let
Záruka účinnosti	80% < 20 let	90% < 20 let



Radiace	1000	W/m2	η
$\Delta T \%$ 10°C	Q=55 l/h/m2		
T out	Wth/m2	We/m2	Wth/m2
10°C	>680	146,00	>82,0%
20°C	680	138	81%
40°C	557	123	68%
60°C	475	108	58%
80°C	370	96	46%

- PRVNÍ SOLÁRNÍ VELKOOBCHOD V ČECHÁCH -

solární ohřev vody a bazénů - akumulace tepla z více zdrojů - inteligentní řízení spotřeby vody - bezztrátová úprava teplé vody

Příloha C: Originály naměřených hodnot

Pro panel CIGS

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 143 - ARQ	21.10.2015 10:59		STC values not available											
143 Measures@OPC		1	28,82	80,11	57,88	0,50	0,68	323	17,5	53	AUX	0	0	0
143 Meas Avg@OPC		1	28,82	80,11	57,88	0,50	0,68	323	17,5	53	AUX	0	0	0
143 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0
143 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0
Meas. 148 - ARQ	21.10.2015 11:25		STC values not available											
148 Measures@OPC		1	60,67	86,41	60,31	1,01	1,36	587	12,8	52	AUX	0	0	0
148 Meas Avg@OPC		1	60,67	86,41	60,31	1,01	1,36	587	12,8	52	AUX	0	0	0
148 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0
148 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 68 - #DEFAULT	26.05.2000 19:23		Not Ok (-50,54%)											
68 Measures@OPC		1	47,75	83,84	60,67	0,79	1,08	522	15,3	53	AUX	0,0359	-0,33	5
68 Meas Avg@OPC		1	47,75	83,84	60,67	0,79	1,08	522	15,3	53	AUX	0,0359	-0,33	5
68 STC		1	81,61	84,31	55,49	1,47	2,06	1000	25,0	47	AUX	0,0359	-0,33	5
68 Nominal		1	165,00	36,00	27,50	6,00	6,50	1000	25,0	71	AUX	0,0359	-0,33	5
Meas. 69 - #DEFAULT	26.05.2000 19:24		Not Ok (-51,10%)											
69 Measures@OPC		1	38,46	82,14	59,17	0,65	0,87	417	14,7	54	AUX	0,0359	-0,33	5
69 Meas Avg@OPC		1	38,46	82,14	59,17	0,65	0,87	417	14,7	54	AUX	0,0359	-0,33	5
69 STC		1	80,69	83,46	54,41	1,48	2,09	1000	25,0	46	AUX	0,0359	-0,33	5
69 Nominal		1	165,00	36,00	27,50	6,00	6,50	1000	25,0	71	AUX	0,0359	-0,33	5

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 204 - ARQ	06.05.2000 23:35		STC values not available											
204 Measures@OPC		1	65,22	79,01	53,52	1,22	1,66	801	30,3	50	AUX	0	0	0
204 Meas Avg@OPC		1	65,22	79,01	53,52	1,22	1,66	801	30,3	50	AUX	0	0	0
204 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0
204 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0
Meas. 220 - #DEFAULT	07.05.2000 1:25		Not Ok (-56,17%)											
220 Measures@OPC		1	13,02	69,47	49,88	0,26	0,34	164	27,8	55	AUX	0,0359	-0,33	5
220 Meas Avg@OPC		1	13,02	69,47	49,88	0,26	0,34	164	27,8	55	AUX	0,0359	-0,33	5
220 STC		1	72,32	77,55	50,10	1,44	2,08	1000	25,0	45	AUX	0,0359	-0,33	5
220 Nominal		1	165,00	36,00	27,50	6,00	6,50	1000	25,0	71	AUX	0,0359	-0,33	5

