



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

RECYKLACE POUŽITÝCH FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

RECYCLING OF USED PHOTOVOLTAIC CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Stanislav Doros

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1496/2019 Akademický rok: 2019/20
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student: **Bc. Stanislav Doros**
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Vedoucí práce: **prof. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.**

Název diplomové práce:

Recyklace použitých fotovoltaických článků

Zadání diplomové práce:

Spolupráce s firmou ViaAlta při hledání cest recyklace fotovoltaických článků.

Literární a patentová rešerše.

Experimenty separace jednotlivých segmentů použitých fotovoltaických článků.

Vyhodnocení experimentálních prací.

Termín odevzdání diplomové práce: 29.5.2020:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Stanislav Doros
student(ka)

prof. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2020

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je návrh metody recyklace/reutilizace fotovoltaických panelů po jejich vyřazení z užívání. V teoretické části je představen a popsán fotoelektrický jev, historie, vývoj, metody výroby a typy fotovoltaických panelů. Dále je rozebráno složení a struktura fotovoltaických panelů a specifikovány technologie, které se v současné době používají pro recyklaci těchto panelů za účelem maximální energetické úspory.

Experimentální část práce je především zaměřena na vývoj prototypového přístroje, pomocí kterého lze změřit stávající účinnost použitého fotovoltaického panelů komparační metodou a rychle v terénních podmínkách určit budoucí využitelnost solárního panelu.

ABSTRACT

The aim of the thesis is to design a method of recycling / reutilization of photovoltaic panels at the end of their service life. In the theoretical part is introduced and described photoelectric effect, history, development, production methods and types of photovoltaic panels. Furthermore, the composition and structure of photovoltaic panels are discussed and the technologies currently used for recycling these panels for maximum energy savings are specified.

The experimental part of the work is mainly focused on the development of a prototype device, which can measure the current efficiency of the used photovoltaic panels, based on a comparative method, and quickly determine in the field conditions the future reusability of the solar panel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Solární panel, recyklace, reutilizace, účinnost

KEY WORDS

Solar panel, recycling, reutilization, efficiency

DOROS, Stanislav. *Recyklace použitých fotovoltaických článků* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123922>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Tomáš Svěrák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Velice rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Tomášovi Svěrákovi CSc., za cenné rady, ochotný přístup a věnovaný čas. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Evě Kulované za vstřícnost, ochotu a pomoc. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své manželce za podporu během celého studia na vysoké škole.

1	ÚVOD	7
2	TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1	Sluneční záření.....	8
2.2	Fotovoltaické a fotoelektrické jevy.....	11
2.3	Polovodivé materiály	15
2.3.1	Vlastní vodivost	15
2.3.2	Nevlastní vodivost (příměsová).....	16
2.3.3	Elektronová vodivost – polovodič typu N.....	16
2.3.4	Děrová vodivost – polovodič typu P	16
2.3.5	Přechod PN	17
2.4	Základní struktura fotovoltaických panelů	17
2.5	Výroba fotovoltaických panelu na bázi křemíku	18
2.5.1	Zonální tavení (polykrystalické články)	18
2.5.2	Czochralského metoda (monokrystalické články).....	19
2.5.3	Výroba a úpravy polovodičových desek.....	20
2.5.4	Epitaxe	20
2.5.5	Umístění elektrických kontaktů.....	21
2.5.6	Antireflexní povlak.....	21
2.5.7	Kontrola kvality	21
2.5.8	Amorfni články.....	22
2.6	Tenkvrstvé články CIS, CdTe, CIGS.....	22
2.7	Generace FV článků.....	23
2.7.1	První generace	23
2.7.2	Druhá generace	24
2.7.3	Třetí generace	24
2.8	Historie vývoje fotovoltaických panelů	24
2.9	Recyklace.....	27
2.9.1	Termicko-chemická metoda	27
2.9.2	Mechanicko-chemická metoda	27
2.9.3	Recyklovatelné materiály a jejich výtěžnost	28
2.10	Legislativní úprava.....	28
2.10.1	Směrnice o elektrickém a elektronickém odpadu 2012/19/EC.....	29
2.10.2	Legislativní úprava České republiky	29
3	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	30
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32

4.1	Přístroje a pomůcky	32
4.2	Software	32
4.3	Separace jednotlivých segmentů použitých fotovoltaických článků	32
4.4	Reutilizace solárních panelů	35
4.5	Popis přístroje pro stanovení aktuální účinnosti panelu	38
4.5.1	Měření napětí	38
4.5.2	Měření proudu – ACS712.....	39
4.5.3	Stanovení maximální hodnoty výkonu panelu	39
4.5.4	Dynamický odpor	40
4.5.5	Zdrojový kód	41
4.6	Optimalizace stanovení VA charakteristiky	44
4.7	Měření VA charakteristik použitých FV modulů	46
5	VÝSLEDKY A DISKUZE	50
6	ZÁVĚR	53
7	SEZNAM POUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ.....	54
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	56
9	PŘÍLOHY.....	57
9.1	Naměřená data závislostí výkonu na napětí.....	57

1 ÚVOD

S obrovským nárůstem využívání zdrojů sluneční energie pro výrobu elektřiny se stalo narůstající množství použitých solárních panelů závažným problémem pro životní prostředí. Zatímco současný výzkum solárních panelů je zaměřen na zlepšení efektivity jejich výroby, snížení vstupních nákladů a zvýšení účinnosti; možnosti recyklace a celkově management likvidace panelů je nedostatečně řešen; lze to pozorovat například v nedostatku specializovaných zařízení a samotných technologií pro recyklaci solárních panelů.

V současnosti je kladen velký důraz na udržitelnost výkonu, využití v maximální možné míře obnovitelných zdrojů, po ukončení jejich životnosti je však nutné je zlikvidovat způsobem, který zbytečně nepřiměřenou měrou nezatíží životní prostředí. Cílem této práce je popsat možnosti využití solárních panelů po jejich vyřazení z užívání, případně i jiných solárních panelů, které se dostaly do sběrných míst a jsou určeny pro následnou recyklaci / likvidaci.

Využití fotovoltaické energie v posledních několika desetiletích prudce stoupl v rámci globálního úsilí o rozšíření výroby čisté energie a představuje obrovský tržní potenciál. Očekává se, že fotovoltaická energie bude produkovat významnou část energie po celém světě a stane se jedním z primárních globálních zdrojů energie v tomto století. Celosvětová nabídka solární energie se zvýšila z 1 GW v roce 2004 na 57 GW v roce 2015, roční růst je o více než 20 % rychlejší než růst v jiných odvětvích průmyslu, včetně ostatních rozvíjejících se obnovitelných zdrojů energie.

Vzhledem k tomu, že rozsáhlé využívání fosilních paliv je aktuálně jedním z hlavních zdrojů znečištění ovzduší, má energetický průmysl hlavní odpovědnost za řešení problémů životního prostředí. Trendy v energetické reformě však naštěstí mění strukturu energetického mixu, snižují podíl spotřebovaného množství uhlí na výrobu energie a podporují vývoj nových obnovitelných energetických zdrojů.

Solární panely však samy o sobě představují další ekologický problém, po uplynutí jejich využití se stávají nebezpečným odpadem, zejména solární panely vyrobené na bázi tenkovrstvé technologie. Zároveň se do recyklace mohou dostat (a dostávají) i solární panely, které jsou stále funkční a můžou i dále být využity pro výrobu elektrické energie. Proto je také důležité aplikovat principy udržitelného rozvoje, které zahrnuje jak oblasti udržitelnosti a kombinuje je s oblastmi ekonomie. Udržitelnost má tři odvětví: životní prostředí, potřeby současných a budoucích generací a hospodářství. Díky těmto odvětvím vytváří schopnost systému prosperovat udržováním ekonomické životaschopnosti.

Protože solární panely mají dlouhou životnost, recyklace odpadních panelů nebyla během prvních 25 let jejich vývoje problémem. Recyklace solárních panelů je zvláště výhodná z hlediska ochrany životního prostředí, protože výroba křemíku je procesem energeticky náročným, a energetické náklady na regeneraci křemíku z recyklovaných solárních panelů je ekvivalentní pouze jedné třetině nákladů oproti přímé výrobě křemíku. Kromě toho jsou v určitých typech solárních panelů přítomné rovněž těžké kovy jako olovo, cín a kadmium.

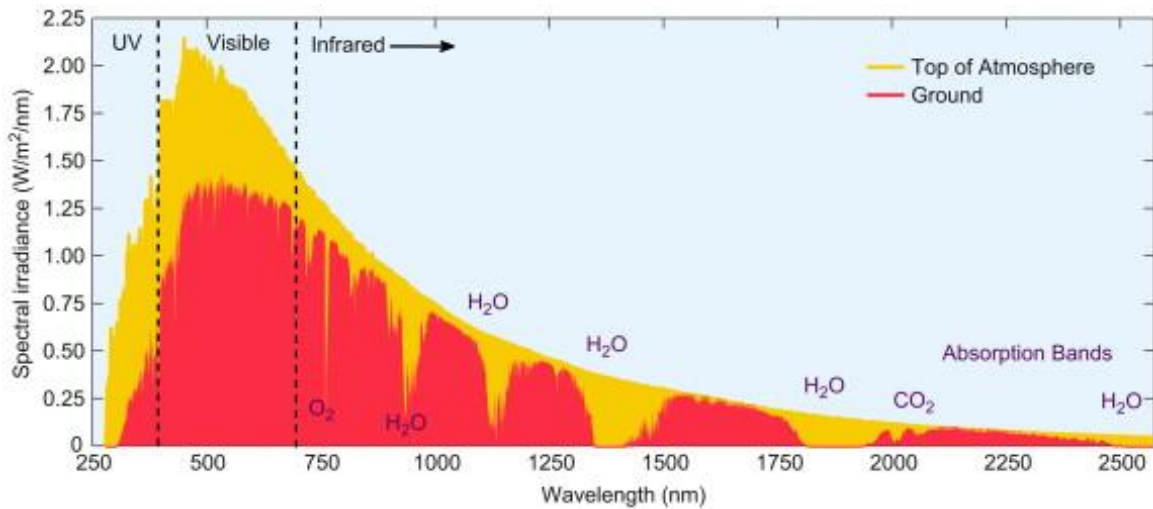
2 TEORETICKÁ ČÁST

Pro stanovení optimální metody zpracování vysloužilých fotovoltaických panelů, je zapotřebí znát jejich složení a strukturu. Na základě toho je možné nabídnout technologie, které budou využity k jejich ekologické likvidaci.

2.1 Sluneční záření

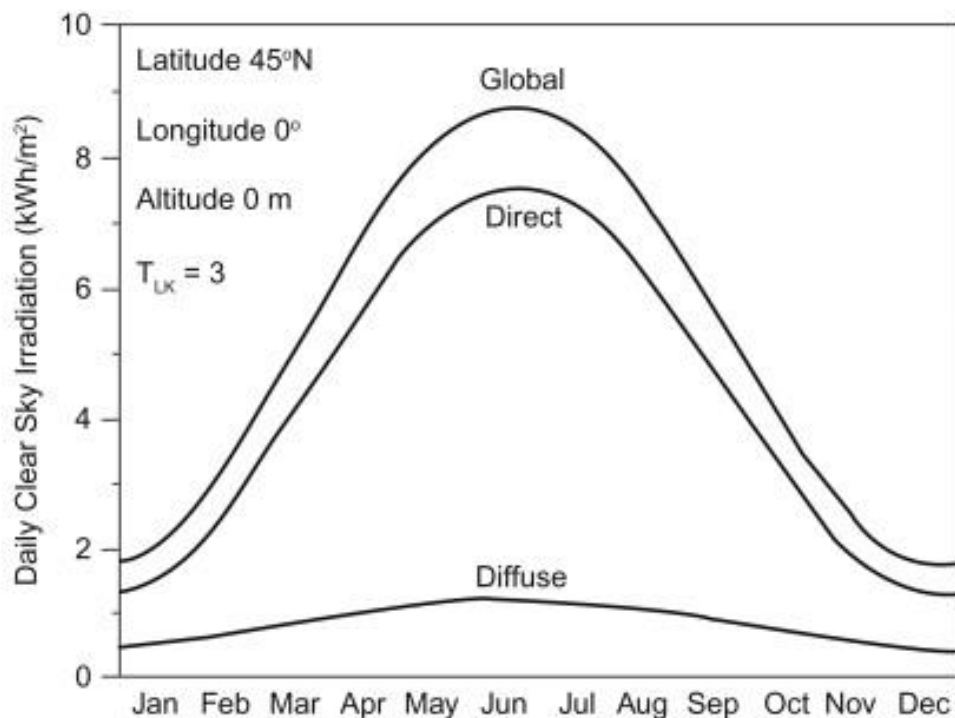
Slunce je jediná hvězda naše sluneční soustavy, která představuje téměř 99,8 % její hmotnosti. Slunce je tvořeno převážně vodíkem. Probíhají v něm termonukleární reakce, při kterých se slučují dva atomy vodíku a vzniká atom helia. Tento proces uvolňuje obrovské množství energie. Množství dopadající energie ze Slunce na povrch planety Země je tisíce krát větší než současná spotřeba lidstva. Doba života Slunce se odhaduje na 4 miliardy let. Z těchto údajů vyplývá značný energetický potenciál pro fotovoltaiku zaměřenou právě na zpracování sluneční energie. Slunce představuje významný zdroj energie a řadí se mezi tzv. obnovitelné zdroje. Vzhledem k délce jeho předpokládané životnosti lze ho považovat za nevyčerpatelný zdroj energie. Sluneční energie dopadá na Zemi v podobě elektromagnetického záření, které se nazývá globální. Globální záření se skládá z přímého a difuzního záření. Za přímé záření považujeme rovnoběžný paprsek vycházející ze Slunce. Naproti tomu difuzní záření vzniká v atmosféře jako důsledek rozptylu paprsků. Na rozptyl má vliv atmosféra, oblačnost a další klimatické podmínky [1].

Pro fotovoltaiku je důležitý nejen druh globálního záření, ale také intenzita dopadající energie. Dopadající energie na plochu se nazývá intenzita záření. Velikost intenzity je jedinečná pro každé místo na povrchu Země. Její velikost ovlivňuje velké množství faktorů, které nemůžeme ovlivnit, ale musíme s nimi při výstavbě fotovoltaické elektrárny počítat. Největší vliv na velikost intenzity záření má atmosféra. V atmosféře dochází k rozptylu, odrazu a pohlcování dopadajícího záření. Čím je vrstva atmosféry větší, tím nižší je intenzita záření. Vrstva atmosféry totiž ovlivňuje dráhu paprsku a také úhel jeho dopadu. S rostoucím úhlem dopadu prudce klesá velikost dopadající energie. Negativní vliv má nejen šířka vrstvy, ale i znečištění atmosféry. Většina vlivů má spojitost se zeměpisnou polohou. S polohou a výškou Slunce nad obzorem souvisí úhel dopadu záření, dráha paprsku, počet slunečních dnů, délka slunečního svitu, oblačnost. Další přirozené faktory představují střídání ročních období a také střídání dne a noci. Tyto cyklické změny ovlivňují atmosféru a tím i dopadající paprsky. Velmi důležitou hodnotou je délka slunečního svitu, která určuje množství energie dodané solárními systémům. Další jev, který se ve fotovoltaice zhodnocuje je tzv. globální oteplování, jelikož spolu s rostoucím počtem slunečních dní, roste i množství využitelné energie [1].



Obr. 1: Spektrální hustota zářivého toku a průchod slunečního záření atmosférou [1]

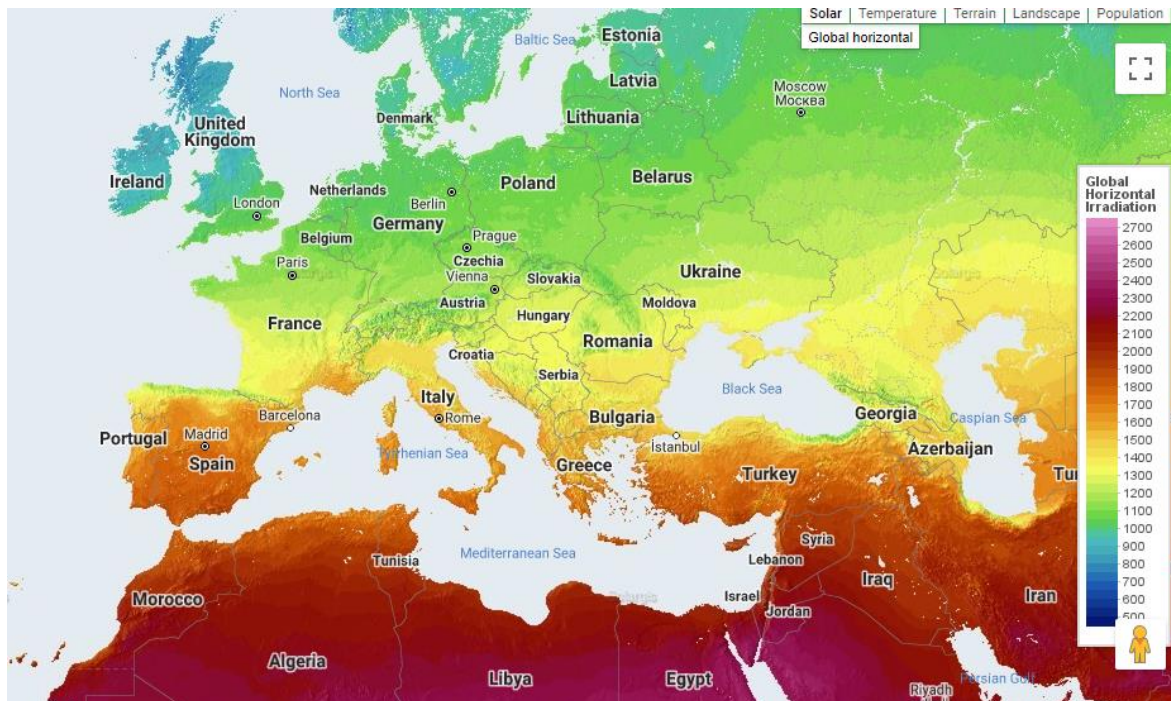
S rostoucí vzdáleností od Slunce se výkon rozptyluje na větší plochu, dopadající záření mění se v průběhu roku vlivem proměnlivé vzdálenosti Slunce-Země (eliptická dráha Země kolem Slunce), přičemž hodnota ve střední vzdálenosti Země-Slunce představuje sluneční konstantu $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$, která se v průběhu roku vlivem proměnlivé vzdálenosti Slunce-Země (změna vzdálenosti o 1,7 %) projevuje jako změna zářivého toku o 3,3 %. Dále záření průchodem atmosférou ztrácí část energie z důvodu absorpci. Tuto změnu můžeme pozorovat na Obr. 1 [1].



Obr. 2: Roční distribuce horizontálního ozáření pod bezmračnou oblohou, mořská hladina, zeměpisná šířka 45°N , ukazující rozdělení přímé, difúzní a globální ozáření s pevným faktorem turbidity Linke 3 [3]

Zároveň z důvodů měnící se intenzity záření během ročního období, pozorujeme rozložení celkového množství dopadajícího slunečního záření na zemský povrch, tato závislost je

znázorněná na Obr. 2. Právě z důvodů nerovnoměrného rozložení intenzity slunečního záření nejen přes celé roční období ale i přes den (mění se počasí, rotace země koule a alternace denního období a noci), solární elektrárny nejsou schopné zaručit konstantní a nepřetržitý zdroj elektrické energie, právě z tohoto důvodů, je potřeba kombinovat výrobu solární elektro energie s vhodnou metodou/technologii sběru vyrobené energie.



Obr. 3: Sluneční mapa [4]

Jeden z nejdůležitějších faktorů při výběru lokality pro výstavbu fotovoltaických elektráren je množství energie v kWh dopadající na m^2 plochy z 1 rok, což se odvíjí od geografické polohy daného místa. Pro grafické znázornění tohoto faktoru se používají tzv. sluneční mapy. Příklad takové mapy je znázorněn na Obr. 3.

Pro výpočet množství energie vygenerované systémem za rok, včetně veškerých potenciálních ztrát, používají se univerzální vzorce.

$$E = A \cdot r \cdot H \cdot PR \quad (1)$$

V Tab. 1 jsou popsány jednotlivé proměnné rovnice, na základě, které lze stanovit množství vyprodukované elektrické energie solární elektrárnou za rok [5].

Tab. 1: Parametry [5]

Označení	Název parametru	Jednotka
E	Energie	kWh/rok
A	Celková efektivní plocha solárních panelu	m ²
r	Účinnost solárního panelu	bezrozměrná
H	Průměrná roční ozáření dle geografického umístění	kWh/m ² za rok
PR	Výkonnostní poměr	bezrozměrná

PR parametr představuje součet ztrát systému a uvádí se jako výkonnostní poměr (performance ratio). Obecně tento parametr lze popsat pomocí rovnici:

$$PR = \prod_{x=\eta}^{\eta_i} x, \quad (2)$$

kde x je ztráta, a η_i je specifický druh ztráty. V Tab. 2 jsou popsány jednotlivé ztráty systému a příslušné, vyskytující se rozmezí hodnot ztrát [5].

Tab. 2: Typy ztrát v systémech solárních elektráren [5]

Ztráty (závisí na místě, technologii a velikosti)	Střední hodnota ztráty
Invertor	6 až 15
Teplotní	5 až 15
DC kabely	1 až 3
AC kabely	1 až 3
Stínování	0 až 40
Nízká intenzita záření	3 až 7
Prach, sníh, déšť	2

2.2 Fotovoltaické a fotoelektrické jevy

Chování elektromagnetického záření při interakci s látkou vysvětlil Albert Einstein až v roce 1905 s využitím poznatků kvantové teorie. Energie elektromagnetického záření je kvantována (nespojita). Velikost kvanta energie závisí na frekvenci (vlnové délce) elektromagnetického záření, přičemž platí:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \quad (3)$$

kde h je Planckova konstanta, ν je frekvence elektromagnetického záření, c je rychlost světla ve vakuu a λ je vlnová délka.

Při průchodu fotonu materiálem dochází k interakci mezi dopadajícím fotonem a vázanými elektrony, což způsobuje uvolnění elektronu a vznik volného nosiče náboje, přičemž dopadající foton musí mít dostatečnou energii k překonání potenciální bariéry pro excitaci. Rozlišují se dva efekty, první se charakterizuje difuzním vedením (vnitřní fotovoltaický jev) a druhý je charakterizován balistickým vedením (vnější fotoelektrický jev).

Je-li vlnová délka světla dostatečně malá, pak frekvence, a tedy i energie, kterou záření po dopadu předá elektronu, je dostačující pro uvolnění tohoto elektronu ze základní energetické hladiny. Velikost této energie potřebné k uvolnění elektronu se označuje jako ionizační energie nebo fotoelektrická bariéra. Minimální frekvence, potřebná k překonání fotoelektrické bariéry, se nazývá prahová frekvence.

