

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra fyziky**



**Česká zemědělská  
univerzita v Praze**

**Disertační práce**

**Studium akumulace energie z fotovoltaických panelů**

**Školitel: doc. Ing. Vladislav Poulek, CSc**

**Doktorand: Ing. Jana Šafránková**



### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že tuto disertační práci s názvem "Studium akumulace energie z fotovoltaických panelů" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

V Praze dne

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu katedry, prof. Ing. Martinu Librovi, CSc. a svému školiteli, doc. Ing. Vladislavu Poulkovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly zpracovat teze této disertační práce. Dále děkuji celé katedře fyziky za milé přijetí do jejich řad a také své rodině a partnerovi za jejich vstřícnost, chápavost, podporu a lásku.

## **Abstrakt**

Tato disertační práce s názvem "Studium akumulace energie z fotovoltaických panelů" obsahuje teze disertační práce a vlastní výsledky. Teze se zabývají čím dál populárnějším tématem fotovoltaiky u nás i ve světě, od charakteristiky a konstrukce článku, až po běžně využívané fotovoltaické systémy využívané v našich i světových podmínkách. V kapitole "Vlastní výsledky" je podrobně popsán a zhodnocen výzkum doktorandky, na kterém se nejen podílela, ale i který sama aktivně vykonávala.

**Klíčová slova:** akumulace energie, fotovoltaický článek, fotovoltaika, monitoring, ostrovní fotovoltaický systém

## **Abstract**

This doctoral thesis with the title "Energy accumulation from FV panels" contain a dissertation theses and the results. Theses deal with the increasingly popular topic of photovoltaics in our country and in the world, from the characteristics and construction of the cell to commonly used photovoltaic systems used in our country and the world. The chapter "Results " describes in detail and evaluates the current research of the PhD student, to which other shares apply, but also which she actively conducts.

Keywords: energy accumulation, photovoltaic cell, photovoltaics, monitoring, off-grid system

# Obsah

1 Úvod .....	1
2 Cíle disertační práce a stanovení hypotéz.....	6
3 Akumulace energie .....	7
3. 1 Chemický princip akumulace energie.....	8
3.1.1 Olověné akumulátory .....	8
3.1.2 Lithiové akumulátory .....	9
3.1.3 Redoxní a vanadové redoxní průtokové baterie .....	10
3.1.4 Ni-Cd akumulátory .....	11
3.1.5 Kondenzátory.....	11
3.1.6 Superkondenzátory.....	11
3.2 Fyzikální princip akumulace energie.....	12
3.2.1 Setrvačníky .....	12
3.2.2 Přečerpávací elektrárny .....	13
3.2.3 Stlačený vzduch .....	14
3.3 Fyzikálně – mechanický princip akumulace energie .....	15
3.3.1 Kapalný vzduch .....	15
3.3.2 Vodíkové hospodářství.....	16
4 Stav problematiky.....	17
4.1 Zákony, předpisy a daňová problematika .....	17
4.2 Fotovoltaické články.....	18
4.3 Fotovoltaické panely.....	20
4.3.1 Fotovoltaické panely na bázi monokrystalického křemíku.....	21
4.3.2 Fotovoltaické panely na bázi polykrystalického křemíku.....	22
4.3.3 Fotovoltaické panely na bázi amorfního křemíku .....	22
4.3.4 Fotovoltaické panely na bázi perovskitů .....	23
4.4 Důležité charakteristiky fotovoltaických panelů .....	24
4.4.1 $U$ - $A$ charakteristiky fotovoltaických článků.....	24
4.4.2 Vliv teploty na charakteristiky FV panelů.....	26
4.4.3 Vliv lokace na FV panely .....	26
4.4.4 Vliv poškození FV panelů .....	27
4.5 Ekonomický pohled na fotovoltaiku.....	28
4.6 Materiály použité při konstrukci fotovoltaických panelů .....	28
4.7 Fotovoltaický systém .....	32