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 32 - MONO	23.05.2000 22:37		STC values not available											
32 Measures@OPC		1	64,66	80,12	56,74	1,14	1,58	752	23,1	51	AUX	0	0	0
32 Meas Avg@OPC		1	64,66	80,12	56,74	1,14	1,58	752	23,1	51	AUX	0	0	0
32 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0
32 Nominal		1	190,00	45,20	36,50	5,20	5,60	1000	25,0	75	AUX	0	0	0
Meas. 33 - MONO	23.05.2000 22:37		STC values not available											
33 Measures@OPC		1	64,58	80,05	56,67	1,14	1,59	753	23,2	51	AUX	0	0	0
33 Meas Avg@OPC		1	64,58	80,05	56,67	1,14	1,59	753	23,2	51	AUX	0	0	0
33 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0
33 Nominal		1	190,00	45,20	36,50	5,20	5,60	1000	25,0	75	AUX	0	0	0

Pro panel CdTe

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-	
Meas. 145 - ARQ	21.10.2015 11:03	STC values not available												
145 Measures@OPC	1	35,88	90,53	67,96	0,53	0,60	624	12,5	66	AUX	0	0	0	0
145 Meas Avg@OPC	1	35,88	90,53	67,96	0,53	0,60	624	12,5	66	AUX	0	0	0	0
145 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
145 Nominal	1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0
Meas. 146 - ARQ	21.10.2015 11:03	STC values not available												
146 Measures@OPC	1	16,95	86,29	64,96	0,26	0,35	257	12,3	57	AUX	0	0	0	0
146 Meas Avg@OPC	1	16,95	86,29	64,96	0,26	0,35	257	12,3	57	AUX	0	0	0	0
146 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
146 Nominal	1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-	
Meas. 66 - #DEFAULT	26.05.2000 19:15	Not Ok (-59,25%)												
66 Measures@OPC	1	29,88	86,77	65,24	0,46	0,57	414	15,7	61	AUX	0,0359	-0,33	5	5
66 Meas Avg@OPC	1	29,88	86,77	65,24	0,46	0,57	414	15,7	61	AUX	0,0359	-0,33	5	5
66 STC	1	67,23	88,44	60,45	1,11	1,38	1000	25,0	55	AUX	0,0359	-0,33	5	5
66 Nominal	1	165,00	36,00	27,50	6,00	6,50	1000	25,0	71	AUX	0,0359	-0,33	5	5
Meas. 67 - #DEFAULT	26.05.2000 19:18	Not Ok (-59,52%)												
67 Measures@OPC	1	36,65	87,32	64,53	0,57	0,69	509	15,5	61	AUX	0,0359	-0,33	5	5
67 Meas Avg@OPC	1	36,65	87,32	64,53	0,57	0,69	509	15,5	61	AUX	0,0359	-0,33	5	5
67 STC	1	66,80	87,96	62,98	1,06	1,36	1000	25,0	56	AUX	0,0359	-0,33	5	5
67 Nominal	1	165,00	36,00	27,50	6,00	6,50	1000	25,0	71	AUX	0,0359	-0,33	5	5

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-	
Meas. 206 - STR	06.05.2000 23:44	STC values not available												
206 Measures@OPC	1	60,73	86,90	62,10	0,98	1,17	817	24,2	60	AUX	0	0	0	0
206 Meas Avg@OPC	1	60,73	86,90	62,10	0,98	1,17	817	24,2	60	AUX	0	0	0	0
206 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
206 Nominal	1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0
Meas. 219 - #DEFAULT	07.05.2000 1:24	Not Ok (-63,55%)												
219 Measures@OPC	1	11,72	76,62	53,74	0,22	0,27	195	29,7	56	AUX	0,0359	-0,33	5	5
219 Meas Avg@OPC	1	11,72	76,62	53,74	0,22	0,27	195	29,7	56	AUX	0,0359	-0,33	5	5
219 STC	1	60,15	85,34	56,07	1,07	1,38	1000	25,0	51	AUX	0,0359	-0,33	5	5
219 Nominal	1	165,00	36,00	27,50	6,00	6,50	1000	25,0	71	AUX	0,0359	-0,33	5	5