Pokud je energie předaná elektronu větší, než je potřeba k jeho uvolnění, část energie zůstane. Z těchto úvah získal Einstein rovnici fotoelektrického jevu:

$$h \cdot \nu = h \cdot \nu_0 + E_{\max}, \quad (4)$$

kde $h\nu$ je energie dopadajícího fotonu, $h\nu_0$ je minimální energie potřebná k uvolnění elektronu, E_{\max} je maximální možná energie uvolněného elektronu.

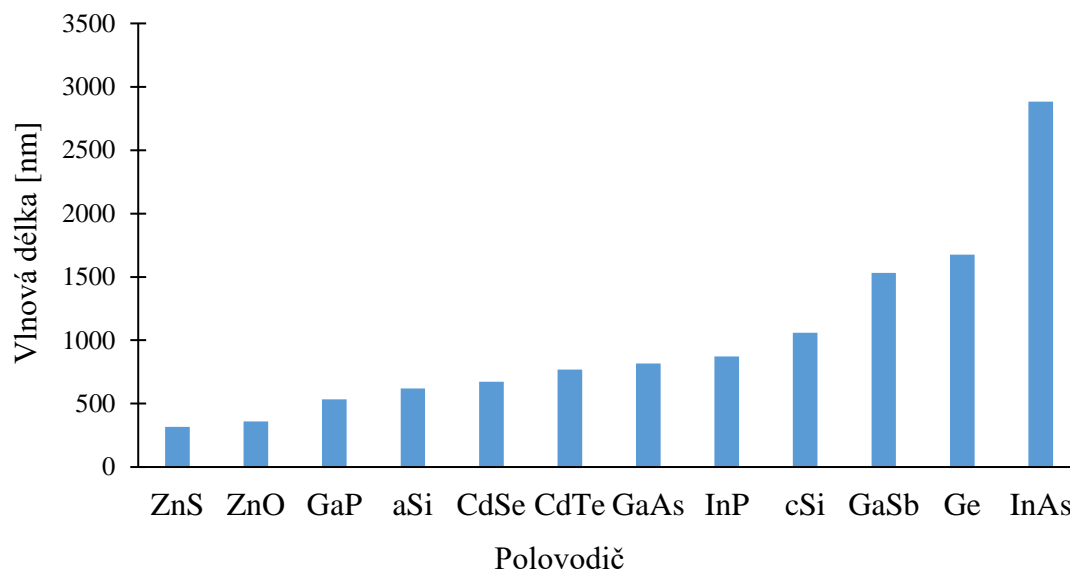
Z uvedené rovnice je vidět, že energie uvolněného elektronu závisí pouze na frekvenci dopadajícího záření, a nikoliv na intenzitě tohoto záření. Ačkoliv intenzita dopadajícího záření nemá vliv na energii uvolněných elektronů, ovlivňuje jejich počet, což znamená, že při větší intenzitě záření je větší počet uvolněných elektronů.

Fotovoltaické články jsou založeny na využití fotovoltaického jevu, při kterém světelné záření dopadá na panel, přičemž dochází k přeměně záření na elektrickou a tepelnou energii. Aby došlo k uvolnění elektronů, musí se překonat zakázaný pas, který představuje minimální energie potřebnou ke katapultování elektronu z valenčního pásu, zároveň tato hodnota je charakteristická pro každý materiál. Tento jev lze popsat pomocí následující rovnici:

$$\lambda = \frac{c \cdot h}{e \cdot b}, \quad (5)$$

kde λ je vlnová délka fotonů dopadajícího na materiál, c je rychlost světla ve vakuu, h je Planckova konstanta, b je energie zakázaného pásu materiálů, e je elementární náboj.

Z výše uvedeného vztahu lze získat minimální teoretickou hodnotu energie fotonů, který při dopadů na povrch zkoumaného materiálů vyvolá fotoelektrický jev. Na Obr. 4 a v Tab. 3 jsou ukázané hodnoty energii zakázaného pásu různých materiálů a příslušné vlnové délky fotonů.



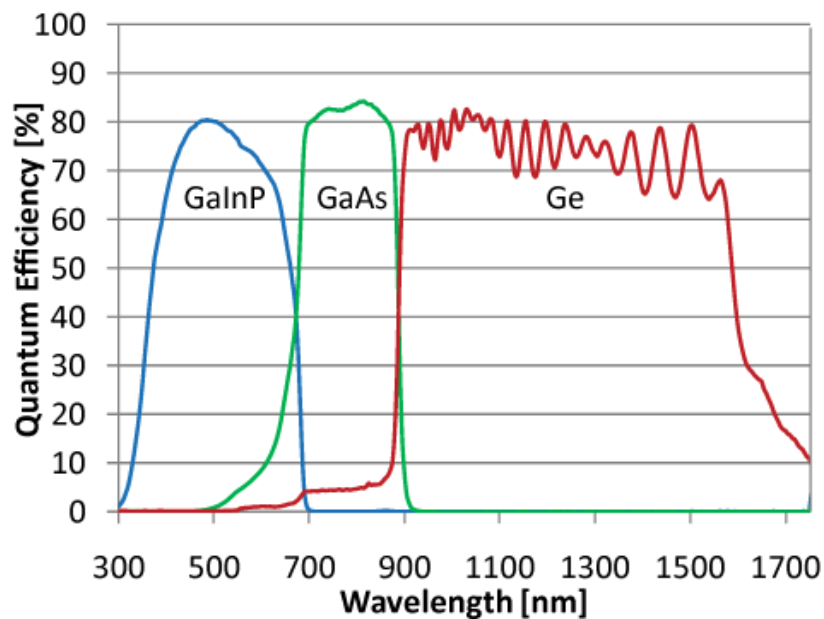
Obr. 4: Minimální energie dopadajícího fotonů o příslušné vlnové délce pro vznik fotovoltaického jevu

Tab. 3: Hodnoty energií zakázaného pasů různých materiálů a příslušné vlnové délky fotonů [5]

Polovodič	B [eV]	λ [nm]
ZnS	3,91	317
ZnO	3,44	360
GaP	2,32	534
aSi	2,00	620
CdSe	1,84	674
CdTe	1,61	770
GaAs	1,52	816
InP	1,42	873
cSi	1,17	1060
GaSb	0,81	1531
Ge	0,74	1675
InAs	0,43	2883

Další důležitý parametr, charakterizující aplikovatelnost materiálů pro výrobu FV panelů, je kvantová účinnost solárních článků. Kvantová účinnost je fyzikální veličina, která kvantitativně vyjadřuje fotocitlivost materiálu. Matematicky představuje poměr počtu fotonů, jejichž absorpce materiálem způsobila excitaci elektronu, k celkovému počtu dopadajících fotonů, obvykle vyjádřeno v procentech. Jelikož energie fotonů závisí na vlnové délce, proto se i kvantová účinnost měří pro různé rozsahy vlnových délek [5].

Integrace kvantové účinností přes rozsah vlnových délek slunečního záření stanovuje kvalitativní míru odezvy materiálu (tzv. spektrální citlivost) a schopnost materiálu převádět světlo na elektrickou energii. Jelikož pro každý z výše uvedených polovodičů existuje určitý omezený rozsah vlnových délek, při kterých materiál je schopen převádět elektromagnetické záření na elektrickou energii je účelnější využívat tandemové vícevrstevné struktury v solárních článcích. Tandemové struktury pokrývají širší rozsahy vlnových délek, ve kterých spektrální citlivost kvůli vhodně zvoleným vrstvám materiálů je lépe přizpůsobena dopadajícímu slunečnímu záření, čímž se dosahuje vyšší celková účinnost samotného článku. Na Obr. 5 je představená spektrální citlivost tandemového solárního článku skládající ze třech polovodičových vrstev. Je zřejmé že tandemové články účinněji převádí elektromagnetické záření na elektrickou energii, tím že pokrývají širší rozsah vlnových délek.



Obr. 5: Měření spektrální citlivosti tandemových solárních článku [6]

2.3 Polovodivé materiály

Polovodiče jsou látky, které se za určitých podmínek chovají buď jako izolanty nebo jako vodiče. Polovodiče mají méně valenčních elektronů než kovy a k jejich uvolnění je potřeba větší energie. Při teplotách okolo absolutní nuly se polovodič chová jako dokonalý izolant (valenční elektrony jsou pevně vázány v obalu), tedy proud nevede. Pokud se teplota zvýší, mohou se valenční elektrony začít uvolňovat a vést elektrický proud. Už v oblasti normálních teplot polovodič může vést proud, ale méně než elektricky vodivý materiál. Valenční elektrony si energii pro uvolnění mohou vzít i ze světelného záření (od fotonů). Uvolněné elektrony se pohybují po krystalové mřížce. Po uvolnění elektronu zůstává díra, kterou zaplní jiný uvolněný elektron (dojde k rekombinaci), a na jeho místě zůstane opět jiná volná díra. Elektrony i díry se pohybují a je jich stejné množství, což se označuje jako intrinzičná koncentrace [7].

Polovodiče můžeme dělit podle různých hledisek, např.:

Podle elektrické vodivosti

- *Vlastní polovodiče* – neobsahují příměsi, a projevuje se v nich pouze vlastní vodivost,
- *Příměsové* – které dále můžeme rozdělit na polovodiče typu N, obsahující příměs z 5. skupiny periodické tabulky, převládá u nich elektronová vodivost a polovodiče typu P, obsahující příměs ze 3. skupiny periodické tabulky, převládá u nich děrová vodivost.

Podle původu

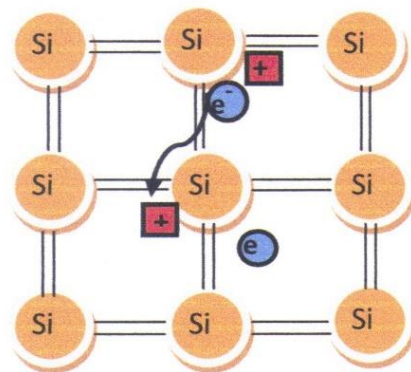
- *Organické*
- *Anorganické*

Podle struktury

- *Krystalické*
- *Amorfní* [7]

2.3.1 Vlastní vodivost

Vlastní vodivost se projevuje u všech polovodičů (vlastních i příměsových). Vlivem zvýšení teploty, nebo ozáření světlem přijmou valenční elektrony energii a přejdou z valenčního do vodivostního pásu (viz Obr. 6).



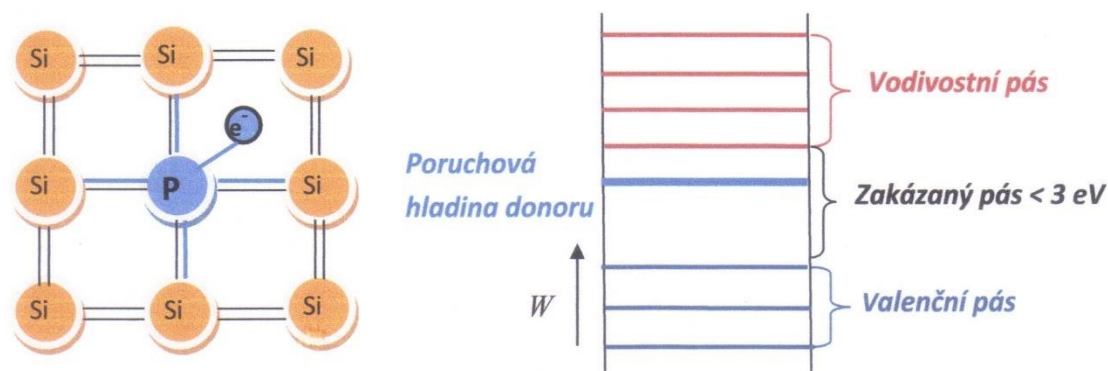
Obr. 6: Vlastní vodivost polovodiče [7]

2.3.2 Nevlastní vodivost (příměsová)

K příměsové vodivosti dochází u příměsových polovodičů, tzn. tam, kde je k základnímu polovodivému materiálu přidána cíleně určitá příměs. Příměs má vždy buď o jeden valenční elektron méně (typ P) nebo o jeden valenční elektron více (typ N) [7].

2.3.3 Elektronová vodivost – polovodič typu N

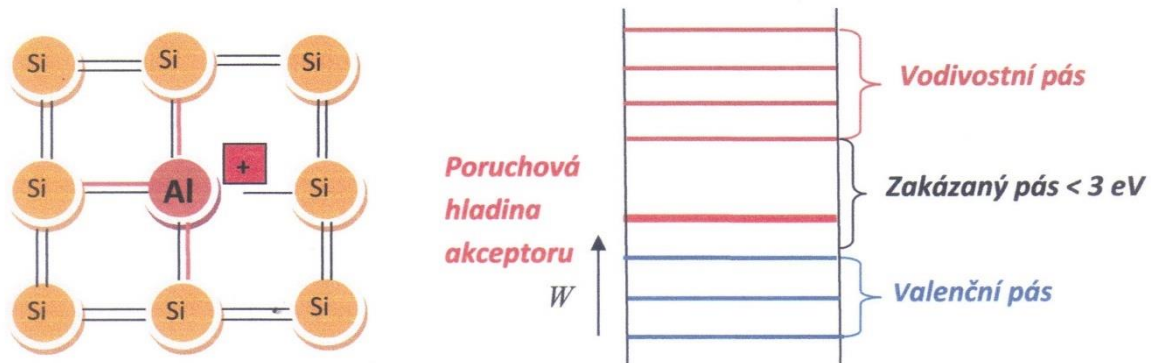
Při elektronové vodivosti typu N se do základního polovodiče přidává prvek z 5. skupiny periodické tabulky, např. arsen, fosfor, antimon, který má o jeden valenční elektron více než základní polovodič. Tento příměsový prvek se označuje jako donor. Volný elektron od příměsi se okamžitě stává vodičem elektrického proudu. V pásovém schématu se přítomnost cizího prvku (donoru) projeví vznikem poruchové hladiny donoru, která má malý odstup od vodivostního pásu, a elektrony z této hladiny snadno přejdou do vodivostního pásu. Jsou zde jednak volné elektrony a volné díry od základního polovodiče, jednak volné elektrony od příměsi. Volných elektronů je více, označují se jako většinové (majoritní) nosiče náboje. Koncentrace volných elektronů je vyšší než koncentrace volných děr, převládá elektronová vodivost. Volné díry zde představují menšinové (minoritní) nosiče náboje [7].



Obr. 7: Polovodič N – znázornění a pásový model [7]

2.3.4 Děrová vodivost – polovodič typu P

Při elektronové vodivosti typu P se do základního polovodiče ze 4. skupiny přidává prvek ze 3. skupiny periodické tabulky, např. bór nebo hliník, který má o jeden valenční elektron méně než základní polovodič. Tento příměsový prvek se označuje jako akceptor. Jedna ze čtyř vazeb základního polovodiče je tedy neobsazena, v blízkosti cizího atomu je volná díra, do ní může přejít uvolněný elektron základního polovodiče a na jeho místě se objeví nová volná díra. V pásovém schématu se přítomnost cizího prvku (akceptoru) projeví vznikem poruchové hladiny akceptoru, která má malý odstup od valenčního pásu a do níž mohou přejít valenční elektrony základního polovodiče. Pak jim již stačí menší energie pro přesun do vodivostního pásu. Jsou zde tedy jednak volné elektrony a volné díry od základního polovodiče, jednak volné díry od příměsi. Volných děr je více, označují se jako většinové nosiče náboje. Koncentrace volných děr je vyšší než koncentrace volných elektronů, převládá děrová vodivost. Volné elektrony jsou zde menšinové nosiče náboje.

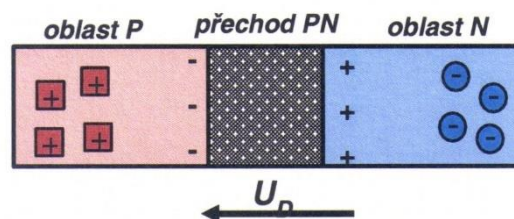


Obr. 8: Polovodič P – znázornění a pásový model [7]

Jelikož příměsově polovodiče obsahují ve výsledku více volných nosičů náboje než polovodiče vlastní, znamená to, že vodivost příměsových polovodičů je vyšší než vodivost vlastních polovodičů.

2.3.5 Přechod PN

Volné elektrony z oblasti N vlivem difuzní síly přecházejí do oblasti P, kde dojde k jejich rekombinaci. Podobně volné díry přecházejí do oblasti N. V polovodiči typu N převládají na hranici přechodu nepohyblivé kladné náboje (kationty) a v polovodiči P nepohyblivé záporné náboje (pevně vázané elektrony na místě původních děr). Mezi oběma oblastmi se vytvoří zóna, ve které téměř nejsou pohyblivé nosiče náboje. Zmíněná zóna se nazývá PN přechod nebo také vyprázdněná oblast, též hradlová vrstva. Tato oblast má vlastní elektrické pole s tzv. difuzním napětím. Velikost difuzního napětí závisí na materiálu polovodiče, na koncentraci většinových a menšinových nosičů náboje a též na teplotě.



Obr. 9: Přechod PN [7]

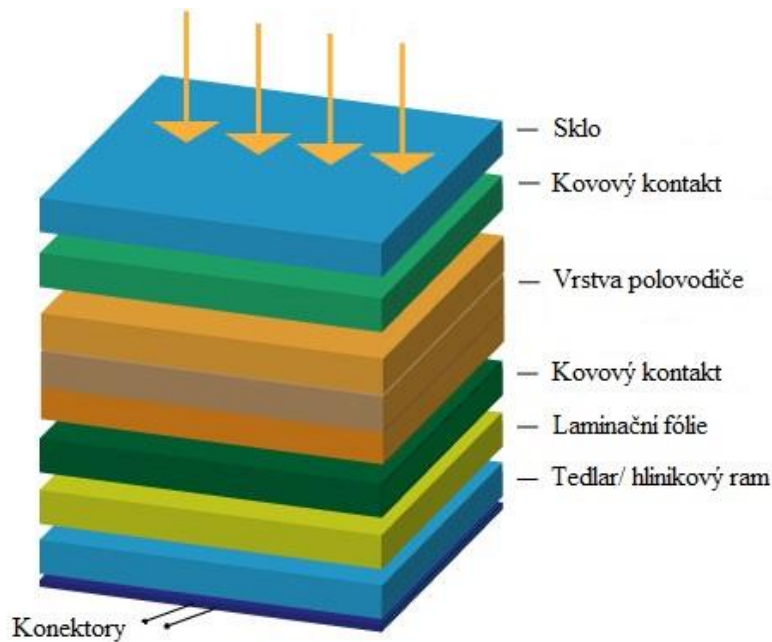
2.4 Základní struktura fotovoltaických panelů

Obecně, strukturu FV modulů lze popsat pomocí následujících nezbytných součástí (viz. Obr. 10):

1. *Ochranná vrstva* – obvykle je vyrobena z tvrzeného skla, i když u tenkovrstvých modulů to může být také průhledný plast.

2. *Absorpční materiál* – „srdce“ modulu, vrstva, ve které je světlo absorbováno a přeměňováno na elektrický proud. Všechny použité materiály jsou polovodiče. Ve většině článků se jedná o křemík. Z křemíku se vyrábí nejvíce komerčně používaných fotovoltaických panelů. Avšak za účelem zlepšení výkonu může existovat více vrstev různých materiálů. Kromě toho jsou všechny vrstvy dopovány, tzn., že každá vrstva je dále rozdělena na n-dopovanou a p-dopovanou zónu.

3. *Kovové elektrické kontakty*, propojovací krabice („junction box“).
4. *Laminátový film* – zajišťuje vodotěsnost a robustnost struktury.
5. *Rám/kryt* – zajišťuje doplňkovou ochranu a možnost připevnění celého modulu [5].



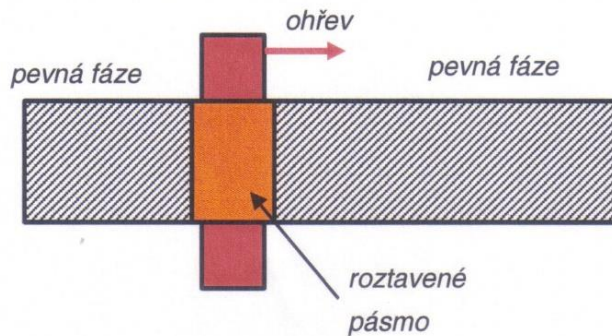
Obr. 10: Struktura FV modulu [5]

2.5 Výroba fotovoltaických panelů na bázi křemíku

Výchozím materiálem pro výrobu křemíku je křemen (oxid křemičitý). Oxid křemičitý se redukuje uhlíkem v elektrické obloukové peci, výsledným produktem je surový křemík hutní kvality.

2.5.1 Zonální tavení (polykrystalické články)

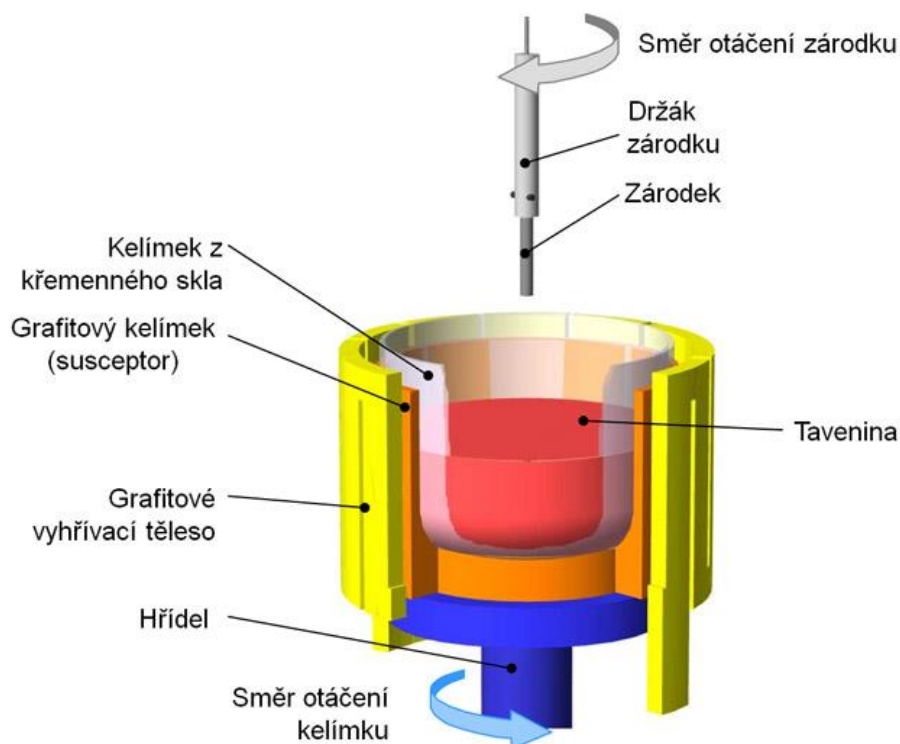
Získaný křemík o čistotě 99 % se dále čistí technikou zonálního tavení. Tato metoda patří mezi fyzikální metody čištění krystalizujících látek a je založena na různé rozpustnosti nečistot v pevné a kapalně fázi. Tyč z křemíku je několikrát vedena vyhřívanou zónou ve stejném směru. Tímto postupem dochází k difuzi nečistot do pohybujícího roztaveného pásma. V určitém bodě po několika opakovaných cyklech čištění je křemík považován za čistý, následně znečištěný konec je odstraněn mechanicky [7]. Zonální tavení je aplikovatelné pouze pro přípravu a výrobu polykrystalických solárních článků, neboť během samotné syntézy tyči z křemíku vzniká polykrystalický materiál a nepoužívají se postupy, které řídí směr a rychlost růstu krystalů.