5 Vlastní výsledky a diskuse.....	36
5.1 Poškození fotovoltaických panelů a fotovoltaických měničů způsobených delaminací hran, proniknutím vody a vysokým napětím ve stringách v mírném klimatu .....	36
5.2 Fotovoltaický panel s akumulací energie – kompaktní jednotka .....	43
5.3 Provoz FV systému v Praze a vyhodnocení dat .....	48
5.4 Autonomní FV systém s akumulací energie v Panenských Břežanech .....	53
5.5 Návrh a monitorování dat z fotovoltaické elektrárny na jižní polokouli .....	56
6 Závěr .....	60
6.1 Poškození fotovoltaických panelů a fotovoltaických měničů způsobených delaminací hran, proniknutím vody a vysokým napětím ve stringách v mírném klimatu .....	60
6.2 Fotovoltaický panel s akumulací energie – kompaktní jednotka .....	60
6.3 Provoz FV systému v Praze a vyhodnocení dat .....	61
6.4 Autonomní FV systém s akumulací energie v Panenských Břežanech .....	62
6.5 Návrh a monitorování dat z fotovoltaické elektrárny na jižní polokouli .....	62
Citovaná literatura .....	64

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Spektrum elektromagnetického záření .....	2
Obrázek 2 Fotovoltaické panely.....	3
Obrázek 3 Roční úhrn slunečního záření v České republice (údaje jsou uvedené v $W.m^{-2}$ ).....	4
Obrázek 4 Výroba elektřiny (údaje v GWh).....	5
Obrázek 5 Olověný akumulátor .....	8
Obrázek 6 Lithiový akumulátor .....	9
Obrázek 7 Princip redoxních průtokových akumulátorů.....	10
Obrázek 8 Systém s použitými Ni-Cd akumulátory.....	11
Obrázek 9 Princip superkondenzátorů.....	11
Obrázek 10 Setrvačnick.....	12
Obrázek 11 Schéma přečerpávací elektrárny.....	14
Obrázek 12 Schéma systému CAES.....	15
Obrázek 13 Princip systému LAES.....	16
Obrázek 14 Fotovoltaické panely.....	17
Obrázek 15 Schéma fotovoltaického článku na bázi křemíku.....	18
Obrázek 16 Schéma principu polovodičové diody .....	20
Obrázek 17 Schematická značka polovodičové diody .....	20
Obrázek 18 Řez fotovoltaickým panelem.....	21
Obrázek 19 Schematická značka fotovoltaického panelu .....	21
Obrázek 20 FV panel na bázi monokrystalického křemíku.....	22
Obrázek 21 FV panel na bázi polykrystalického křemíku.....	22
Obrázek 22 FV panel na bázi amorfního křemíku .....	22
Obrázek 23 FV panel na bázi perovskitů.....	23
Obrázek 24 U-I charakteristika fotovoltaického článku.....	24
Obrázek 25 Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou.....	25
Obrázek 26 U-I charakteristiky při různých teplotách a konstantním záření .....	26
Obrázek 27 Řez fotovoltaickým panelem s články zapouzdřenými v EVA.....	29
Obrázek 28 Řez fotovoltaickým panelem s polysiloxanovým zapouzdřením.....	30
Obrázek 29 Schéma komponentů fotovoltaického systému .....	32
Obrázek 30 Znázornění On-grid systému.....	33
Obrázek 31 Off-grid systém.....	33
Obrázek 32 Hybridní systém.....	34
Obrázek 33 Delaminace mezi sklem předního krytu a zapouzdřením - a) Počáteční stav, b) Masivní delaminace .....	38
Obrázek 34 Ukázka delaminace hran 4. typu .....	38
Obrázek 35 Ukázka delaminace hran .....	38
Obrázek 36 Delaminační vodivý kanál mezi sběrníci a rámem.....	39
Obrázek 37 Detail dalšího delaminačního kanálu.....	39
Obrázek 38 Roční počet poruch FV panelů v lokalitě Tuřany .....	40
Obrázek 39 Roční počet poruch FV panelů v lokalitě Broumov .....	41
Obrázek 40 Počet poruch měničů v FVE Měnin .....	41
Obrázek 41 Počet zničených měničů v FVE Měnin.....	42
Obrázek 42 Zničený měnič SMA.....	42
Obrázek 43 Fotovoltaický panel s integrovanými lithiovými akumulátory .....	44