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-	
Meas. 30 - MONO	23.05.2000 22:31	STC values not available												
30 Measures@OPC	1	55,97	86,24	63,53	0,88	1,08	773	19,3	60	AUX	0	0	0	0
30 Meas Avg@OPC	1	55,97	86,24	63,53	0,88	1,08	773	19,3	60	AUX	0	0	0	0
30 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
30 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,20	5,60	1000	25,0	75	AUX	0	0	0	0
Meas. 31 - MONO	23.05.2000 22:32	STC values not available												
31 Measures@OPC	1	55,75	85,98	61,60	0,91	1,08	780	18,4	60	AUX	0	0	0	0
31 Meas Avg@OPC	1	55,75	85,98	61,60	0,91	1,08	780	18,4	60	AUX	0	0	0	0
31 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
31 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,20	5,60	1000	25,0	75	AUX	0	0	0	0

Pro panel flexi CIGS

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 151 - ARQ	21.10.2015 11:29	STC values not available													
151 Measures@OPC		1	33,16	24,80	19,01	1,74	1,98	537	15,2	67	AUX	0	0	0	0
151 Meas Avg@OPC		1	33,16	24,80	19,01	1,74	1,98	537	15,2	67	AUX	0	0	0	0
151 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
151 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0
Meas. 165 - ARQ	21.10.2015 11:54	STC values not available													
165 Measures@OPC		1	10,64	21,17	15,72	0,68	0,89	203	19,8	57	AUX	0	0	0	0
165 Meas Avg@OPC		1	10,64	21,17	15,72	0,68	0,89	203	19,8	57	AUX	0	0	0	0
165 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
165 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 202 - ARQ	01.01.2000 0:58	STC values not available													
202 Measures@OPC		1	28,19	23,70	18,15	1,55	1,80	406	15,5	66	AUX	0	0	0	0
202 Meas Avg@OPC		1	28,19	23,70	18,15	1,55	1,80	406	15,5	66	AUX	0	0	0	0
202 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
202 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0
Meas. 203 - ARQ	01.01.2000 0:58	STC values not available													
203 Measures@OPC		1	28,02	23,65	18,15	1,54	1,81	464	15,4	66	AUX	0	0	0	0
203 Meas Avg@OPC		1	28,02	23,65	18,15	1,54	1,81	464	15,4	66	AUX	0	0	0	0
203 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
203 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 211 - #DEFAULT	07.05.2000 0:23	STC values not available													
211 Measures@OPC		1	39,84	22,75	16,37	2,43	2,70	714	30,1	65	AUX	0	0	0	0
211 Meas Avg@OPC		1	39,84	22,75	16,37	2,43	2,70	714	30,1	65	AUX	0	0	0	0
211 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
211 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0
Meas. 216 - #DEFAULT	07.05.2000 0:47	STC values not available													
216 Measures@OPC		1	8,24	20,40	15,44	0,53	0,71	183	23,2	57	AUX	0	0	0	0
216 Meas Avg@OPC		1	8,24	20,40	15,44	0,53	0,71	183	23,2	57	AUX	0	0	0	0
216 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
216 Nominal		1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0

		Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 34 - MONO	23.05.2000 22:39	STC values not available													
34 Measures@OPC		1	43,31	23,38	17,29	2,50	3,07	703	24,8	60	AUX	0	0	0	0
34 Meas Avg@OPC		1	43,31	23,38	17,29	2,50	3,07	703	24,8	60	AUX	0	0	0	0
34 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
34 Nominal		1	190,00	45,20	36,50	5,20	5,60	1000	25,0	75	AUX	0	0	0	0
Meas. 35 - MONO	23.05.2000 22:39	STC values not available													
35 Measures@OPC		1	42,89	23,27	16,72	2,56	3,08	656	25,0	60	AUX	0	0	0	0
35 Meas Avg@OPC		1	42,89	23,27	16,72	2,56	3,08	656	25,0	60	AUX	0	0	0	0
35 STC		1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0
35 Nominal		1	190,00	45,20	36,50	5,20	5,60	1000	25,0	75	AUX	0	0	0	0