Obr. 11: Schéma čištění různých krystalizujících materiálů pomocí zonálního tavení [7]

2.5.2 Czochralského metoda (monokrystalické články)

Nejčastěji používaným procesem pro výrobu monokrystalických polovodičových materiálů je Czochralského metoda tažení monokrystalu z taveniny. Princip metody spočívá v tom, že se do taveniny v kelímku ponoří zárodečný krystal, ten se částečně nataví, a následně se vytahuje z taveniny. Rozložení teploty v příčném průřezu krystalu musí být symetrické vzhledem k ose krystalu, čemuž napomáhá buď rotace zárodku, nebo rotace kelímku s taveninou, případně obojího. Kelímek s taveninou je umístěn v uzavřeném prostoru pece v inertní atmosféře pro zamezení oxidace taveniny. Jako zdroje tepla se používá odporový, nebo indukční ohřev. Teplota taveniny v kelímku má být udržována na předepsané hodnotě těsně nad teplotou tání daného materiálu s poměrně velkou přesností. Touto krystalizační metodou lze získat z taveniny monokrystalu křemíku velkých rozměrů (průměru 300 mm, délky až 2 m) [7].



Obr. 12: Schéma Czochralského metody výroby monokrystalického křemíku [8]

2.5.3 Výroba a úpravy polovodičových desek

Výchozí materiál pro výrobu polovodičových desek je monokrystalický případně polykrystalický křemík s příslušným typem vodivosti (P/N).

Postup úprav krystalu:

1. *Broušení krystalu na požadovaný průměr* – úprava monokrystalu na válcový tvar o předepsaném průměru se provádí broušením na bezhroté brusce.

2. *Broušení fazet na krystalu* – na každém krystalu se brousí jedna až čtyři podélné plošky neboli fazety. Tyto plošky slouží k orientačním účelům při určení pozice desky technologických zařízení (hlavní fazeta) a k identifikaci orientace a typu vodivosti desek (pomocná fazeta).

3. *Řezání krystalu na plátky* – řezání se provádí diamantovou pilou.

4. *Broušení nařezaných plátků* – povrch plátků je velmi hrubý a narušený od operace řezání, proto se plátky brousí na obou stranách. Cílem je dosažení jemnějšího povrchu, rovinnosti plátku a požadované tloušťky.

5. *Broušení okrajů desek* – okraje plátků se zaoblují broušením, aby se odstranila místa náchylná k zaštipnutí nebo odštipnutí.

6. *Čištění povrchu desek* – leptáním ve směsi kyseliny dusičné a kyseliny fluorovodíkové se odleptají nečistoty a poškození desky.

7. *Leštění Si desek* – provádí se pouze na jedné straně Si desky. Cílem je dosažení zrcadlově lesklého povrchu, bez škrábanců a jiných vad. Výsledkem je Si deska (tzv. silicon wafer).

8. *Závěrečné mytí Si desek* – cílem je odstranit zbytky organických látek, prachových částic a těžkých kovů z povrchu celé Si desky. Operace se provádí v lázních složených z:

a) peroxidu vodíku a kyseliny chlorovodíkové,

b) peroxidu vodíku a hydroxidu amonného. Zbytky těchto látek se odstraňují v demineralizované vodě [7].

2.5.4 Epitaxe

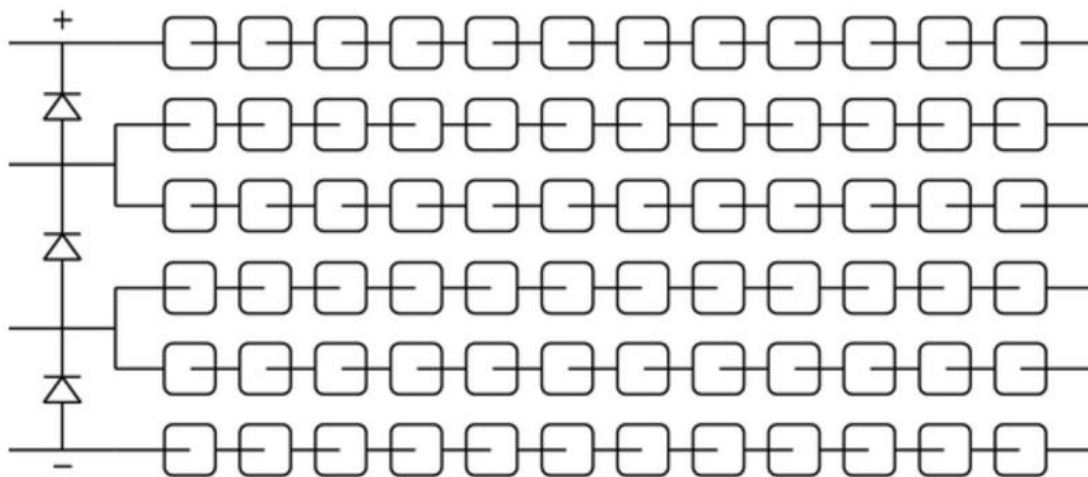
Polovodičové struktury se vytvářejí na vyleštěné straně desky pomocí speciálního technologického procesu, tzv. epitaxe. Při vytváření přechodu PN dochází k překompenzování aktivních příměsí v určité oblasti desky tím, že se do této oblasti vnesou v dostatečné koncentraci příměsí opačného typu [9].

Epitaxe může probíhat z plynné, kapalné i pevné fáze. Pro výrobu přechodu PN se používá Vapor Phase Epitaxy (VPE) – epitaxe z plynné fáze neboli plynná epitaxe. Jedná se o nanášení (depozici) monokrystalických vrstev Si na monokrystalické Si desky při teplotě 1200 °C. Epitaxní vrstvy Si se používají u všech bipolárních integrovaných obvodů. Na Si deskách se vytvářejí různé struktury integrovaných obvodů, tj. polovodičové prvky (tranzistory, diody) i pasivní prvky (rezistory, kondenzátory). Tloušťka epitaxních vrstev křemíku bývá v rozmezí 5–15 μm, měrný elektrický odpor 1–5 Ω.cm. Jako dopant se používá fosfan PH₃, arsin AsH₃, nebo diboran B₂H₆. Kapalná epitaxe se používá např. u polovodičových sloučenin GaAs, GaP hlavně pro přípravu LED diod [7].

Novějším způsobem dopace křemíku je použití malého urychlovače částic k vystřelení iontů. Řízením rychlosti iontů je možné kontrolovat jejich průnikovou hloubku. Tento nový proces však komerční výrobci obecně nepřijali [10].

2.5.5 Umístění elektrických kontaktů

Elektrické kontakty propojují každý solární článek s propojovací krabicí. Články jsou zapouzdřeny v etylenvinylacetátu a umístěny do kovového rámu, který má spodní vrstvu Tedlaru (komerční název kompozitního polymerního materiálu společností DuPont na bázi polyvinylfluoridu) a skleněný kryt.



Obr. 13: Schematický diagram FV obvodu [11]

Zároveň za účelem ochrany jednotlivých článků před tepelným poškozením a proti celkovému poklesu výkonu jsou do solárních panelů integrovány bypassové (překlenovací) diody. Tyto diody mají za účel odpojovat články v momentu jejich zastínění. Pro dokonalou ochranu panelu a článků musí se bypassové diody integrovat pro každý článek zvlášť. Nicméně, z ekonomických důvodů bypassové diody se nezapojují za každým článkem, schematický diagram komerčně dostupných FV obvodu je znázorněn na Obr. 13.

2.5.6 Antireflexní povlak

Jelikož čistý křemík je lesklý, může odrážet až 35 % slunečního světla. Pro zamezení ztrát slunečního záření je na křemíkový článek nanesen antireflexní povlak. Nejčastěji se používají povlaky na bázi oxidu titaničitého a oxidu křemičitého. Existuje několik metod nanášení antireflexních povlaků. Materiál použitý k povlakování se zahřívá, dokud se molekuly kondenzací nepřejdou na povrch polovodiče. Jiný způsob spočívá v rozprašování za použití vysokého napětí. Dalším způsobem je chemická reakce v plynné fázi za vzniku oxidu křemičitého nebo nitridu křemíku na povrchu polovodiče [5].

2.5.7 Kontrola kvality

Kontrola kvality je naprosto nezbytná při výrobě solárních článků/panelu, jelikož nesrovnalosti v mnoha procesech a faktorech mohou nepříznivě ovlivnit celkovou očekávanou účinnost. Samotný křemík je testován na čistotu, orientaci krystalu a odpor. Výrobci také testují přítomnost kyslíku (který ovlivňuje odolnost vůči deformaci) a uhlíku (který způsobuje vady v krystalech). Hotové články jsou také kontrolovány, zda neobsahují interní strukturní vady, ke kterým by mohlo dojít během řezání, leštění a leptání.

Během celého procesu výroby je průběžně monitorována teplota, tlak, rychlost a množství použitých dopantů. Rovněž jsou přijata opatření k zajištění toho, aby koncentrace nečistot

ve vzduchu a na pracovních plochách byla udržována na minimu. Poté, články prochází elektrickými zkouškami, aby se zajistilo, že proud, napětí a odpor splňují příslušné normy.

Důležitým testem solárních modulů je vystavení zkušebních článků venkovním podmínkám. Panely se testují v širokém rozsahu teplot a mechanickým namáháním, jakožto vibrace, kroucení a krupobití [5].

2.5.8 Amorfni články

Amorfni články jsou v porovnání s monokrystalickými a polykrystalickými články levnější, výroba je méně materiálově a energeticky náročná. Nicméně, nevýhodou těchto článků je 2 až 3krát nižší účinnost. Amorfni články se vyrábějí pomocí tenkovrstvé technologie, nanášením polovodičů na destičku zhotovené ze skla, plastu nebo nerez, ve vakuové atmosféře při zvýšené teplotě. Zároveň vrstva naneseného polovodiče nepřesahuje tloušťku 0,001 mm. V praxi konstrukci článků tvoří jedna nebo více vrstev z amorfniho křemíku s příměsí dalších prvků, které zajišťují PN vodivost a zvyšují fotocitlivost. Celý článek je zapouzdřen polymerním ochranným materiálem, obvykle na bázi etylvinylacetátu (EVA).

Ve srovnání s články na bázi krystalického křemíku se jedná o nepravidelnou (amorfní) strukturu. Některé z atomů křemíku nemají vedle sebe atomy, se kterými by mohly vytvořit vazbu. V těchto místech může docházet k rekombinaci nábojů. Tyto elektrony (díry) se dále nezúčastní vedení proudu, což má za následek snížení účinnosti těchto článků. Díky malé tloušťce a značné ohebnosti je možné takto vyrobený fotovoltaický článek aplikovat na různé materiály, výsledné FV panely pak lze snadněji instalovat na střechy s nižší hodnotou maximální nosnosti.

2.6 Tenkovrstvé články CIS, CdTe, CIGS

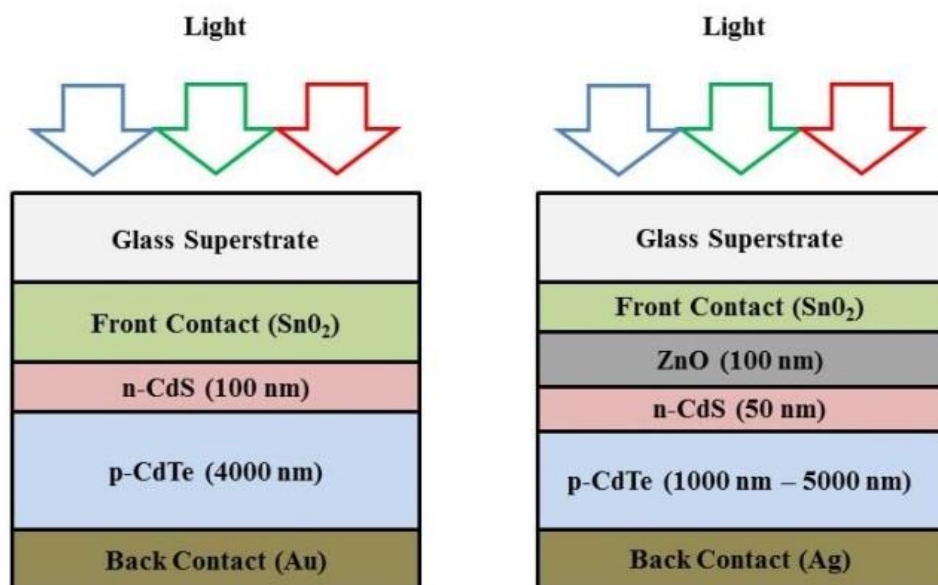
CIS je komerční zkratka pro prvky měď (C), indium (I) a selen (S), což jsou materiály, na nichž je založena technologie fotovoltaických modulu. V současné době tato technologie je považována za nejnovatější s možností implementace sériové výroby. Zároveň nabízí výhody jakožto vysoká účinnost, cena a vyšší energetický výnos ve srovnání s konvenčními krystalickými křemíkovými moduly. Na trhu jsou už články typu CIS běžně dostupné. Používá se i varianta obsahující navíc galium (CIGS).

Další typ komerčně dostupných FV článků jsou moduly na bázi telluridu kadmenného (CdTe). Zmíněný materiál má takovou vzdálenost valenčního a vodivostního pásu (1,14 eV), která zajišťuje optimální spektrální citlivost a zároveň i vysokou účinnost přeměny solární energie na elektrickou.

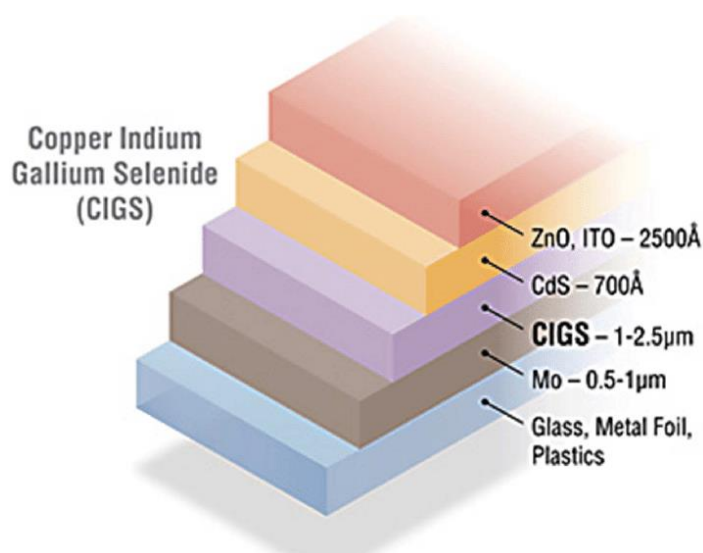
Pro výrobu FV článku typu CIS, CIGS, CdTe se používají různé postupy, mezi nejdůležitější a často používané metody patří chemická depozice z plynné fáze (CVD) v kombinaci s naprašováním.

Prvním krokem výše uvedené metody je naprašování na substrát (obvykle sklo) vrstvy molybdenu, případně jiného kovu. Dalším krokem je vytváření vrstev z mědi (Cu), india (In), gallia (Ga) a selenu (Se) naprašováním ve vodíkové atmosféře při teplotách vyšších než 400 °C. Poté se vytváří další vrstva sulfidu kadmenného (CdS) případně oxidu zinečnatého (ZnO) dopovaného hliníkem pomocí CVD. V posledním kroku se přidávají elektrické kontakty z niklu nebo stříbra [12].

Některé struktury tenkovrstvých článků jsou znázorněny na Obr. 14 a Obr. 15.



Obr. 14: Struktura tenkovrstvých solárních panelů na bázi CdTe, CdS, ZnO [12]



Obr. 15: Struktura tenkovrstvých solárních panelů na bázi CIGS, CdS, ZnO [13]

2.7 Generace FV článků

Solární panely jsou obvykle rozděleny do třech hlavních kategorií, tzv. generace. Každá generace představuje odlišné typy a použité výrobní technologie. Základní parametry, které charakterizují každou generaci, je cena, účinnost a životnost.

2.7.1 První generace

První generace solárních článků je charakterizovaná vysokou cenou, která je primárně spojená s vysokými náklady na výrobu a poměrně velkým množstvím vstupních materiálů (polovodičů). Tyto články mají dlouhodobou časovou stabilitu a účinnost, která se pohybuje v rozmezí 14–21 %. Do první generace patří FV moduly na bázi polykrystalického a monokrystalického křemíku. Komerčně se začaly prodávat v sedmdesátých letech. První generace solárních panelů pořád zůstává dominantní na trhu.

2.7.2 Druhá generace

Druhá generace má nižší pořizovací cenu (EUR/Watt), ale zároveň i nižší účinností oproti první generaci. Články druhé generace vznikly kvůli snaze o snížení množství potřebných vstupních materiálů (polovodičů) pro výrobu fotovoltaických článků a zároveň snížení energetické náročnosti procesu výroby. Mezi solární panely druhé generace patří články vyrobené na bázi amorfního křemíku a tenkovrstvé technologie.

Nevýhodu představuje jejich menší výkonová stabilita a strmější časový pokles účinnosti při porovnání s články první generace. Další podstatnou nevýhodou solárních článků druhé generace je použití toxických kovů pro jejich výrobu.

2.7.3 Třetí generace

Do třetí generace se řadí tzv. tandemové články, které jsou postavené na větším množství mezivrstev s odlišnou spektrální citlivostí. Dokáží konvertovat širší pásmo slunečního spektra do elektrické energie. Výhodou takových článků je vysoká účinnost, která dosahuje hodnoty až 46 %, nevýhodou je zatím vysoká pořizovací cena a náročná škálovatelnost.

Hlavním globálním cílem charakterizujícím vývoj solárních panelů je snížení hodnoty energetické návratnosti (EPBT – Energy PayBack Time), což představuje dobu, za kterou systém vrátí energii investovanou do jeho výroby na začátku životního cyklu, včetně těžby a zpracování surovin. Další cíl je zvýšení parametru energetické výnosnosti, (EROEI – Energy Return on Energy Invested), což je poměr získané energie k energii vložené.

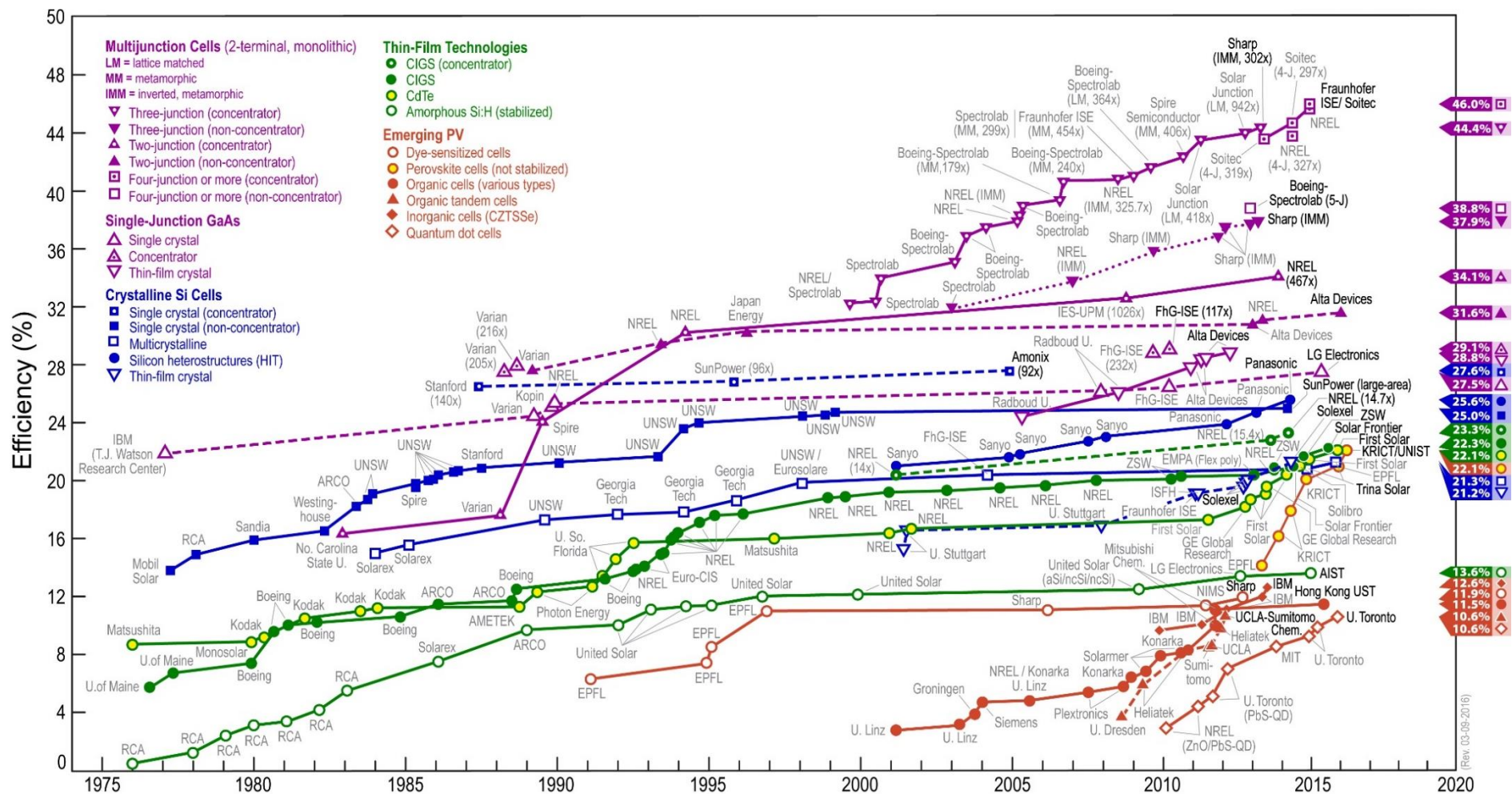
2.8 Historie vývoje fotovoltaických panelů

Historie fotovoltaiky začíná objevením fotoelektrického jevu. Poznatek, že proud mezi kovovými elektrodami ponořenými do roztoku se mění v závislosti na intenzitě osvětlení, prezentoval francouzské Akademii věd na jejím zasedání v roce 1839 Alexandre Edmond Becquerel [14].

Fyzikální princip fotoelektrického jevu teoreticky popsal Albert Einstein v roce 1905 za předpokladu, že na elektromagnetické pole aplikoval kvantovou teorii, kterou Max Karl Ernst Ludwig Planck publikoval na přelomu století. Právě za práce pro rozvoj teoretické fyziky, zejména objev zákonitostí fotoelektrického jevu obdržel Einstein v roce 1921 Nobelovu cenu za fyziku. Všechny uvedené experimenty a teorie se vztahují k fotoelektrickému jevu vnějšmu neboli k fotoemisi, kdy se elektrony z vodivostního pásu z ozařovaného kovu uvolňují do okolí (vakua, plynu, nebo elektrolytu) [14].

První fotovoltaický článek, který byl použitelný pro výrobu elektřiny, byl vyroben v roce 1954 v Bellových laboratořích. Jednalo se o článek z monokrystalického křemíku, který měl účinnost kolem 6 %. Jako zdroj elektřiny se začaly fotovoltaické články používat již od roku 1958 na kosmických družicích, kde je fotovoltaika k napájení spotřebičů používána dodnes [14].

Vedle původních článků z monokrystalického křemíku byla v průběhu let vyvinuta celá řada nových typů fotovoltaických článků, a to jak krystalických, tak tenkovrstvých. Křemík je však stále ve fotovoltaice dominantní materiál. Ceny prvních fotovoltaických článků se v 50. letech pohybovaly v tisících dolarů za watt jmenovitého výkonu a spotřeba energie na jejich výrobu přesahovala množství elektřiny, které tyto články vyrobily za celou dobu své životnosti [14].



Obr. 16: Graf vývoje různých technologií fotovoltaických panelů v čase a jejich příslušná účinnost [15]

Na Obr. 16 jsou zobrazené účinnosti vyvinutých FV panelů za posledních zhruba 50 let. V Tab. 4 jsou uvedeny nejčastěji používané technologie FV panelů včetně tržního podílu.

Tab. 4: Technologie FV panelů a příslušný procentuální tržní podíl [14]

Technologie FV panelů	Procentuální tržní podíl		
	2014	2020	2030
Tenkvrstvá technologie (CdTe)	5	6	5,1
Tenkvrstvá technologie (CIGS)	2	3	6
Na bázi křemíků	92	70	44,8
Jiné (CPV, organické, hybridní)	1	21	44,1

Nejen v celém světě, ale i v České republice došlo k implementaci systému státní podpory a zavedení příslušné legislativy pro výstavbu FV elektráren, kontrolu distribuce a prodeje elektřiny generované ze solární energie a striktní pravidla týkající se likvidace a nakládání s odpady. Největší skok výstavby solárních elektráren byl evidován v roce 2008, kdy se stát rozhodl garantovat výkupní cenu elektřiny, zároveň vzniklo mnoha dotačních programů finančně podporujících projekty spojené s výrobou elektřiny z obnovitelných zdrojů energie. V Tab. 5 jsou uvedeny aktuální údaje ohledně největších elektráren světa včetně lokace a výkonu.

Tab. 5: Přehled největších elektráren světa

Název elektrárny	Lokace	Výkon [MW]
Bhadla Solar Park	Indie	2245
Pavagada Solar Park	Indie	2050
Tengger Desert Solar Park	Čína	1547
Benban Solar Park	Egypt	1500
Noor Abu Dhabi	Spojené arabské emiráty	1177
Kurnool Ultra Mega Solar Park	Indie	1000
Datong Solar Power Top Runner Base	Čína	1000
Longyangxia Dam Solar Park	Čína	850
Villanueva Solar Park	Mexiko	828
Rewa Ultra Mega Solar	Indie	750

V Tab. 6 je aktuální přehled největších solárních elektráren v ČR včetně jejich výkonu.

Tab. 6: Přehled největších elektráren v ČR [16]

Název elektrárny	Výkon [MW]
FVE Ralsko	55,762
FVE CZECH VEPŘEK	35,103
FVE Ševětín	29,902
FVE Mimoň Ra 3	17,494
FVE Vranovská Ves	16,033
Solar Stříbro s.r.o.	13,608
FVE ŽV – SUN, s.r.o.	12,976

2.9 Recyklace

V nejbližších 10 až 20 letech lze očekávat, že množství panelů vyřazených z provozu bude nízké. Kvalitní panely instalované v letech 2009 až 2011, kdy došlo k poskytování podpory a dotaci od státu, budou vyřazovány z provozu ve větších objemech pravděpodobně až po roce 2035. V době roků 2010 ve snaze dokončit projekty tykající se instalace a implementace velkých FV elektráren, investoři byli ochotni koupit i panely nízké kvality, tedy levnější řešení. Proto panely nižší kvality budou vyřazovány dříve, jejich množství je však obtížné odhadnout.

Za ekonomicky rentabilní je považována kapacita recyklační linky kolem 20000 tun panelů ročně. Samotný proces recyklace začíná již při demontáži solárních panelů, následně jsou panely přemístěny na sběrné místo, kde se provádí finální proces likvidace/recyklace. Pro recyklaci panelů se aktuálně používá několik metod, které jsou již aplikované průmyslově. Některé jsou univerzální, jiné jsou vhodné jen pro určité typy panelů [17].

2.9.1 Termicko-chemická metoda

V současnosti v rámci EU, nejpokročilejší metodu recyklace panelů navrhla a odzkoušela firma Deutsche solar AG. Panely jsou termicky zpracované v speciální pece, kde jsou zahřívány na teplotu nad 500 °C. Přičemž dochází k odpařování a termickému rozkladu plastových materiálů (nejčastěji se jedná o Tedlar a spojovací polymer EVA), v další komoře dochází k řízenému spalování při vyšší teplotě zbytkových sloučenin, které vznikly při rozkladu polymerního materiálu. Ostatní materiály a složky solárních panelů jsou separované manuálně.

V případě, že panely jsou nepoškozené, lze odstranit samotné FV články a použitím speciálního chemického postupu odstranit antireflexní povlak a získat křemíkový disk (tzv. silicon wafer). Vzniklé křemíkové disky lze využít jako surovinu pro výrobu solárního článku. Využitím těchto recyklačních postupů, lze snížit až o 70 % energetické náklady pro výrobu solárních panelů. Metoda je aplikovatelná pro všechny stávající konstrukce panelů vyrobené na bázi křemíkových mono a polykrystalických článků [17].

2.9.2 Mechanicko-chemická metoda

Zatímco předchozí metoda reprezentovala optimální variantu pro recyklaci komerčně dostupných křemíkových panelů, mechanicko-chemická metoda je výhodná pro FV panely vyrobené na bázi tenkovrstvé technologie. V současnosti je trend snižovat množství materiálů a tím i tloušťku článku pro jejich výrobu.

Na začátku, stejně jako v předcházející metodě, dochází k manuální demontáži hliníkového rámu. Následuje drcení a třídění velikostních frakcí. K oddělení jednotlivých materiálů slouží separační metody – fluidní a mokré splavy a elektrodynamická separace. Vzácné kovy jako je stříbro, lze získat použitím různých chemicky a pyrometalurgicky separačních a exaračních postupů. Získané kovy mohou být znovu použité jako surovina. Ve srovnání s termickou recyklací je u této metody nižší podíl manuální práce. Výsledkem jsou však pouze drcené suroviny, proto efektivita této metody je primárně založená na použitých separačních metodách. Primárním cílem této metody je získání a recyklace polovodičových materiálů a toxických kovů, které se používají při výrobě panelu na bázi tenkovrstvých technologií [17].

2.9.3 Recyklovatelné materiály a jejich výtěžnost

Největší podíl na hmotnosti u panelů na bázi polykrystalického a monokrystalického křemíku připadá na sklo (60–70 %) a hliníkový rám (kolem 20 %). U tenkovrstvých panelů je podíl skla a hliníku přes 95 %. Jak sklo, tak i hliníkový rám je běžně recyklovatelný téměř se 100 % výtěžností, nicméně největší technologický problém je separace skla od ostatních materiálů a dílu panelů. Plasty jsou téměř nerecyklovatelné a podléhají termickému rozkladu a spalování.

Hliník – primární produkce surového hliníku je energeticky náročná, spotřebuje se přes 200 MJ/kg a představuje asi 8 % spotřeby energie na výrobu solárního panelu. Nicméně hliník lze snadno recyklovat s velmi nízkou spotřebou energií.

Sklo – základní konstrukční díl všech typů fotovoltaických panelů (pouze v některých případech jsou používány plastové díly). Recyklace skla může snížit spotřebu energie na jeho výrobu asi o 40 %, nicméně je potřeba odstranit jakékoliv znečišťující kovy před recyklací, které mohou způsobit zabarvení skla. Recyklace však významně snižuje nároky na těžbu surovin. Výhodou skla je, že ve většině případů lze materiál recyklovat na původní výrobek, aniž by docházelo k únavě recyklovaného materiálu.

Plastové komponenty – vlivem klimatických podmínek obvykle degradují, zároveň jsou téměř nerecyklovatelné, neboť se používají jako spojovací materiál. Obvykle se používají kompozitní plastové materiály, které jsou sami o sobě velice náročné z hlediska recyklovatelnosti. Jediná možnost je spalování plastových komponent, případně využití spalného tepla.

Fotovoltaické články – u klasických článků na bázi křemíku podíl hmotností článků na hmotnosti panelů pohybuje v rámci jednotek procent, zároveň se optimalizací stávajících technologií významně snižuje tato hodnota. Nicméně z hlediska celkového energetického nákladu na výrobu solárního panelu křemíkové články mají až 80% podíl na výrobu panelů a zhruba 50 % z finální ceny výrobku. V případě tenkovrstvých článků podíl funkčních vrstev na hmotnosti panelů i na výrobních nákladech je ještě o jeden až dva řády nižší. I v tom případě se však jedná o cenné polovodičové materiály, jejichž zpětné získávání je obvykle výhodnější než těžba ze surovin. Zároveň je tady důležitá recyklace z ekologického hlediska, neboť používají se jiné toxické sloučeniny, které musí být odstraněny z nefunkčních panelů [17].

2.10 Legislativní úprava

Fotovoltaické panely a jejich dopad na životní prostředí aktuálně představuje důležitý problém, jelikož množství vyrobených panelů exponenciálně roste každý rok, a je velice důležité stanovit možné důsledky a včas zavést potřebné opatření.

2.10.1 Směrnice o elektrickém a elektronickém odpadu 2012/19/EC

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/19/EC ze dne 4. července 2012 (WEEE) o odpadních elektrických a elektronických zařízeních vstoupila v platnost 13. srpna 2012. Členské státy Evropské unie měli povinnost výše uvedenou směrnici zpracovat a implementovat do své legislativy do 14. února roku 2014. Nově jsou ve směrnici zahrnuty i fotovoltaické panely do kategorie „4. Spotřební elektronika a fotovoltaické panely“.

Bylo stanoveno, že účelem této směrnice je přispívat k udržitelné výrobě a spotřebě především předcházením vzniku OEEZ a dále jejich opětovným použitím, recyklací a dalšími formami jejich využívání ve snaze snížit množství odpadu určeného k odstranění a podílet se na účinném využívání zdrojů a opětovném získávání hodnotných druhotných surovin. Vyžaduje také zlepšení účinnosti ochrany životního prostředí všemi subjekty zapojenými do životního cyklu EEZ, tj. výrobci, distributoři a spotřebiteli, a zejména subjekty přímo zapojenými do sběru a zpracování OEEZ.

2.10.2 Legislativní úprava České republiky

Výroba energií ze solárního záření je v ČR legislativně upravena prostřednictvím několika zákonů a vyhlášek.

Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, nově zavádí do zákona o odpadech ustanovení týkající se likvidace fotovoltaických panelů. Novelizace zákona o odpadech zavádí některé nové definice:

Fotovoltaický článek – článek tvořený polovodičovými nebo organickými prvky, které mění energii slunečního záření v energii elektrickou.

Solární panel – elektrozařízení tvořené fotovoltaickými články a určené k přímé výrobě elektřiny ze slunečního záření.

Solární elektrárna – výrobní elektřiny využívající solární panely

Provozovatel solární elektrárny – držitel licence na výrobu elektřiny podle zvláštního právního předpisu ve výrobě elektřiny, která vyrábí elektřinu ze slunečního záření.

Nově je dle zákona o podporovaných zdrojích rovněž určeno, že zpětný odběr odpadů elektronických a elektrotechnických zařízení a oddělený sběr elektroodpadů z fotovoltaických panelů, které jsou součástí výroby elektrické energie s celkově instalovaným výkonem do 30 kW, musí být zajištěn prostřednictvím sítě míst zpětného odběru a odděleného sběru o dostatečné četnosti a dostupnosti.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

S obrovským růstem a vývojem oblasti sluneční energetiky vznikající odpad z tohoto průmyslu stane se s časem problematickým. Zatímco současný výzkum solárních panelů se zaměřil na zvýšení účinností a snížení energetických a materiálových nákladů, recyklace na konci životnosti zůstává nevyřešeným problémem.

Konec životností solárních panelů (EOL) se zřídka řeší výrobcem, protože aktuálně na trhu je nedostatek vyhrazených zařízení pro recyklaci. Nicméně, recyklace solárních panelů může účinně šetřit přírodní zdroje a v určitých případech snižovat výrobní náklady nových panelů.

V současné době z technického hlediska výzkum možností recyklace solárních panelů čelí mnoha problémům a je potřeba dále rozvíjet ekonomicky proveditelné a šetrné pro životní prostředí postupy a technologie.

Intenzivně probíhá výzkum recyklace solárních panelů zejména v Evropě, Japonsku a Spojených Státech. Většina studií zaměřených na recyklaci solárních panelů se soustředila na recyklaci vzácných kovových prvků a čistého křemíku.

Doi a kol. studoval možnost regeneraci křemíkových solárních panelů využitím organického rozpouštědla. Byly zkoumány několik organických rozpouštědel pro odstranění filmu EVA. Ponořením solárního panelu do rozpouštědla trichloretylen při teplotě 80 °C po dobu deseti dnů byly jednotlivé křemíkové články úspěšně regenerovány bez poškození [18].

Dong a kol. se zaměřili na stanovení optimálních postupů separace jednotlivých složek na základě rozdílných fyzikálních a chemických vlastností komponent solárních panelů. Bylo identifikováno, že použití tepelného rozkladu jako první krok pro odstranění spojovacího polymerního materiálu je optimální řešení. Další postup zpracování lze rozdělit do tří kroků. První etapa je odstranění elektrod zádňní strany panelů roztokem hydroxidu sodného. Následující etapa spočívala v rozpouštění stříbrné elektrodové mřížky pomocí roztoku dusičnanu sodného. Nakonec působením roztoku kyseliny fluorovodíkové docházelo k odstranění antireflexního povlaku křemíkových článků [19].

Kim a kol. zkoumali tandemové působení ultrazvukem a organickým rozpouštědlem pro zlepšení rychlosti rozpouštění etylvinylacetátu použitím následujících roztoků: trichloretylenu, o-dichlorbenzenu, benzenu, toluenu a dalších organických rozpouštědel. Studovaly se účinky koncentrace různých rozpouštědel, teplot, intenzity ultrazvuku, doby působení atd. Výsledky prokázaly, že při hodnotě výkonu 450 W ultrazvukového zdroje a teplotě 70 °C došlo k rozpouštění filmu EVA ve 3 M roztoku toluenu po jedné hodině. Tato metoda významně zkracuje dobu rozpouštění filmu EVA v organických rozpouštědlech, ale zároveň způsobuje problémy s organickým kapalným odpadem [20].

Klugmann-Radziemska a kol. prozkoumali proveditelnost recyklace solárních panelů tepelným zpracováním a využitím chemických metod. Autoři dokázali tepelným zpracováním rozdělit panely na sklo, hliníkové rámy a zadní desky. Poté použitím chemické metody byly odstraněny kovové elektrody a antireflexní povlaku z povrch jednotlivých křemíkových desek [21].

Tepelné zpracování a využití organických rozpouštědel se často aplikují za účelem oddělení jednotlivých komponent solárních panelů. V rámci procesu recyklace solárních panelů, nejcennější surovinu, kterou lze získat, představují obnovené křemíkové desky, jelikož můžou být znovu použité pro výrobu nových solárních panelů.

Současný výzkum by se však měl zaměřit ne jenom na fyzikální a chemické postupy recyklace solárních panelů, ale také na budování komplexního principu, pomocí kterého lze postavit uzavřenou infrastrukturu. Předpokládané komplexní řešení by mělo umožnit sběr solárních panelů na konci jejich životnosti, získání recyklovaných surovin a jejich následující využití pro výrobu nových solárních panelů a optimalizace nákladu na logistiku.

Recyklace odpadních solárních panelů představuje problém pro životní prostředí zejména z důvodu uvolňování organických rozpouštědel během procesu recyklace případně uvolňování jiných organických sloučenin nedokonalým spalováním spojovacích polymerních materiálů. Právě proto je potřeba využívat řadu zařízení pro recyklaci použitého organického rozpouštědla (čištění, destilace, kondenzace, odvodňování).

Existuje naléhavá potřeba vyvinout a implementovat přesné zásady a předpisy na podporu recyklace a bezpečné likvidace odpadů pocházející z průmyslu solární energetiky. Zároveň by se mělo přijmout opatření, která donutí firmy vyrábějící solární panely, kontrolovat a zveřejňovat informace o dopadu jejich aktivity na životní prostředí, posílí dohled médií, veřejných a nevládních organizací pro dosažení rovnováhy mezi zúčastněnými stranami a rozšíření odpovědnosti výrobců a distributorů.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Přístroje a pomůcky

Platforma Arduino nano

Rezistory: 50 k Ω , 100 k Ω

Digitální Servomotor SG92R

Drátový potenciometr WX903–1,470R, 12,5 W, 5 %

3D tiskárna Creality ENDER 3 PRO

Proudový senzor ACS712, 5 A, analogový výstup

Metalizovaný rezistor RM 100 k Ω 0207, 0,6 W, 1 %

Metalizovaný rezistor RM 10 k Ω 0207, 0,6 W, 1 %

Polykrystalický solární panel WS-5

4.2 Software

Fusion 360 – Autodesk

Arduino IDE

Circuit Design App for Makers

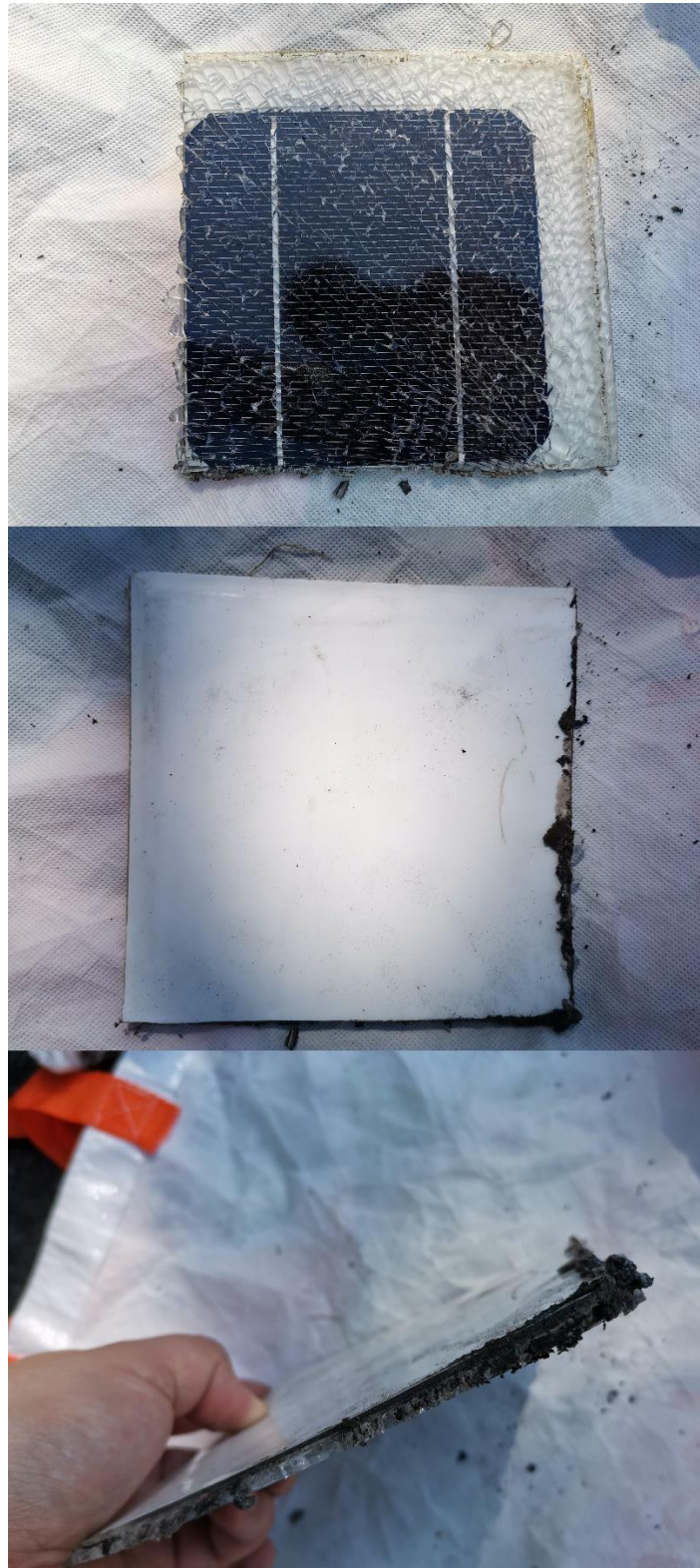
4.3 Separace jednotlivých segmentů použitých fotovoltaických článků

V rámci diplomové práce byla vyzkoušená separace jednotlivých složek FV panelu termickým rozložením. Poškozené solární panely na bázi monokrystalického křemíku byly rozřezané pomocí úhlové brusky na segmenty velikosti solárních článků. Vzhledem k tomu že pro výrobu solárních panelů se používá tvrzené sklo, nebylo možné rozdělit solární panel na jednotlivé segmenty, aniž by nedošlo k prasknutí skla. Na Obr. 17 je zobrazen segment solárního panelu který byl rozřezaný uhlovou bruskou.