Pro monokrystalický panel

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-	
Meas. 157 - ARQ	21.10.2015 11:35	STC values not available													
157 Measures@OPC	1	162,75	42,16	33,73	4,83	4,82	787	15,6	80	AUX	0	0	0	0	
157 Meas Avg@OPC	1	162,75	42,16	33,73	4,83	4,82	787	15,6	80	AUX	0	0	0	0	
157 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0	
157 Nominal	1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0	
Meas. 161 - ARQ	21.10.2015 11:40	STC values not available													
161 Measures@OPC	1	46,50	39,33	32,15	1,45	1,50	233	16,3	79	AUX	0	0	0	0	
161 Meas Avg@OPC	1	46,50	39,33	32,15	1,45	1,50	233	16,3	79	AUX	0	0	0	0	
161 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0	
161 Nominal	1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0	

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-	
Meas. 182 - ARQ	01.01.2000 0:15	STC values not available													
182 Measures@OPC	1	113,32	40,47	32,01	3,54	3,73	554	18,8	75	AUX	0	0	0	0	
182 Meas Avg@OPC	1	113,32	40,47	32,01	3,54	3,73	554	18,8	75	AUX	0	0	0	0	
182 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0	
182 Nominal	1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0	
Meas. 184 - ARQ	01.01.2000 0:18	STC values not available													
184 Measures@OPC	1	110,07	40,31	32,23	3,42	3,64	495	18,6	75	AUX	0	0	0	0	
184 Meas Avg@OPC	1	110,07	40,31	32,23	3,42	3,64	495	18,6	75	AUX	0	0	0	0	
184 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0	
184 Nominal	1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0	

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-	
Meas. 213 - #DEFAULT	07.05.2000 0:39	STC values not available													
213 Measures@OPC	1	156,66	40,82	32,94	4,76	4,75	783	21,0	81	AUX	0	0	0	0	
213 Meas Avg@OPC	1	156,66	40,82	32,94	4,76	4,75	783	21,0	81	AUX	0	0	0	0	
213 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0	
213 Nominal	1	95,00	90,70	66,90	1,42	1,63	1000	25,0	64	AUX	0	0	0	0	
Meas. 222 - #DEFAULT	07.05.2000 1:27	Not Ok (31,50%)													
222 Measures@OPC	1	36,55	39,10	32,51	1,12	1,23	170	25,6	76	AUX	0,0359	-0,33	5	5	
222 Meas Avg@OPC	1	36,55	39,10	32,51	1,12	1,23	170	25,6	76	AUX	0,0359	-0,33	5	5	
222 STC	1	216,97	43,32	32,83	6,61	7,22	1000	25,0	69	AUX	0,0359	-0,33	5	5	
222 Nominal	1	165,00	36,00	27,50	6,00	6,50	1000	25,0	71	AUX	0,0359	-0,33	5	5	

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-	
Meas. 2 - MONO	23.05.2000 21:46	STC values not available													
2 Measures@OPC	1	142,98	38,96	29,44	4,86	5,34	731	17,4	69	AUX	0	0	0	0	
2 Meas Avg@OPC	1	142,98	38,96	29,44	4,86	5,34	731	17,4	69	AUX	0	0	0	0	
2 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0	
2 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,20	5,60	1000	25,0	75	AUX	0	0	0	0	
Meas. 3 - MONO	23.05.2000 21:46	STC values not available													
3 Measures@OPC	1	143,15	38,94	29,44	4,86	5,34	732	18,0	69	AUX	0	0	0	0	
3 Meas Avg@OPC	1	143,15	38,94	29,44	4,86	5,34	732	18,0	69	AUX	0	0	0	0	
3 STC	1	--	--	--	--	--	1000	25,0	--	AUX	0	0	0	0	
3 Nominal	1	190,00	45,20	36,50	5,20	5,60	1000	25,0	75	AUX	0	0	0	0	