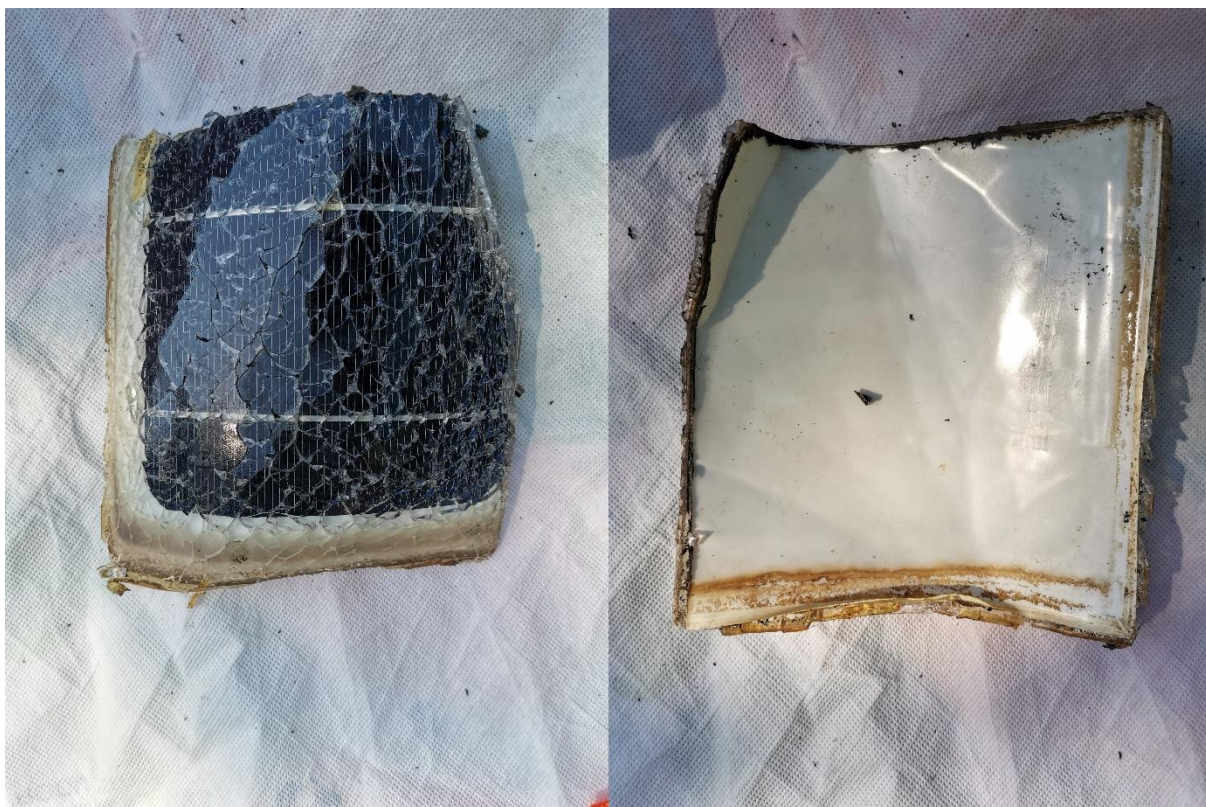
Následně připravené segmenty byly umístěné do peci a zahřívány na teplotu 250 °C po dobu dvou hodin dále bylo vyzkoušeno zahřívání segmentů na teplotu 500 °C během dvou hodin. Vzhled solárního segmentu po termickém zpracování při teplotě 250 °C je znázorněn na Obr. 17. Po termickém nízkoteplotním zpracování došlo pouze ke změkčení spojovacího materiálu, nebylo možné mechanicky separovat jednotlivé složky solárního panelu.

Při vysokoteplotním zpracování segmentu solárního článku došlo pouze k částečnému rozkladu polymerního materiálu, zejména spodního krytu solárního panelu vyrobeného z materiálu Tedlar. Dále nebylo možné využít jiné chemické metody pro separaci, neboť nedošlo k účinnému rozložení spojovacího polymerního materiálu. Pro separaci je vhodněji používat pec s cirkulací vzduchu, při tom teplota peci má být těsně pod teplotou změknutí skla. Prvním krokem po účinném termickém zpracování může být čištění vodou a třepání, zejména pro odstranění sáze. Následně je možné použít fyzikální a chemické separační metody pro získání kovů, polovodičů a skla.

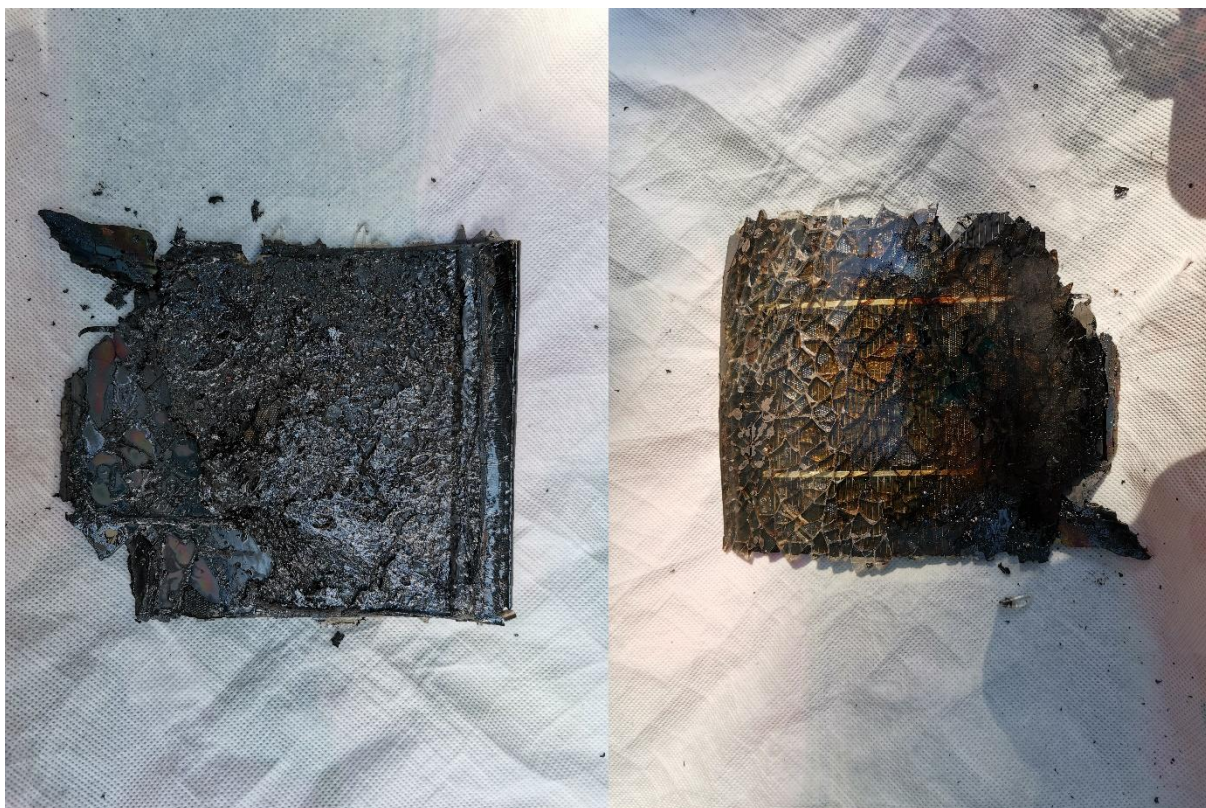
Z důvodu omezeného provozu fakulty bylo řešeno se dále v rámci diplomové práci soustředit na možnosti recyklace solárních panelů prostřednictvím reutilizace, charakterizaci postupů a technických řešení pro rychlé a jednoduché stanovení účinnosti a funkčnosti solárních panelů v terénních podmínkách.



Obr. 17: Segment solárního panelu rozřezaný uhlovou bruskou



Obr. 18: Segment solárního panelu po termickém zpracování (250 °C)



Obr. 19: Segment solárního panelu po termickém zpracování (500 °C)

4.4 Reutilizace solárních panelů

V rámci diplomové práce byly analyzovány komerční vzorky solárních panelů vyrobené na bázi monokrystalického a polykrystalického křemíků.

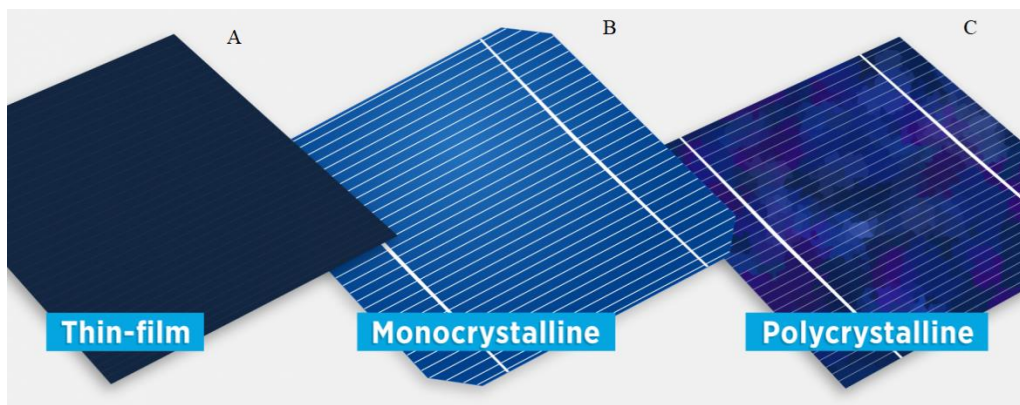
První etapou bylo seznámení s typy solárních panelů, které podléhají recyklaci a nejčastěji se používají na trhu, a stanovení jednoduchého postupu pro jejich třídění, charakterizaci a identifikaci. V Tab. 7 jsou uvedené základní otázky které napovídají jakou technologickou recyklační třídu je potřeba vybrat pro určitý typ panelu.

Tab. 7: Postup výběru recyklační technologie

Je solární panel poškozený nebo má vizuální vady?	
Solární panel nemá vizuální vady	Solární panel má vizuální vady
Diody panelů jsou funkční?	
Ano	Ne
Do které technologické třídy patří vybraný solární panel?	
Monokrystalický/polykrystalický křemíkový	Tenká vrstva

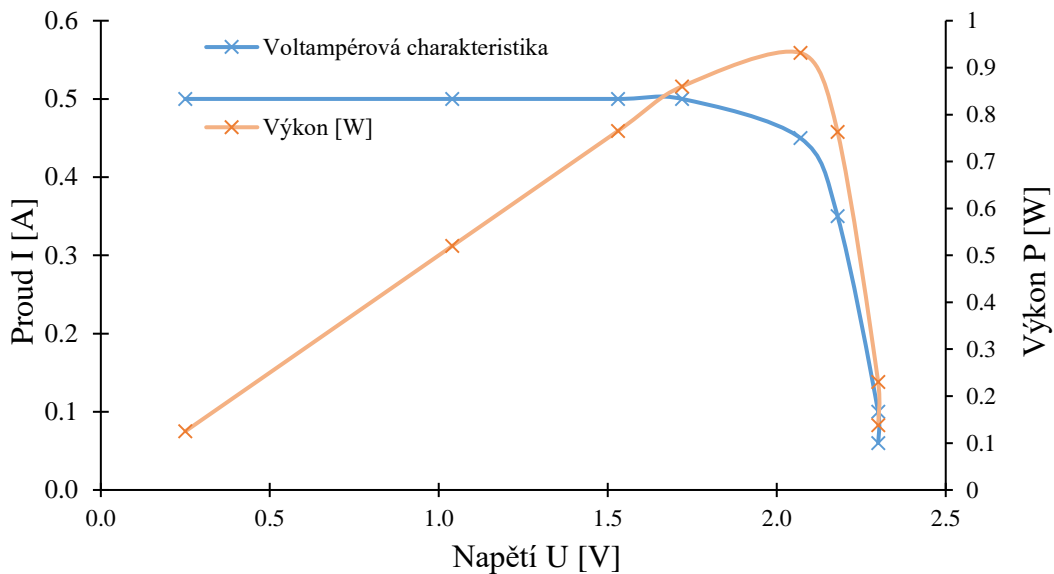
Na základě výše uvedeného postupu lze odhalit tři různé metody recyklace solárních panelů. Do první třídy patří nerozbité solární panely, u kterých by se dalo posoudit o možnosti opětovaného použití. Panely, které nejsou poškozené, tedy nemají žádné vady jako například prasklé čelní sklo, poškozený hliníkový rám nebo propojovací skříňku, je potřeba zkontrolovat, zda propojovací skříňka není vyplněna polymerním materiálem, tedy zda diody přítomné ve skřínce jsou volně dostupné a můžou být zkontrolovány, případně vyměněné. Kontrola funkčnosti diod je velice důležitý proces z hlediska opětovaného použití.

Další třída představuje rozbité solární panely vyrobené na bázi monokrystalického a polykrystalického křemíku. Do poslední třetí třídy patří solární panely vyrobené na bázi tenkovrstevných technologií. V případě posledních dvou kategorií se jedná o nefunkční solární panely, které následně podléhají materialové recyklaci. Je nesmírně důležité důkladně třídít křemíkové solární panely od ostatních, neboť se pro jejich účinnou recyklaci používají odlišné chemické a fyzikální procesy. Na Obr. 20 je znázorněn obecný vzhled solárních panelů vyrobených na bázi různých technologií. Je zřejmé, že vizuálně lze jednoduše stanovit výrobní technologie solárního panelu.



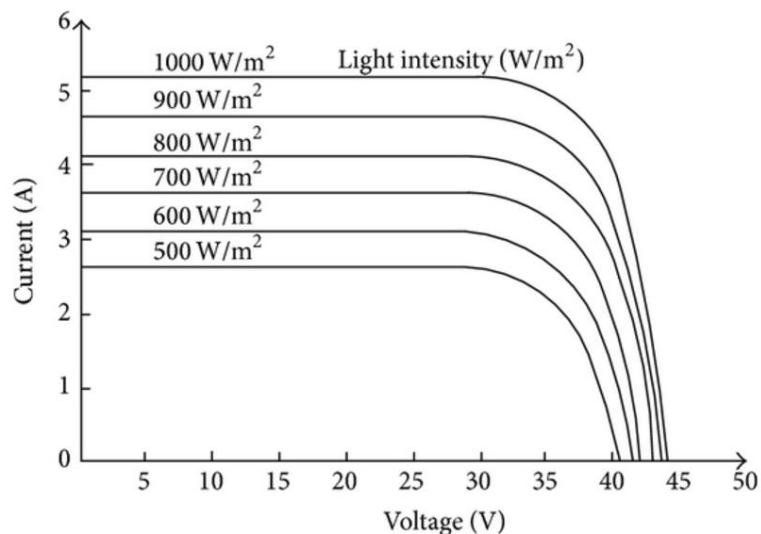
Obr. 20: Vzhled FV článků, vyrobených na bázi různých technologií (A – tenkovrstvé, B – monokrystalické, C – polykrystalické) [22]

Pro stanovení účelnosti či vhodnosti reutilizace solárních panelů slouží experimentální přístroj, který dokáže stanovit pokles původní účinnosti použitého panelu komparační metodou. Jedná se o měřicí jednotku, která stanovuje voltampérovou charakteristiku, tedy průběh závislosti výstupního proudu (případně výkonu) na napětí při měnícím se odporu. Měřicí jednotka srovnává naměřené hodnoty zkoumaného panelu s výstupními parametry panelu se známou účinností (standard) za stejných terénových podmínek. Příklad VA charakteristiky solárního panelu je znázorněn na Obr. 21.



Obr. 21: Příklad VA charakteristiky solárního článku

Zároveň je důležitý, aby zkoumaný solární panel a standard byly totožné z hlediska použité výrobní technologie. Cílem měření je porovnání chování solárního panelu a standardu za stejných podmínek, tedy při stejné intenzitě slunečního záření. Na Obr. 22 lze sledovat průběh VA charakteristiky solárního panelu při různé intenzitě záření. U solárních článků vyrobených dle různých technologií se výše zmíněná závislost liší.



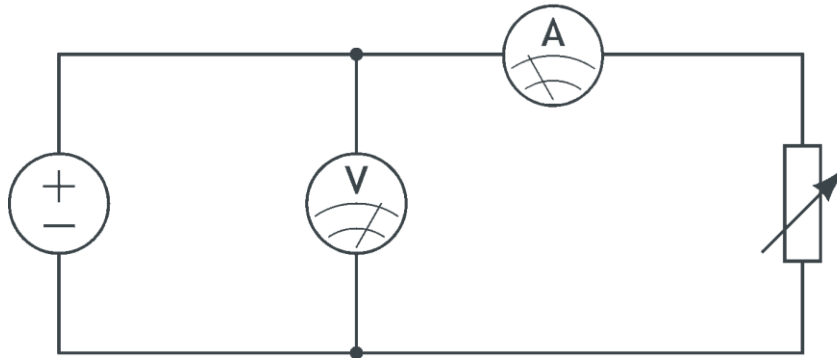
Obr. 22: VA charakteristika solárního panelu při různých intenzitách záření [23]

K popisu účinnosti solárního článku nestačí pouze měření hodnoty napětí a proudu na prázdko. Při měření napětí solárních článků/panelů se voltmetrem měří V_{OC} , což je napětí nezátíženého obvodu. Jinými slovy je to maximální napětí, které solární panel je schopen vyprodukovat. Naopak se měřením proudu na prázdko získává hodnota zkratového proudu I_{SC} , představující maximální hodnotu proudu, kterou může solární panel vyprodukovat. Z následující rovnice:

$$P = I \cdot U, \quad (6)$$

kde P je výkon, I je proud, respektive U je napětí, je zřejmé, že se dosažením do rovnice hodnoty V_{OC} a odpovídající nulové hodnoty proudu získává nulový výkon. Stejně tak, se dosažením do rovnice hodnoty I_{SC} a odpovídající nulové hodnoty napětí získává nulový výkon.

Pro stanovení bodu z VA charakteristiky, ve kterém solární článek produkuje maximální výkon, musí se do obvodu zakomponovat zatížení se vzrůstající hodnotou odporu, a postupně se měřit proud a napětí. Podstatou experimentu je nalezení maximálního výkonu solárního panelu připojením variabilního rezistoru do obvodu, následující zaznamenání příslušných hodnot proudu a napětí a opakování postupu měření pro několik nastavení variabilního rezistoru.



Obr. 23: Obecné schéma pro stanovení maximálního výkonu solárního panelu za určitých podmínek (součástí měřicí sestavy je voltmetr, ampérmetr, variabilní rezistor a solární panel) [24]

Ze známých hodnot plochy solárních panelů a hodnoty P_{max} , pomocí rovnice (7) lze stanovit plošnou hustotu výkonu solárního panelu.

$$\rho_p = \frac{P_{max} \text{ [W]}}{A \text{ [m}^2\text]} , \quad (7)$$

kde ρ_p je plošná hustota výkonu, P_{max} je hodnota maximálního výkonu, A je plocha solárního panelu.

Následně na základě známých plošných hustot výkonu standardu a zkoumaného solárního panelu je možné spočítat bezrozměrný srovnávací parametr představující poměr plošných hustot výkonu solárních panelu.

$$\omega = \frac{\rho}{\rho_{ST}} , \quad (8)$$

kde ω je srovnávací parametr, ρ a ρ_{ST} je plošná hustota výkonu zkoumaného solárního panelu a standardu.

Za předpokladu, že panely, které se srovnávají, mají stejnou strukturu a výrobní technologii nebo podobnou závislost absolutní účinnosti FV panelů na intenzitě slunečního záření, lze pomocí výše uvedeného srovnávacího parametru a známé účinnosti standardu stanovit aktuální účinnost panelu.

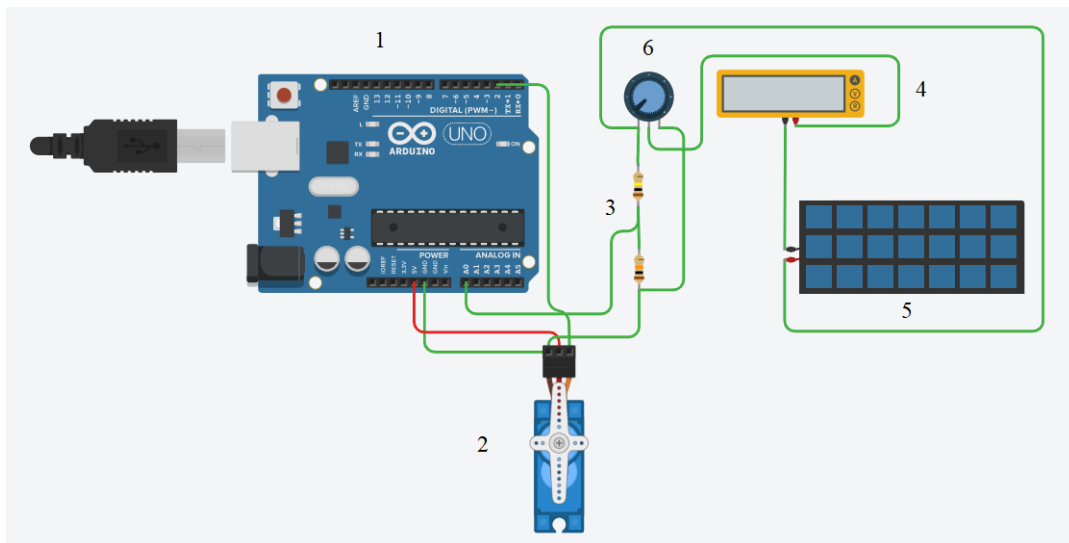
$$\eta = \omega \cdot \eta_{std}, \quad (9)$$

kde η a η_{std} je hodnota absolutní účinnosti zkoumaného solárního panelu a standardu, ω je srovnávací parametr.

4.5 Popis přístroje pro stanovení aktuální účinnosti panelu

S využitím výše uvedených předpokladů byla sestavena měřicí jednotka na bázi mikrokontrolérů Arduino nano, která dynamicky sleduje hodnoty napětí a proudu při měnícím se odporu. Jedním z primárních cílů při návrhu konstrukce byla automatizace procesu analýzy v maximální možné míře. Arduino je Open-Source platforma pro snadný návrh a vývoj elektronických programovatelných zařízení. Je velmi vhodná pro rychlé prototypování. Arduino Nano je postavená na bázi mikrokontroléru AVR ATmega328. Samotná deska obsahuje 14 digitálních a 8 analogových vstupů/výstupů.

Na Obr. 24 je znázorněno obecné schéma měřicího přístroje. Dále následuje postupný popis jednotlivých modulů a jejich princip fungování.

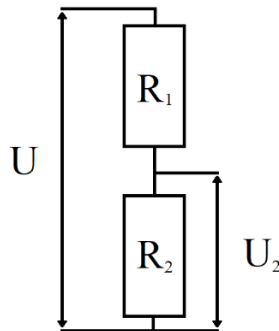


Obr. 24: Schéma měřicího přístroje (1 – Arduino, 2 – Servo motor, 3 – Dělič napětí, 4 – Senzor proudu, 5 – Solární panel 6 – Potenciometr)

4.5.1 Měření napětí

Platforma Arduino obsahuje analogově digitální převodník, který dokáže změřit měnící se napětí a následně ho převést na čísla mezi 0 až 1023. Maximální měřitelná hodnota napětí pomocí platformy je 5 V, zatímco komerční solární panely generují napětí až 50 V. Jelikož větší napětí může způsobit poškození mikrokontroleru platformy Arduino, do obvodu se přidává nezátížený, odporový dělič napětí (Obr. 25). Přes nezátížený dělič neprochází skoro žádný

proud. Proud procházející oběma rezistory je stejný. Celkové napětí se rozdělí v poměru na rezistory R_1 a R_2



Obr. 25: Elektrické schéma nezátíženého děliče napětí [25]

Použitím vhodných rezistorů (velikost odporu je 10 a 100 k Ω respektive) se zredukuje měřitelné napětí na hodnotu nepřesahující 5 V.

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_1, \quad (10)$$

kde U_2 je měřené napětí, U_1 je skutečné napětí, R_1 a R_2 jsou rezistory děliče napětí.

4.5.2 Měření proudu – ACS712

Proudový senzor ACS712 funguje na principu Hallova jevu. Podstatou Hallova jevu je vznik příčného (tzv. Hallova) napětí na polovodičové destičce, kterou prochází stejnosměrný proud a která je vložena do magnetického pole. Tenká polovodičová destička typu P je vložena do magnetického pole a zároveň připojena na zdroj stejnosměrného napětí. Indukce magnetického pole B je kolmá na vektor intenzity elektrického pole E . Většinové díry v polovodiči se začnou pohybovat ve směru vektoru E . V magnetickém poli na ně ale působí magnetická síla (Lorentzova síla) F_m , jejímž vlivem se díry vychylují z původního směru a začínají se hromadit u jedné boční strany destičky. Tím tam vzniká přebytek kladného náboje a na druhé boční straně přebytek záporného náboje. Mezi oběma bočními konci tedy dochází ke vzniku příčného Hallova napětí. Objevil ho v roce 1879 americký fyzik Edwin Hall [7].

Stačí změřit zmíněné napětí z modulu s proudovým senzorem ACS712 pomocí analogového vstupu a přepočítat na proud použitím vhodné konstanty, kterou udává výrobce senzoru. Další výhodou proudového senzoru ACS712 je možnost měřit proud v obou směrech, což dovoluje obdržet jak kladné, tak i záporné hodnoty proudu.

4.5.3 Stanovení maximální hodnoty výkonu panelu

Pro stanovení maximální hodnoty výkonu panelu z voltampérové charakteristiky bylo navrženo využití rovnici 11. Proložení spojnicí trendu přes lineární oblast závislosti výkonu na napětí lze obdržet příslušnou lineární funkci. Vložení do funkce za x hodnoty V_{mp} , představující hodnotu napětí při maximálním výkonu (uvádí se výrobcem v technickém listu solárního panelu) lze stanovit aproximovanou hodnotu P_{max} .

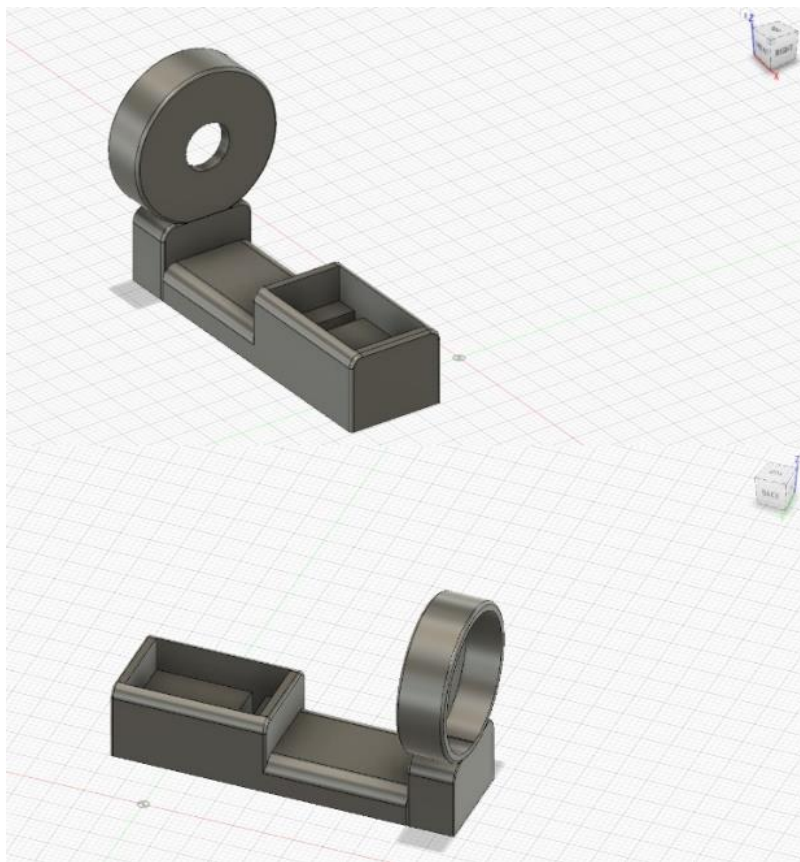
$$P_{max} = V_{mp} \cdot k + q, \quad (11)$$

kde P_{max} je maximální výkon, k a q jsou koeficienty lineární funkce.

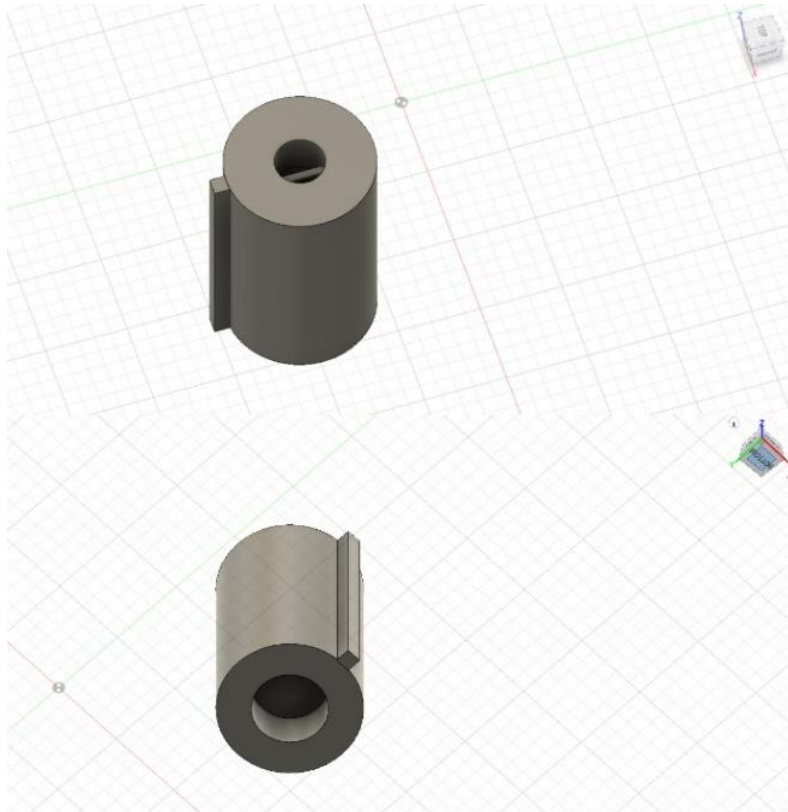
Jedná se o aproximaci, která v určité míře zjednodušuje výpočty. Přípustnost aproximace je odůvodněna existencí závislosti hodnoty napětí při maximálním výkonu na intenzitě slunečního záření. Hodnota V_{mp} uvedená výrobcem se stanovuje při standardních podmínkách (intenzitě záření 1000 W/m^2 a teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Při působení záření o nižší intenzitě hodnota napětí odpovídající maximálnímu výkonu je nepatrně nižší. Výše uvedená aproximace umožňuje ignorovat nelineární část VA charakteristiky a provádět výpočty pouze na základě lineární závislosti.

4.5.4 Dynamický odpor

Důležitou součástí přístroje je dynamický odpor, který zaručuje možnost měření VA charakteristiky solárního panelu. V rámci diplomové práce byl sestaven grafický 3D model stojanu a redukce, umožňující spojení digitálního servomotoru (SG92R) a drátového potenciometru (WX903-1, 470R, 12,5W 5%). 3D model byl zkonstruován pomocí softwaru Fusion 360 společností Autodesk.



Obr. 26: 3D model stojanu pro umístění drátového potenciometru se servomotorem



Obr. 27: 3D model redukce pro spojení drátového potenciometru s servomotorem

Platforma Arduino prostřednictvím příslušného zdrojového kódu kontroluje pozice servomotoru, respektive i pozice potenciometru, čímž se zaručuje dynamická kontrola odporu. Pro sestavení prototypu byl použit potenciometr se ztrátovým výkonem 12,5 W. Nicméně je potřeba vzít v úvahu, že v reálných terénových podmínkách solární panel může generovat mnohem větší výkon, teoretický až 400 W (SunPower 415), běžně až 200 W. Pro praktickou realizaci navrženého prototypu přístroje zřejmě je nutné použít potenciometr se ztrátovým výkonem minimálně 200 W a hodnotou odporu 500 Ω , ideálně s doplňkovým chlazením pro účinnější odvod tepla.

4.5.5 Zdrojový kód

Pracovní algoritmus lze rozdělit do několika částí. V první části dochází k zahrnutí knihovny pro ovládání servomotoru a k označení a deklaraci všech konstant, které se dále budou používat pro stanovení potřebných parametrů.

```
#include <Servo.h> //zahrnutí knihovny pro ovládání servo motoru
Servo myservo; //vytvoření instance pro ovládání servomotoru
const int sensorValue = A0; // číslo pinu analogového vstupu pro měření napětí
const int analogIn = A1; // číslo pinu analogového vstupu pro měření proudu
int constant = 185; // konstanta pro přepočítání naměřeného napětí na proud
int offset = 2500; // proměnná pro nastavení offsetu, polovina  $V_{cc}$ 
int pos = 0; //proměnná obsahující pozici servomotoru (úhel natočení)
float R1 = 100000.0;
float R2 = 10000.0;
```

Funkce setup(), se používá k inicializaci režimu jednotlivých pinů a nastavení sériové komunikace.

```
void setup() {  
    Serial.begin(9600); // inicializujte sériovou komunikaci na 9600 bitech za  
    sekundu  
    myservo.attach(3); //deklarace digitálního pinu napojeného na servomotor  
    pinMode(analogIn, INPUT); // inicializace analogového vstupu  
    pinMode(sensorValue, INPUT); // inicializace analogového vstupu  
}
```

Po dokončení funkce setup(), se začne neustále dokola provádět funkce loop(), smyčka. Příkazy, obsažené v těle této funkce, jsou určeny k provádění veškeré činnosti platformy. V rámci předloženého řešení jsou integrovány několik smyček do základní smyčky, která odpovídá za postupný pohyb potenciometru pomocí servomotoru s krokem 1°.

// proces smyčky se teď neustále opakuje:

```
void loop() {  
    //smyčka pro postupný pohyb servo motoru s krokem 1°, od 1° do 180°.  
    for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1) {  
        myservo.write(pos); //natočení motoru na aktuální úhel  
        delay(50);  
    }  
}
```

Další smyčka odpovídá za měření napětí, provádí se 500 měření pro ustálení měřené hodnoty s intervalem v 5 ms. Následně se výsledek měření zapisuje s přesností na dvě desetinná místa.

```
int voltage = 0;  
float vin = 0.0;  
float vout = 0.0;  
float finalvoltage = 0.0;  
// smyčka pro provedení 500 měření s intervalem 5 ms pro ustálení výsledku  
for(int i=0;i<500;i++){  
    voltage = analogRead(sensorValue); // načtení hodnoty analogového vstupu  
    vout = (voltage * 5.0) / 1023.0; // Převod analogového vstupu (od 0 do 1023)  
    na napětí (0–5V)  
    vin = vout / (R2/(R1+R2)); // Přepočítání napětí dle vzorce nezátíženého děliče  
    finalvoltage += vin; // uložení výsledku pro následné zprůměrování  
    delay(5);  
}  
vin = (finalvoltage / 500); // výpočet průměru  
if (vin<0.09) {  
    vin=0.0;  
}
```

```

}
Serial.print("Voltage across: ");
Serial.println(vin,2); // zápis výsledku na dvě desetinná místa
// proměnné pro měření a výpočty proudu
float voltage2 = 0.0;
float current = 0.0;
float finalcurrent = 0.0;
float Power = 0;

```

Příslušné proměnné pomocí funkce float se deklarují již v rámci smyčky a zároveň se nastavuje nulová startovací poloha, neboť se startem nové smyčky musí zahájit nové měření. V tomto případě by deklarace proměnných před smyčkou přivedla k tomu, že by se s každým měřením sčítaly naměřené hodnoty do příslušných proměnných.

Poslední smyčka odpovídá za měření hodnoty proudu, obdobně jak v předcházejícím měření hodnoty napětí. Zase se vypočítává průměrná hodnota proudu z 500 měření provedených s intervalem 5 ms. Následně dochází k zápisu výsledku a pozice potenciometru a výpočet hodnoty výkonu. Základní smyčka je ukončena vrácením servomotoru do původní nulové pozici.

```

int analog = 0;
// smyčka pro provedení 500 měření pro ustálení výsledku
for(int i=0;i<500;i++){
    analog = analogRead(analogIn); // načtení hodnoty analogového vstupu
    voltage2 = (analog * 5000.0) / 1023.0; // přepočet napětí na proud dle
informací od výrobce
    current = (voltage2 - offset) / constant;
    finalcurrent += current; // uložení výsledku pro následné zprůměrování
    delay(5);
}
current = finalcurrent / 500; // výpočet průměru ze stovky měření
if (current<0.01) {
current=0.0;
}
Serial.print("Current: ");
Serial.println(current,2); // zápis výsledku na dvě desetinná místa
Power= current * vin; // výpočet výkonu
Serial.print("Power: ");
Serial.println(Power,2); // výpis výsledku na dvě desetinná místa
Serial.print("Position: ");
Serial.println(pos);

```

```

}
myservo.write(0); //natočení motoru na původní úhel
Serial.println("STOP");
}

```

Pro objektivní vyhodnocení naměřené hodnoty maximálního výkonu P_{\max} je důležité, aby venkovní (terénní) podmínky byly konstantní. Jakákoliv oblačnost, případně dynamická změna intenzity slunečního záření může zkreslit výsledky.

4.6 Optimalizace stanovení VA charakteristiky

Pro testovací účely byl použit solární panel na bázi polykrystalického křemíku WS-5 společností WAAREE. Základní parametry, které uvádí výrobce, jsou představené v Tab. 8.

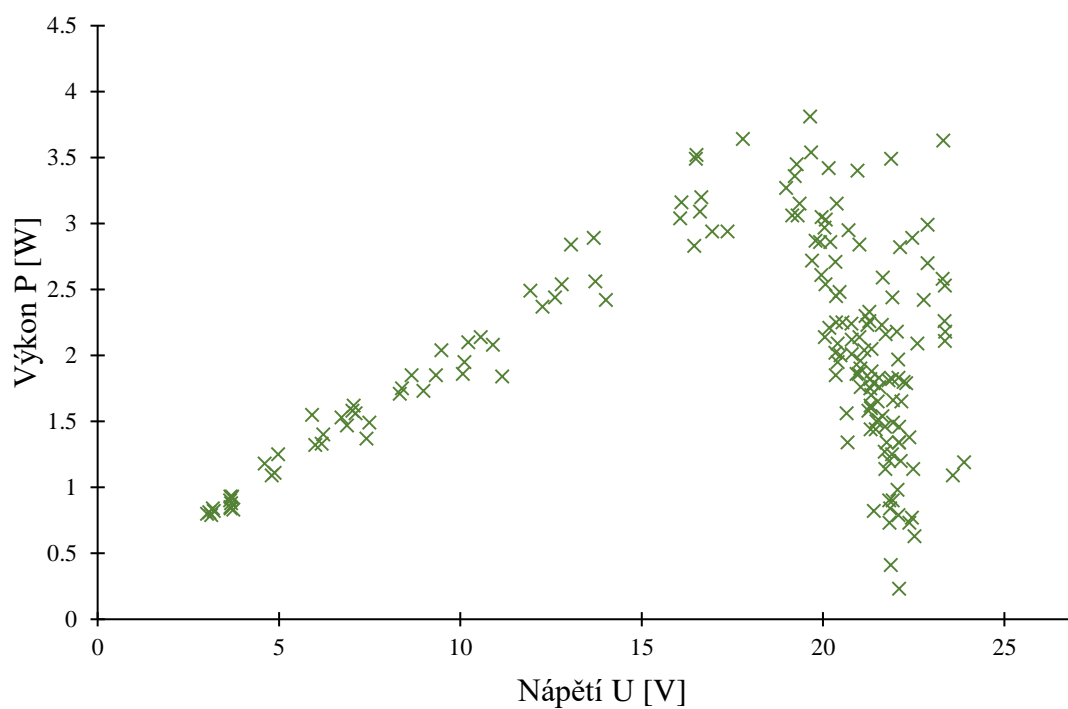
Tab. 8: Základní charakteristiky solárního panelu WS-5

Název parametru	Příslušná hodnota
Jmenovité napětí	12 V
Napětí na prázdno	21 V
Maximální napětí při plném výkonu	17 V
Maximální proud při plném výkonu	0,3 A
Rozměry	290×185×22 mm
Váha	850 g

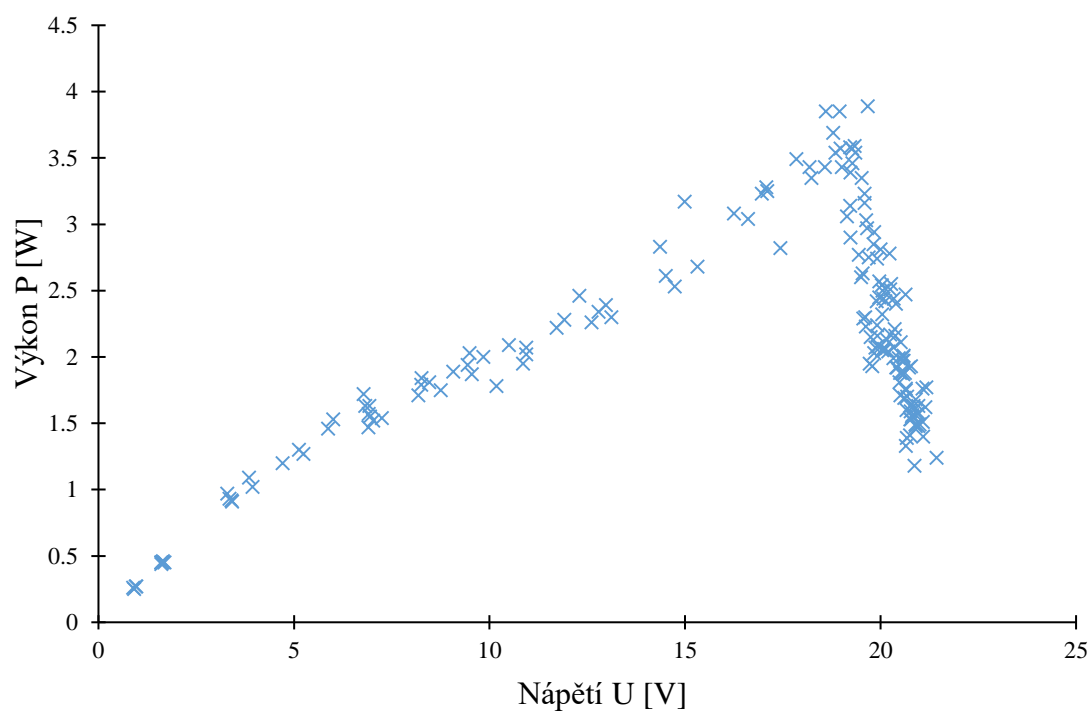
Stanovení výstupní VA charakteristiky standardu se prováděly v sluneční dny. Primárním cílem byla optimalizace zdrojového kódu pro přesnější stanovení sledovaných parametru. Během procesu optimalizace kódu bylo stanoveno několik faktorů ovlivňujících samotné měření. První faktor se týká rychlosti pohybu servomotoru, tedy i rychlosti pohybu potenciometru, ovlivňuje rozptyl naměřených hodnot. Vysoká rychlost pohybu nedovoluje, aby došlo k stabilizaci sčítaných hodnot (tedy hodnoty napětí a proudu). Zvýšením času měření příslušné hodnoty proudu a napětí v každé pozici servomotoru lze dosáhnout přesnějších výsledků.

Další faktor ovlivňující přesnost měření, je množství provedených záznamů příslušných hodnot napětí a proudu v každé pozici servomotoru. Měřicí sestava dovoluje vytvořit doplňkovou smyčku zdrojového kódu, pomocí které lze s určitým intervalem provést několik set měření a stanovit průměrnou hodnotu měřené veličiny.

Za stejných podmínek (intenzita slunečního záření) bylo provedeno měření VA charakteristiky solárního panelu WS-5 použitím dvou různých zdrojových kódů, které zohledňují výše uvedené faktory. Výsledná závislost výkonu na napětí je znázorněná na Obr. 28 a Obr. 29.



Obr. 28: VA charakteristika standardního panelu WS-5 (150 opakovaných měření s následným průměrováním výsledné hodnoty v každé pozici servomotoru)



Obr. 29: VA charakteristika standardního panelu WS-5 (500 opakovaných měření s následným průměrováním výsledné hodnoty v každé pozici servomotoru)

V případě měření závislostí, znázorněné na Obr. 28, byla využita rychlejší metoda, tzn. provedení 150 opakovaných měření s následným průměrováním výsledné hodnoty pro každou stanovenou veličinu napětí a proudu s intervalem mezi dvěma měření 1 ms, čas měření jedné pozice potenciometru činil 155 ms. Celková doba měření je 1 minuta.

V případě měření závislostí, znázorněné na Obr. 29, se provádělo 500 opakovaných měření s následným průměrováním výsledné hodnoty s intervalem mezi dvěma měření 1 ms, čas měření jedné pozice potenciometru činil 550 ms. Celková doba měření 3 minuty.

Z představených VA charakteristik je vidět, že zvýšením množství opakovaných měření, tedy i zvýšením celkové doby měření, zvyšuje se i přesnost měření.

Další možnou příčinou nepřesnosti měření je přeměna elektrické energie na tepelnou energii potenciometrem, čímž dochází k zvyšování teploty této součástky. Hodnota odporu vodivého materiálu je závislá na teplotě. Pro vyloučení vlivu teploty potenciometru na přesnost měření je potřeba zakomponovat do měřicí soustavy teplotní čidlo a sledovat ustálení hodnoty teploty potenciometru před zahájením měření v každé další pozici.

Nevýhoda předloženého řešení spočívá v existenci závislostí přesností stanovených parametru na venkovních podmínkách. Pokud dochází k razantní fluktuaci intenzity slunečního záření v důsledku měnicích se podmínek počasí, jakožto přítomnost oblačností a větru, nelze objektivně stanovit bod odpovídající maximálnímu výkonu, neboť hodnota měřeného proudu závisí na intenzitě záření (Obr. 22). Proto se porovnání standardu s jiným solárním panelem a stanovení srovnávacího parametru musí vždy provádět při stejných venkovních podmínkách, zejména při konstantní intenzitě slunečního záření. Navíc se vždy musí dodržovat stejný uhel náklonu vůči zdroje záření a musí se opakovaně měřit hodnota P_{\max} standardu, jelikož intenzita slunečního záření není sama o sobě konstantní přes den.

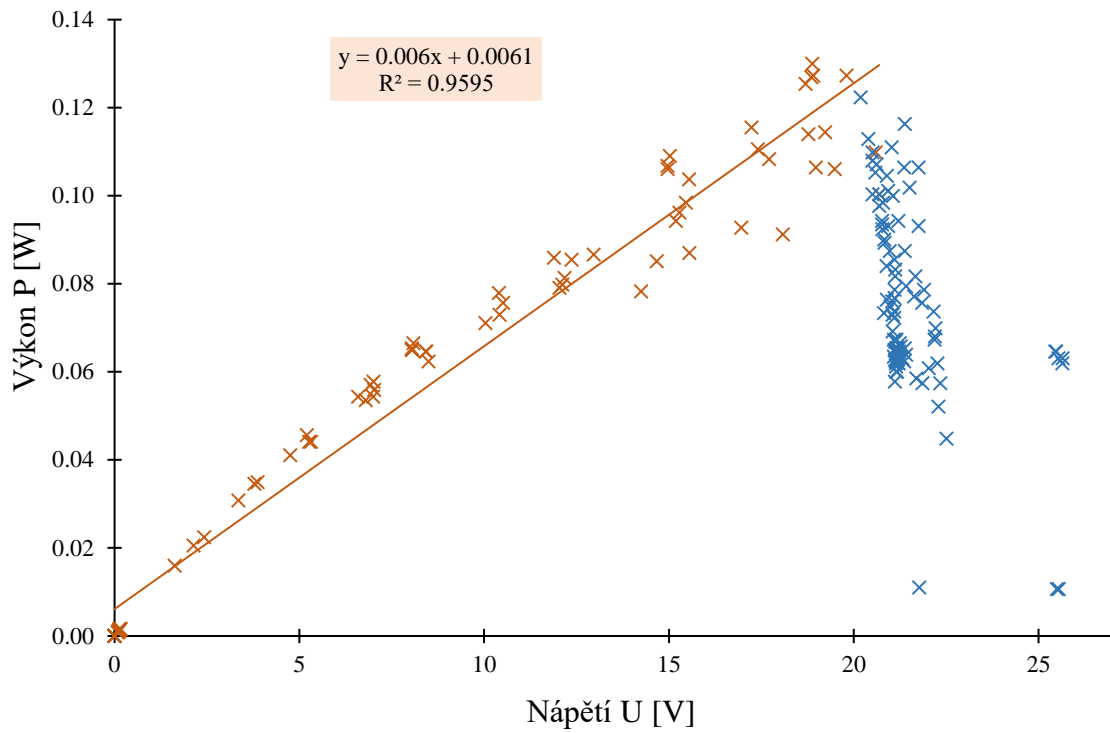
4.7 Měření VA charakteristik použitých FV modulů

V areálu společností Prefia s.r.o. dne 7. 4. 2020 bylo provedeno měření dvou solárních křemíkových polykrystalických panelů s komerčním označením MY280-P a standardu. Základní parametry zkoumaných solárních panelů jsou popsány v Tab. 9.

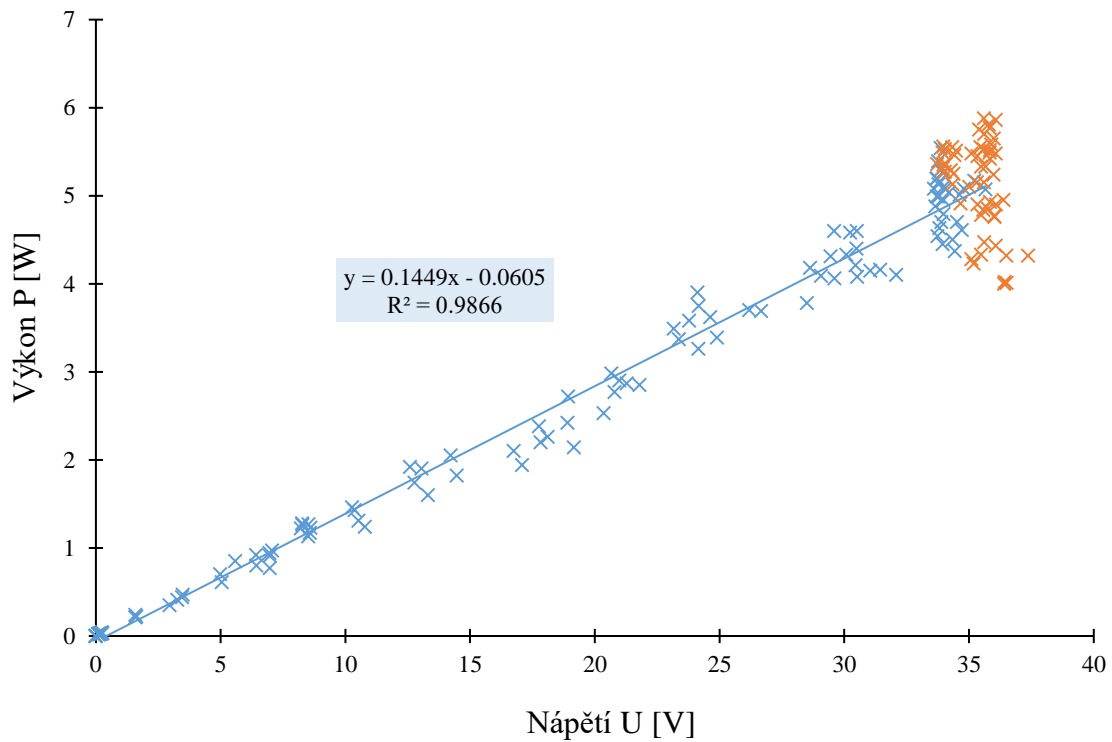
Tab. 9: Parametry solárního panelu

Název parametru	Hodnota
Komerční název	MY280-P
Výkon	280 W
Napětí při P_{\max}	34,9 V
I_{mp}	8,02 A
V_{oc}	43,9 V
I_{sc}	8,82 A

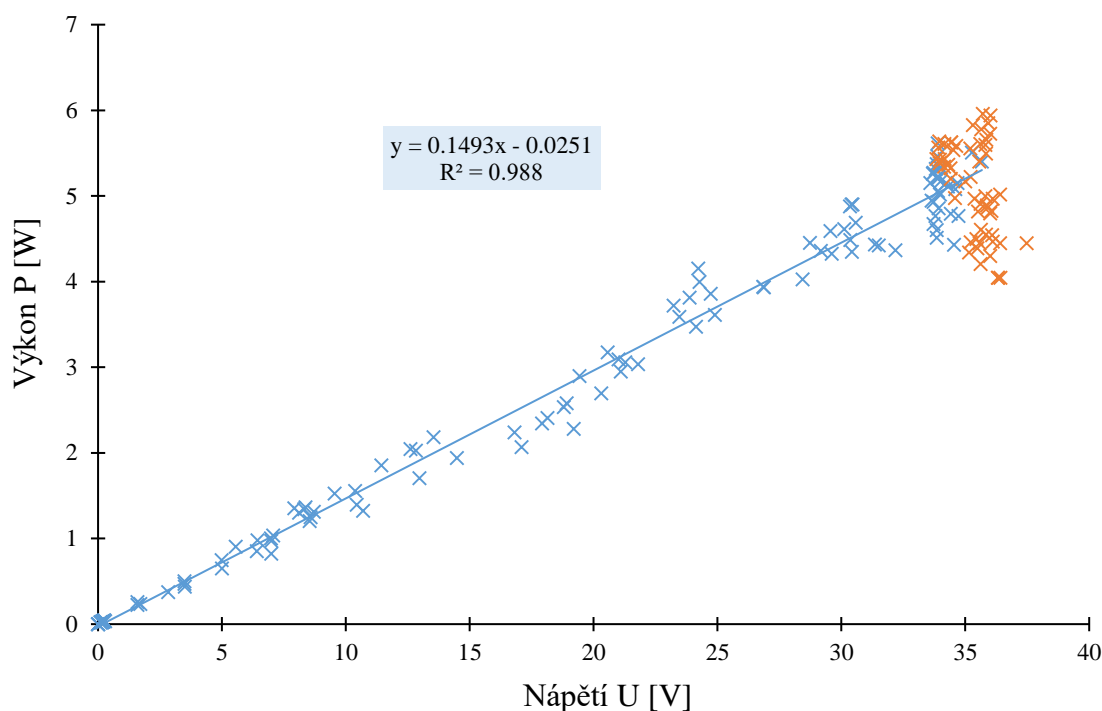
Výsledky měření jsou znázorněné na Obr. 30, Obr. 31, Obr. 32.



Obr. 30: VA charakteristika standardu (solárního panelu se známou hodnotou účinností)



Obr. 31: VA charakteristika solárního panelu číslo 1



Obr. 32: VA charakteristika solárního panelu číslo 2

Pro stanovení aktuální účinnosti zkoumaných panelu, byl použit vzorec č. 12.

$$\eta = \frac{\rho \cdot \eta_{std}}{\rho_{std}}, \quad (12)$$

kde η je účinnost zkoumaného panelu, η_{std} je účinnost standardu a ρ_{std} je plošná hustota výkonu panelu se známou hodnotou účinností (standardu).

Dosažením dalších parametrů popisujících zejména plošnou hustotu výkonu panelu do vzorce č. 12 lze získat rovnici č. 13:

$$\eta = \frac{P_{max}}{A} \cdot \frac{A_{std}}{P_{max std}} \cdot \eta_{std}, \quad (13)$$

kde P_{max} je hodnota maximálního výkonu a A je plocha zkoumaného solárního panelu, zbývající parametry z rovnice jsou analogické a odpovídají panelu se známou hodnotou účinností.

Dosažením rovnic pro aproximaci hodnoty maximálního výkonu do rovnice č. 13 lze získat rovnici č. 14. Aproximace hodnoty maximálního výkonu je znázorněná v rovnici č. 11.

$$\eta = \frac{V_{mp} \cdot k + q}{A} \cdot \frac{A_{std}}{V_{mp} \cdot k + q_{std}} \cdot \eta_{std} \quad (14)$$

Úpravou vzorce č. 14 se získává finální závislost mezi účinností zkoumaného solárního panelu a panelu se známou účinností. Finální vyraz pro vypočet účinností je vyjádřen pomocí rovnice č. 15.

$$\eta = \frac{A_{std}}{A} \cdot \frac{V_{mp} \cdot k + q}{V_{mpstd} \cdot k_{std} + q_{std}} \cdot \eta_{std} \quad (15)$$



Obr. 33: Snímek zkoumaného solárního panelu MY280-P, na bázi polykrystalického křemíku

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

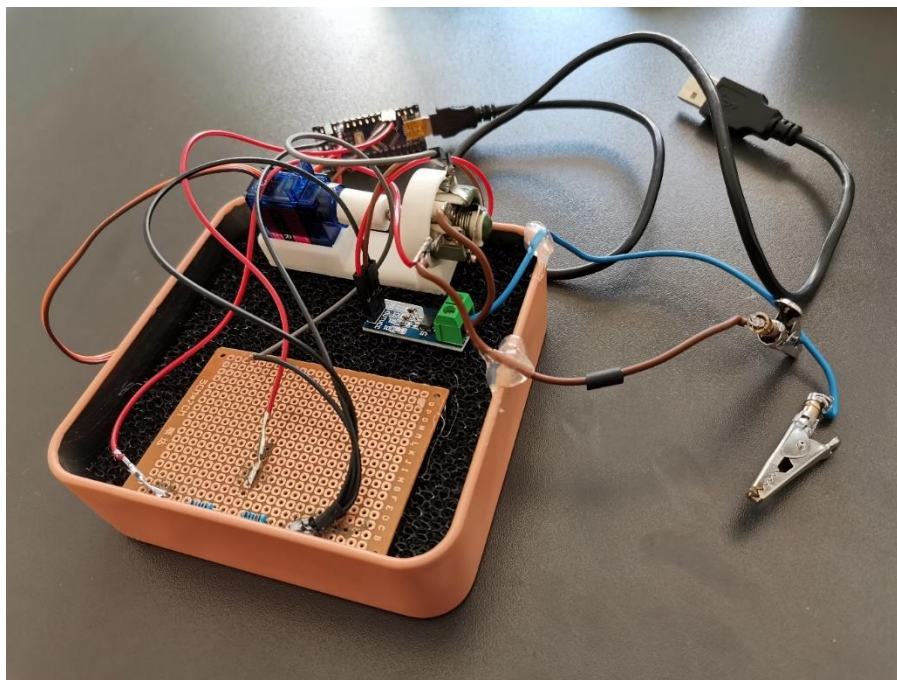
V dnešní době ke stanovení účinností solárních panelů se používají sofistikovaná zařízení, které jednak simulují standardní podmínky měření (specifický tlak, teplota a intenzita solárního záření) a následně stanovují VA charakteristiku, čímž na základě hodnoty P_{\max} , se stanovuje i maximální účinnost panelu pomocí rovnice č. 16.

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{E \cdot A_c} \cdot 100 \% , \quad (16)$$

η_{\max} je účinnost, P_{\max} je maximální výkon v W, E je intenzita záření v W/m^2 , A_c je plocha solárního panelu v m^2 .

Takovou metodu lze extrapolovat na terénní podmínky, nicméně největší problém spočívá ve stanovení intenzity slunečního záření. Tento parametr se stanovuje pomocí tzv. pyranometru, což je velice drahé zařízení a stejně se musí využívat v kombinaci s dynamickým odporem pro správné stanovení hodnoty P_{\max} . Nabízení v rámci diplomové měřicí přístroj je výrazně levnější a jednodušší pro terénní aplikace. Pro úspěšnou realizaci prototypu byly použité běžně dostupné na trhu součástky a domácí 3D tiskárna.

Použitím 3D tiskárny Ender 3 PRO byly vytištěny příslušné redukce a stojan pro spojení servomotoru a drátového potenciometru. S využitím ostatních přístrojů a pomůcek byla sestavená výsledná konstrukce, která je zobrazená na Obr. 34.



Obr. 34: Sestava pro měření VA charakteristiky solárních panelů

Stojan byl vytištěn z materiálů PETG. Pro tisk redukce byl vybrán materiál PLA. Důvodem výběrů těchto materiálů jsou jejich rozdílné mechanické vlastnosti (vyšší hodnota houževnatosti PETG, větší Youngův modul pružnosti a hodnota pevnosti v ohybu materiálů PLA) a kompatibilita s technologií 3D tisku (FDM).

Pomocí předloženého měřicího prototypu lze stanovit VA charakteristiky solárních panelů. Je potřeba si uvědomit, že mikrokontrolér ATmega328 má nízký výpočetní výkon a omezený a primitivní jazyk programování, proto měřicí sestava může být použita pouze pro řízení procesu a sběr dat, ale nikoliv pro analýzu. Další možnosti vylepšení přístroje jsou:

- doplnění externího zdroje elektrické energie (Li-ion nebo LiPo baterie) zajišťující mobilitu a nezávislost na jiných zařízeních (PC),
- systém BMS (Battery Management System) pro ochranu externího zdroje elektrické energie,
- konvertor DC/DC pro stabilizaci vstupního napětí (napájení pro Arduino),
- připojení externí SD karty pro uložení všech dat,
- bezdrátový modul Wi-Fi nebo Bluetooth pro komunikaci a přenos dat do jiných zařízení.

Jak již bylo výše zmíněno, je potřeba využít výpočetní výkon jiného zařízení jako například mobilní telefon nebo počítač pro zakomponování do analýzy naměřených dat další údaje, jakožto plocha solárního panelu, pomocí které se stanovuje plošná hustota výkonu.

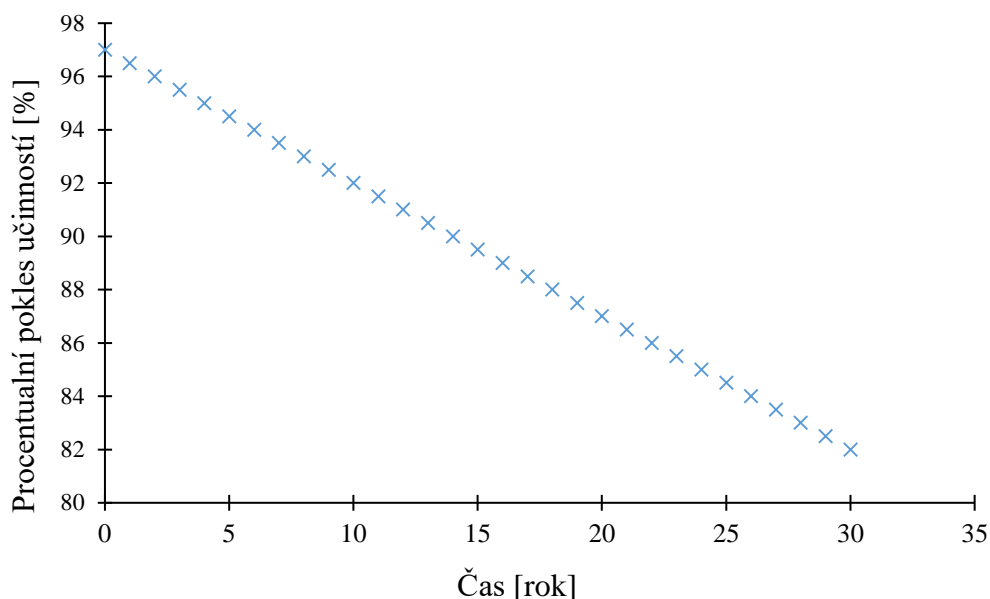
Obecně lze říct, že hlavní výhody popsaného experimentálního měřicího přístroje (sestavy) jsou nízká cena, jednoduchost a snadná možnost úpravy případně výměny nefunkčních komponent. Zároveň, popsaný přístroj může být využit pro dlouhodobé sledování výkonu panelu v terénních podmínkách a posuzování použitelnosti určité lokaci za účelem produkce elektrické energie ze solární.

Metody a procesy představené v rámci experimentální části, mohou být využité několika způsoby, zejména společností zabývajících se recyklací a sběru FV modulů:

- jelikož procesy spojené s fyzikální nebo chemickou recyklací panelů jsou energeticky náročné, využitím renovovaných panelů pro interní produkci elektrické energie lze zaručit efektivnější a zároveň levnější recyklaci FV modulů. Stejně tak, výše popsané řešení dovoluje využití jiných energeticky náročných procesů, které mohou zaručit větší výtěžnost případně čistotu recyklovaných složek,
- vytvoření druhotného trhu solárních panelů,
- poskytování služeb pro celkovou komplexní kontrolu systémů a jednotlivých FV modulů a posuzování jejich stavů fyzickým nebo právnickým osobám, které mají ve vlastnictví solární elektrárny.

Standardně výrobci solárních panelů uvádí, že dochází k poklesu účinnosti FV modulu o 0,5 % za rok. Táto závislost je zobrazená na Obr. 35.

Ze závislostí je vidět, že i po uplynutí 25 let panel může být pořád funkční nebo renovovatelný a lze očekávat, že takový panel bude mít pokles absolutní účinnosti o přibližně 20 %.



Obr. 35: Graf závislosti procentuálního poklesu účinnosti solárního panelu v průběhu času

Je známo, že standardní komerční křemíkové solární panely mají původní účinnost v rozmezí 14 až 19 %. Tedy lze předpokládat s rezervou, že funkční starší solární panely odstraněné z provozu po 20–25 letech můžou dosahovat účinnosti 8 až 14 %. Proto, výhoda tvorby druhotného trhu solárních panelů je v tom, že přesunem sekundárních panelů do jižních oblastí, kde intenzita slunečního záření je větší, lze kompenzovat pokles účinnosti, a dále produkovat akceptovatelné množství elektrické energie. Což paradoxně může znamenat, že během ročního období druhotný panel může vyprodukovat srovnatelné případně větší množství elektrické energie než nový analogický panel za stejné období v ČR.

Výše zformulovaný předpoklad byl potvrzen provedeným v rámci diplomové práce měřením, vyplývající výsledky jsou znázorněny v Tab. 10.

Tab. 10: Výsledky měření a charakteristiky solárních panelů

Parameter	WS-5/12 V	MY280-P č. 1	MY280-P č. 2
Plocha [m ²]	0,05	1,94	1,94
V_{mp} [V]	17	34,9	34,9
P_{max} [W]	0,12	4,84	5,2
Plošná hustota výkonu [W/m ²]	2,19	2,58	2,67
Původní účinnost [%]	9,32	14,4	14,4
Stanovená účinnost [%]		10,6	11,42
Procentuální pokles oproti původní hodnotě účinnosti [%]		73,6	79

6 ZÁVĚR

Diplomová práce byla realizovaná ve spolupráci s firmou VIA ALTA a.s. Cílem bylo najít a popsat možné cesty recyklace fotovoltaických článků. V rámci práce byla provedena literární rešerše a následným popisem aktuálního stavu řešené problematiky, uskutečněny experimenty spojené se separací jednotlivých segmentů použitých fotovoltaických panelů, zakončeno vyhodnocením experimentální práce.

V rámci teoretické části byly popsány základní principy fotovoltaiky a přeměny solární energie na elektrickou, následně historie vývoje, metody výroby a populární trendy v rámci FV řešení, odpovídající legislativa, existující metody a průmyslové postupy recyklace fotovoltaických panelů a rámcová situace na trhu.

Experimentální část je rozdělena na několik částí. V rámci první etapy byl proveden pokus o separaci jednotlivých materiálů a segmentů solárních panelů. Z důvodů omezených technických možností, velkých rozměrů solárních panelů a složitosti přípravy menších vzorků pro zkoumání a stanovení optimálních separačních metod, byly výsledky neuspokojivé. Proto se hlavním záměrem stal návrh a vývoj jednoduchého prototypového zařízení umožňujícího stanovení aktuální účinnosti použitých solárních panelů v terénních podmínkách a zároveň posouzení opětovného použití těchto panelů. K tomuto záměru bylo přistoupeno zejména z důvodu, že po předběžné vizuální kontrole velká část (nejméně 30 %) solárních panelů uložených pro recyklaci na skladě bylo zjištěno, že nejsou poškozené. Z čehož vyplývá, že implementace předloženého konceptu v globálním měřítku může snížit negativní dopady na životní prostředí v důsledku zvýšení hodnoty EROEI a snížení EPBT umožní společnostem, zabývajícím se recyklací, produkovat elektrickou energii, která může být použita pro interní účely. Zároveň byla popsána metoda identifikace a charakterizace použitých solárních panelů a kontrola bypassových diod voltmetrem.

Jelikož podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/19/EC ze dne 4. července 2012 (WEEE) o odpadních elektrických a elektronických zařízeních, se upřednostňuje opětovné použití, které je v dnešní době často aplikované např. v případě hardwarových zařízení, kdy dochází k tzv. refurbishmentu nebo renovaci, implementace v průmyslovém měřítku popsaného postupu je v souladu se zákonem EU a objektivně může pozitivně změnit dopady na životní prostředí.

U dvou náhodně vybraných solárních panelů modelu MY280-P byla stanovena aktuální účinnost, která činila 10,6 % a 11,42 %, což představuje procentuální pokles na 73,6 % a 79 % z původní účinnosti deklarované výrobcem. Takové druhotné panely mohou i dále být použité pro výrobu elektřiny ze solární energie bez odůvodněné potřeby provést fyzikální či chemickou recyklaci těchto panelů.

Vzhledem k platné legislativě provozovatelé využitím výše popsaného modelu mohou následně druhotné panely přeprodat jako renovované s tím, že se panelu přidělí protokol o provedení zkoušky a stanovení aktuální účinnosti.

Kromě toho, navržený přístroj může najít uplatnění i v komerčním sektoru pro poskytování služeb týkající se provedení kontroly účinnosti solárních panelů. Na základě obdržených výsledků lze rovněž zpochybnit účelnost vyřazení jednotlivých solárních panelů z provozu solární elektrárny.

7 SEZNAM POUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

- [1] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [2] MCEVOY, A. J., Luis CASTAÑER a T. MARKVART. Solar cells: materials, manufacture and operation. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-386964-7.
- [3] KALOGIROU, Soteris. Mcevoy's *Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Third edition. San Diego: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-809921-6.
- [4] Solargis. Bratislava Slovakia: Solargis, 2020. <https://solargis.info/>.
- [5] BAUMGAERTNER, Joachim. Energy Yield and Performance Ratio of Photovoltaic Systems. *Green Rhino Energy*. London: Green Rhino Energy, 2016.
- [6] QEX10 Solar Cell Quantum Efficiency / IPCE / Spectral Response Measurement System. *PV measurements*. 5757 Central Ave B, Boulder, CO 80301, Spojené státy: PV Measurements, 1999. <http://www.pvmeasurements.com.cn/QEX10-Solar-Cell-Spectral-Response-Quantum-Efficiency-IPCE-Measurement-System.html>.
- [7] MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektrotechnické materiály I*. Praha: VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křížíka, 2016. ISBN 978-80-88058-90-8.
- [8] Od písku k procesoru — výroba křemíkového waferu. *Pctuning* [online]. Praha: EMPRESA MEDIA, 2012. <https://pctuning.tyden.cz/hardware/procesory-pameti/24350-od-pisku-k-procesoru-vyroba-kremikoveho-waferu?start=4>
- [9] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [10] SIMERSKÝ, Mojmír a Malý ZDENĚK. *Elektrotechnologie: Elektrotechnické materiály*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1980. ISBN 04-517-80.
- [11] SUN, Yunlin, Siming CHEN, Liying XIE, Ruijiang HONG a Hui SHEN. Investigating the Impact of Shading Effect on the Characteristics of a Large-Scale Grid-Connected PV Power Plant in Northwest China. *International Journal of Photoenergy*. 2014, 2014, 1-9. DOI: 10.1155/2014/763106. ISSN 1110-662X. <http://www.hindawi.com/journals/ijp/2014/763106/>
- [12] KHAN, N. A., K. S. RAHMAN, F. HAQUE, N. DHAR, M. A. ISLAM, M. AKHTARUZZAMAN, K. SOPIAN a N. AMIN. Design optimization of CdTe thin film solar cells from numerical analysis. In: *8th International Conference on Electrical and Computer Engineering*. IEEE, 2014, 2014, s. 508-511. DOI: 10.1109/ICECE.2014.7026862. ISBN 978-1-4799-4166-7. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7026862/>
- [13] MOHAMMAD BAGHER, Askari. Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*. 2015, 3(5). DOI: 10.11648/j.ajop.20150305.17. ISSN 2330-8486. <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=127&doi=10.11648/j.ajop.20150305.17>
- [14] ING. BRONISLAV BECHNÍK, PH.D. *Stručná historie fotovoltaiky*. <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>

- [15] Research Cell Efficiency Records. <https://www.energy.gov>. 5013 Denver W Pkwy Golden, CO 80401, Spojené státy americké: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2015. <https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/research-cell-efficiency-records>
- [16] Seznam a mapa solárních elektráren v ČR. *Elektrarny Pro* [online]. Brno: RH elektroprojekt, 2014. <http://www.elektrarny.pro/seznam-elektraren.php>.
- [17] Ing. Bronislav Bechník Ph.D. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. *TZB-info*. Praha: Topinfo, 2011. <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>.
- [18] DOI, Takuya, Izumi TSUDA, Hiroaki UNAGIDA, Akinobu MURATA, Koichi SAKUTA a Kosuke KUROKAWA. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001, 67(1-4), 397-403. DOI: 10.1016/S0927-0248(00)00308-1. ISSN 09270248.
- [19] XU, Yan, Jinhui LI, Quanyin TAN, Anesia Lauren PETERS a Congren YANG. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*. 2018, 75, 450-458. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.01.036. ISSN 0956053X.
- [20] KIM, Youngjin a Jaeryeong LEE. Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012, 98, 317-322. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.11.022. ISSN 09270248.
- [21] KLUGMANN-RADZIEMSKA, Ewa a Piotr OSTROWSKI. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. *Renewable Energy*. 2010, 35(8), 1751-1759. DOI: 10.1016/j.renene.2009.11.031. ISSN 09601481.
- [22] Solar Photovoltaic Cell Basics. *ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY* [online]. Washington, DC: OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, 2013. <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/solar-photovoltaic-cell-basics>.
- [23] XIA, Mingchao, Xuanhu HE a Xiaoqing ZHANG. Design and Implementation of a Control Strategy for Microgrid Containing Renewable Energy Generations and Electric Vehicles. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013, 1-15. DOI: 10.1155/2013/686508. ISSN 1024-123X.
- [24] Calculate the solar cell efficiency. *InfinityPV*. Jyllinge, Denmark: infinityPV ApS, 2020. <https://infinitypv.com/learn/teacher-guides/solar-cell-efficiency?tmpl=print&learn-lan=>.
- [25] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika I*. Praha: Informatorium, 1995. ISBN 80-85427-72-9.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BMS	Battery management system
CPV	Koncentrační fotovoltaika
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
EOL	End of lifecycle
EPBT	Energy payback time
EROEI	Energy Returned on Energy Invested
FDM	Fused Deposition Modeling
FV	Fotovoltaické
I_{mp}	Current at maximum power (hodnota proudu při maximálním výkonu)
I_{sc}	Short Circuit Current (proud nakrátko)
VA	Voltampérová charakteristika
V_{mp}	Voltage at maximum power (napětí při maximálním výkonu)
V_{oc}	Open Circuit Voltage (napětí naprázdno)
OEEZ	Směrnice o odpadních elektrických a elektronických zařízeních
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PETG	Polyethylentereftalát glykol
PLA	Kyselina polyléčná

9 PŘÍLOHY

9.1 Naměřená data závislosti výkonu na napětí

A	Obr. 31
B	Obr. 32
C	Obr. 29
D	Obr. 28
E	Obr. 30

A		B		C		D		E	
Napětí	Výkon	Napětí	Výkon	Napětí	Výkon	Napětí	Výkon	Napětí	Výkon
0,00	0,02	0,00	0,00	0,91	0,25	5,91	1,55	0,00	0,000
0,00	0,02	0,00	0,00	0,89	0,26	3,02	0,80	0,00	0,000
0,00	0,02	0,00	0,00	0,95	0,27	3,08	0,81	0,00	0,000
0,00	0,02	0,00	0,00	0,97	0,27	3,13	0,79	0,00	0,000
0,10	0,02	0,10	0,02	1,61	0,44	3,18	0,84	0,00	0,000
0,10	0,02	0,10	0,02	1,61	0,45	3,20	0,82	0,00	0,000
0,12	0,02	0,12	0,02	1,63	0,45	3,66	0,93	0,00	0,000
0,11	0,02	0,12	0,02	1,65	0,45	3,69	0,92	0,00	0,000
0,11	0,02	0,13	0,02	1,69	0,45	3,66	0,85	0,00	0,000
0,16	0,02	0,17	0,02	1,61	0,45	3,71	0,93	0,09	0,001
0,17	0,03	0,16	0,03	1,65	0,46	3,68	0,88	0,12	0,001
0,20	0,03	0,20	0,03	3,29	0,97	3,67	0,84	0,11	0,001
0,24	0,04	0,24	0,04	3,35	0,93	3,74	0,83	0,13	0,001
0,20	0,03	0,20	0,03	3,40	0,92	3,65	0,90	0,14	0,002
0,20	0,03	0,20	0,03	3,42	0,91	4,61	1,18	0,14	0,002
0,19	0,03	0,23	0,03	3,85	1,09	4,98	1,25	0,16	0,002
0,27	0,03	0,28	0,03	3,94	1,02	4,88	1,11	0,17	0,002
0,22	0,03	0,23	0,03	4,71	1,20	4,80	1,09	0,15	0,002
0,25	0,04	0,24	0,04	5,13	1,30	6,00	1,32	0,14	0,002
0,17	0,03	0,19	0,03	5,24	1,27	6,18	1,33	0,15	0,002
0,16	0,02	0,17	0,02	5,87	1,46	6,22	1,40	0,12	0,001
1,58	0,24	1,59	0,26	6,00	1,53	6,72	1,53	1,63	0,016

1,59	0,21	1,59	0,22	6,78	1,72	6,87	1,47	2,14	0,021
1,63	0,22	1,70	0,23	6,82	1,63	7,02	1,58	2,43	0,022
2,96	0,35	2,83	0,37	6,93	1,63	7,06	1,62	3,35	0,031
3,48	0,47	3,48	0,50	6,94	1,55	7,11	1,56	3,79	0,035
3,46	0,44	3,48	0,47	6,90	1,47	7,49	1,49	3,87	0,035
3,27	0,41	3,50	0,44	6,91	1,57	7,41	1,37	4,76	0,041
4,98	0,70	4,98	0,75	7,03	1,52	8,33	1,71	5,21	0,046
5,05	0,61	5,00	0,65	7,25	1,54	8,39	1,75	5,27	0,044
5,59	0,85	5,55	0,91	8,18	1,71	8,66	1,85	5,32	0,044
6,43	0,80	6,41	0,85	8,25	1,79	8,98	1,73	6,59	0,054
6,42	0,92	6,43	0,98	8,26	1,84	9,33	1,85	6,80	0,054
6,96	0,94	6,97	1,00	8,46	1,81	9,48	2,04	7,01	0,058
6,98	0,91	6,98	0,97	8,75	1,75	10,07	1,86	7,00	0,054
6,98	0,77	6,98	0,82	9,07	1,89	10,11	1,95	7,03	0,056
7,06	0,97	7,06	1,03	9,44	1,94	10,22	2,10	6,93	0,057
8,53	1,27	7,92	1,35	9,49	2,03	10,56	2,14	8,44	0,065
8,58	1,17	8,58	1,25	9,55	1,87	10,90	2,08	8,50	0,062
8,61	1,23	8,71	1,31	9,84	2,00	11,15	1,84	8,42	0,065
8,28	1,26	8,32	1,34	10,18	1,78	11,93	2,49	8,09	0,067
8,27	1,28	8,37	1,36	10,50	2,09	12,27	2,37	8,05	0,065
8,22	1,22	8,11	1,30	10,86	1,95	12,61	2,44	8,06	0,065
8,51	1,13	8,54	1,20	10,94	2,07	12,80	2,54	8,05	0,065
10,37	1,43	9,54	1,52	10,94	2,02	13,05	2,84	10,04	0,071
10,53	1,31	10,43	1,40	11,72	2,22	13,68	2,89	10,40	0,078
10,79	1,24	10,69	1,32	11,91	2,28	13,72	2,56	10,42	0,073
10,27	1,46	10,37	1,55	12,30	2,46	14,01	2,42	10,52	0,076
12,78	1,74	11,43	1,85	12,61	2,26	16,06	3,04	11,89	0,086
13,06	1,90	12,82	2,02	12,79	2,34	16,10	3,16	12,04	0,079
13,31	1,60	12,97	1,70	12,98	2,39	16,45	2,83	12,12	0,080
12,59	1,92	12,60	2,04	13,12	2,30	16,64	3,20	12,18	0,081
14,23	2,05	13,54	2,18	14,36	2,83	16,61	3,09	12,37	0,086
14,47	1,82	14,48	1,94	14,51	2,61	16,94	2,94	12,97	0,087

16,75	2,10	16,81	2,24	14,74	2,53	17,37	2,94	14,25	0,078
17,09	1,94	17,09	2,07	15,32	2,68	17,79	3,64	14,67	0,085
17,77	2,38	18,79	2,53	14,99	3,17	16,49	3,49	15,19	0,094
17,83	2,20	17,92	2,34	16,25	3,08	16,51	3,52	15,29	0,096
18,11	2,26	18,14	2,41	16,61	3,04	19,15	3,06	15,46	0,098
18,91	2,42	18,91	2,58	16,96	3,23	19,27	3,45	15,56	0,087
19,16	2,14	19,20	2,28	17,08	3,28	19,96	3,05	15,55	0,104
18,93	2,72	19,43	2,90	17,10	3,25	19,64	3,81	14,97	0,106
20,36	2,53	20,31	2,69	17,44	2,82	19,35	3,15	14,97	0,107
20,66	2,98	20,56	3,17	17,85	3,49	19,67	3,54	15,03	0,109
20,99	2,90	21,00	3,09	18,18	3,43	20,07	2,54	17,24	0,116
20,79	2,77	21,10	2,95	18,23	3,35	19,70	2,72	17,41	0,111
21,28	2,87	21,28	3,06	18,58	3,43	20,08	3,03	17,71	0,108
21,79	2,85	21,79	3,04	19,01	3,43	20,34	2,71	18,09	0,091
23,17	3,49	23,22	3,72	19,23	3,39	20,16	3,42	18,78	0,114
23,37	3,37	23,46	3,59	19,52	3,35	18,98	3,27	18,98	0,106
23,78	3,58	23,87	3,81	19,35	3,54	19,92	2,86	19,23	0,114
24,16	3,26	24,13	3,47	18,95	3,85	20,20	2,86	19,49	0,106
24,63	3,62	24,73	3,86	18,60	3,85	20,46	2,48	19,81	0,127
24,90	3,39	24,89	3,61	18,98	3,57	20,95	3,40	18,86	0,127
24,17	3,75	24,27	3,99	19,27	3,57	20,04	2,97	18,88	0,130
24,12	3,90	24,22	4,15	19,28	3,46	20,38	3,15	18,91	0,127
26,19	3,70	26,84	3,94	19,34	3,59	20,70	2,95	18,70	0,125
26,67	3,69	26,87	3,93	19,67	3,89	21,88	3,49	20,60	0,110
28,51	3,78	28,43	4,03	19,59	3,16	22,60	2,09	16,96	0,093
29,07	4,09	29,17	4,36	19,22	3,58	23,58	1,09	20,69	0,100
28,63	4,18	28,73	4,45	18,79	3,69	23,32	3,63	20,94	0,093
29,61	4,06	29,61	4,32	18,85	3,54	19,22	3,36	20,94	0,101
29,46	4,31	29,56	4,59	19,63	3,03	19,30	3,06	21,03	0,111
30,09	4,33	30,11	4,61	19,84	2,94	20,36	2,45	21,39	0,116
30,46	4,21	30,36	4,48	20,23	2,78	20,79	2,12	20,19	0,122
30,52	4,08	30,42	4,35	20,00	2,81	21,22	2,23	20,90	0,105

31,05	4,15	31,50	4,42	20,25	2,51	21,00	2,84	21,07	0,100
29,59	4,60	30,45	4,90	19,59	3,23	20,54	2,25	21,37	0,106
31,45	4,16	31,35	4,43	19,14	3,06	20,78	2,24	20,40	0,113
32,08	4,10	32,18	4,37	19,22	3,14	21,17	2,30	21,21	0,094
30,24	4,58	30,34	4,88	19,87	2,07	22,46	2,89	21,52	0,102
30,50	4,40	30,57	4,69	20,07	2,44	21,00	2,14	20,51	0,108
30,51	4,60	30,41	4,90	20,03	2,54	21,28	2,33	20,51	0,110
33,82	4,63	33,72	4,93	20,39	2,40	22,12	2,82	20,51	0,100
34,35	4,50	34,41	4,79	20,62	1,88	19,79	2,87	21,39	0,087
35,21	5,17	35,26	5,51	20,05	2,50	20,79	2,01	21,76	0,106
35,66	5,07	35,67	5,40	19,66	2,97	21,04	1,76	20,59	0,105
33,71	4,99	33,81	5,31	19,23	2,90	21,55	1,76	20,62	0,107
33,89	4,70	33,79	4,76	19,97	2,45	22,88	2,99	21,42	0,079
33,60	5,08	33,58	5,15	20,34	2,44	20,92	1,86	21,64	0,077
33,95	4,45	33,85	4,51	20,59	2,01	21,28	2,26	20,70	0,100
34,71	4,61	33,71	4,67	19,70	2,75	21,64	1,54	20,69	0,098
33,98	4,79	33,92	4,85	20,40	1,92	22,88	2,70	20,80	0,098
34,43	4,37	34,54	4,43	20,64	2,47	19,95	2,61	21,76	0,093
33,74	4,54	33,84	4,60	19,82	2,85	21,03	1,96	20,77	0,094
34,20	5,04	34,30	5,11	19,44	2,77	21,30	1,75	20,77	0,093
33,99	5,10	34,00	5,17	20,34	2,07	21,82	1,20	20,78	0,092
33,82	5,16	33,90	5,23	20,52	2,11	21,91	2,44	21,67	0,082
34,52	4,70	34,72	4,76	19,91	2,74	21,32	1,60	21,91	0,079
34,03	5,08	34,23	5,15	19,50	2,60	21,73	2,16	20,83	0,090
33,77	5,39	33,87	5,46	20,20	2,04	23,30	2,58	20,84	0,089
33,96	5,26	34,01	5,33	20,59	1,97	20,05	2,14	21,85	0,076
34,79	5,08	34,69	5,15	19,97	2,57	20,99	1,86	22,17	0,074
33,78	5,13	33,88	5,20	19,54	2,63	21,30	1,82	20,89	0,084
33,70	5,19	33,69	5,26	20,25	2,17	21,70	1,27	20,98	0,087
33,72	5,20	33,71	5,27	20,55	1,88	21,65	2,59	22,20	0,068
33,65	4,88	33,64	4,95	20,84	1,63	21,34	2,05	21,13	0,083
33,99	4,95	33,98	5,02	19,90	2,42	21,53	1,51	21,13	0,082

33,79	4,99	33,89	5,06	20,65	1,76	21,9	1,82	21,11	0,086
33,90	5,30	33,85	5,37	20,04	2,32	23,36	2,53	21,70	0,059
34,62	5,01	34,59	5,08	19,56	2,29	21,14	2,04	22,04	0,061
33,87	5,54	33,88	5,61	19,61	2,30	21,47	1,50	20,82	0,073
33,73	5,36	33,83	5,43	20,43	1,92	22,16	1,65	20,90	0,076
33,94	5,31	33,96	5,38	20,73	1,92	22,78	2,42	21,86	0,057
34,07	5,36	34,17	5,43	20,12	2,42	20,17	2,21	22,19	0,067
34,04	5,27	34,14	5,34	19,62	2,23	21,31	1,44	21,00	0,075
33,95	5,49	33,91	5,56	20,48	1,81	21,71	1,46	21,11	0,079
34,35	5,13	34,41	5,20	20,81	1,56	23,35	2,26	22,22	0,070
33,99	5,35	33,98	5,42	20,68	1,70	20,36	2,25	21,10	0,072
34,28	5,29	34,31	5,36	20,61	1,69	21,34	1,88	21,05	0,076
33,97	5,56	33,95	5,63	20,95	1,57	21,82	0,90	21,11	0,077
34,42	5,46	34,51	5,53	20,04	2,05	22,22	1,80	21,06	0,073
34,33	5,55	34,43	5,62	19,72	1,95	20,34	2,02	22,27	0,062
34,48	5,51	34,63	5,58	19,84	2,03	21,03	1,90	21,06	0,069
34,67	4,91	34,58	4,98	20,58	1,87	21,39	1,79	21,14	0,067
34,38	5,25	34,40	5,32	20,90	1,68	21,92	0,90	21,10	0,074
35,10	4,28	35,15	4,34	20,27	2,55	22,08	1,83	22,35	0,057
35,35	4,90	35,37	4,97	19,75	2,15	20,35	1,85	21,11	0,065
36,03	4,76	36,05	4,82	20,50	1,88	21,25	1,58	21,14	0,062
34,03	5,53	34,15	5,60	20,89	1,49	21,75	1,34	21,25	0,067
35,01	5,10	35,00	5,17	20,56	1,97	22,09	1,34	21,14	0,064
35,10	5,48	35,20	5,55	19,79	1,93	22,04	2,18	22,30	0,052
35,57	4,84	35,61	4,91	20,51	1,71	21,33	1,70	21,15	0,061
35,32	5,15	35,21	5,22	20,67	1,39	21,72	1,14	21,20	0,065
35,85	4,93	35,81	5,00	20,65	1,33	22,05	0,98	21,15	0,062
35,46	5,55	34,43	5,62	20,66	1,60	22,07	1,97	22,51	0,045
35,41	5,75	35,31	5,83	20,80	1,55	21,51	1,65	21,19	0,065
35,61	5,70	35,64	5,78	20,78	1,93	22,10	1,46	21,27	0,066
35,66	5,33	35,56	5,40	21,15	1,62	22,14	1,20	21,21	0,063
35,84	5,42	35,84	5,49	19,93	2,08	21,62	2,23	25,66	0,063

36,09	4,90	36,10	4,97	20,76	1,53	21,45	1,44	21,13	0,067
36,00	5,65	36,00	5,73	21,08	1,51	21,93	1,49	21,37	0,062
35,59	5,53	35,60	5,60	20,36	2,21	23,37	2,18	21,22	0,062
35,83	5,77	35,93	5,85	19,91	2,24	20,48	2,00	25,65	0,062
35,60	5,88	35,70	5,96	20,75	1,41	21,31	1,62	21,12	0,058
36,08	5,86	36,01	5,94	20,97	1,48	21,90	1,25	21,18	0,060
35,84	5,52	35,81	5,59	20,33	1,99	22,10	1,34	21,20	0,063
35,90	5,58	35,85	5,66	19,92	2,16	23,36	2,11	25,55	0,011
36,38	4,95	36,40	5,02	20,77	1,59	21,54	1,83	21,12	0,063
35,99	5,24	36,00	4,30	21,00	1,49	21,93	1,66	21,16	0,062
36,07	5,48	36,08	4,54	20,9	1,48	22,29	1,79	21,20	0,063
35,60	5,15	35,61	4,21	20,16	2,13	20,40	2,09	25,54	0,063
35,48	5,33	35,49	4,39	20,75	1,63	20,40	1,95	21,16	0,067
35,34	5,45	35,44	4,50	21,07	1,76	21,4	0,82	21,19	0,063
35,83	5,49	35,84	4,55	20,38	2,16	21,85	0,84	21,32	0,063
35,80	5,81	35,90	4,86	20,1	2,05	22,38	0,73	25,50	0,011
36,08	4,43	36,11	4,47	20,87	1,18	21,81	1,81	21,16	0,065
35,77	4,85	35,87	4,89	21,09	1,40	21,87	0,41	21,16	0,065
35,48	4,78	35,51	4,82	21,43	1,24	22,52	0,63	21,23	0,065
35,19	4,23	35,22	4,46	20,47	1,99	22,38	1,38	25,48	0,065
35,61	4,47	35,63	4,60	21,17	1,77	20,65	1,56	21,09	0,063
35,48	4,33	35,58	4,45	20,58	2,00	21,83	0,73	21,15	0,060
36,01	4,77	36,00	4,79	20,06	2,06	22,10	0,23	21,16	0,065
36,50	4,32	36,40	4,45	20,09	2,06	22,49	1,14	25,46	0,065
37,37	4,32	37,47	4,45	20,65	1,75	20,68	1,34	21,09	0,067
36,51	4,01	36,41	4,04	20,78	1,53	22,08	0,79	21,39	0,065
36,43	4,02	36,33	4,04	20,97	1,63	22,45	0,77	21,42	0,064
36,41	4,00	36,31	4,04	20,97	1,58	23,89	1,19	21,78	0,011