Obrázek 44 Schéma paralelního a sériového uspořádání akumulátorů vzhledem k desce chladičího profilu .....	45
Obrázek 45 Průřez panelem naší konstrukce .....	45
Obrázek 46 Teploty fotovoltaických panelů během letního dne 28. června .....	46
Obrázek 47 Maximální denní teplota FV panelů s integrovanými lithiovými akumulátory oproti teplotě okolí během jednoho roku.....	47
Obrázek 48 Teploty fotovoltaického panelu, lithiových baterií a okolí během ročního pozorování.....	47
Obrázek 49 Síťový fotovoltaický systém instalovaný na střeše Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze .....	48
Obrázek 50 Schéma fotovoltaického systému ukazující úhel dopadu přímého slunečního záření v poledne během vybraných dní .....	49
Obrázek 51 Množství vyrobené elektřiny, vyrobené v letech 2016-2019, vypočítané na 1 kWp instalovaného výkonu .....	49
Obrázek 52 Závislost horizontální intenzity záření a okamžitého výkonu na čase .....	51
Obrázek 53 Závislost teploty fotovoltaických panelů a teploty vzduchu na čase.....	52
Obrázek 54 FV panel aplikovaný v Panenských Břežanech .....	53
Obrázek 55 Baterie Tesla.....	54
Obrázek 56 Blokové schéma fotovoltaického systému .....	54
Obrázek 57 Časová závislost napětí baterie, proudu zdroje a intenzity záření během letních dní .....	55
Obrázek 58 Časová závislost napětí baterie, proudu zdroje a intenzity záření během zimních dní .....	55
Obrázek 59 Fotovoltaický systém v Chile.....	56
Obrázek 60 Fotovoltaický systém na střeše Technické fakulty .....	57
Obrázek 61 Fotovoltaický systém v Praze - Vršovicích.....	57
Obrázek 62 Porovnání množství vyrobené elektrické energie ze tří FVE během roku .....	58
Obrázek 63 Množství vyrobené elektrické energie ve 13 FVE .....	59

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Srovnání vlastností materiálů .....	30
Tabulka 2 Množství závad FV panelů způsobených delaminací ve vybraných FVE instalovaných v roce 2009 v České republice .....	40
Tabulka 3 Počet opožděných zapnutí měničů před a po utěsnění rámu FV panelu.....	43
Tabulka 4 Odhadované množství elektřiny vyrobené za rok.....	50
Tabulka 5 Naměřené a vypočtené hodnoty důležitých parametrů a konečný vypočítaný rozdíl výstupního výkonu v poledne ve slunečný den.....	50
Tabulka 6 Fotovoltaický systém v Cuz Cuz (Chile) .....	56
Tabulka 7 Fotovoltaický systém v Praze 6 – Suchdole .....	57
Tabulka 8 Fotovoltaický systém v Praze – Vršovice .....	57

## Seznam použitých zkratk

Zkratky jsou uvedeny a vysvětleny vždy v textu.

# 1 Úvod

Trend fotovoltaiky se v současné době neustále zvyšuje. Je to způsobeno čím dál větší poptávkou po obnovitelných zdrojích, protože se neustále zvyšuje počet obyvatel. Hlavním požadavkem je, aby tyto zdroje energie nezatěžovaly tolik naši planetu.

Naším nejvíce využívaným zdrojem obnovitelné energie je Slunce, které je staré přibližně 4,5 miliardy let. Na Zemi dopadají tři druhy záření, a to přímé, difúzní cirkumsolání a difúzní izotropní. Výkon Slunce činí  $3,9 \cdot 10^{26}$  W a spočítá se z následujícího vztahu (1.1):

$$P_s = M_e \cdot 4\pi r_s^2 \quad [\text{W}] \quad (1.1)$$

kde:

$M_e = 6,42 \cdot 10^7$  W.m<sup>-2</sup>, vyzařování černého tělesa závislé na efektivní teplotě fotosféry [W.m<sup>-2</sup>]

$r_s = 6,96 \cdot 10^8$  m, což je poloměr Slunce [m]

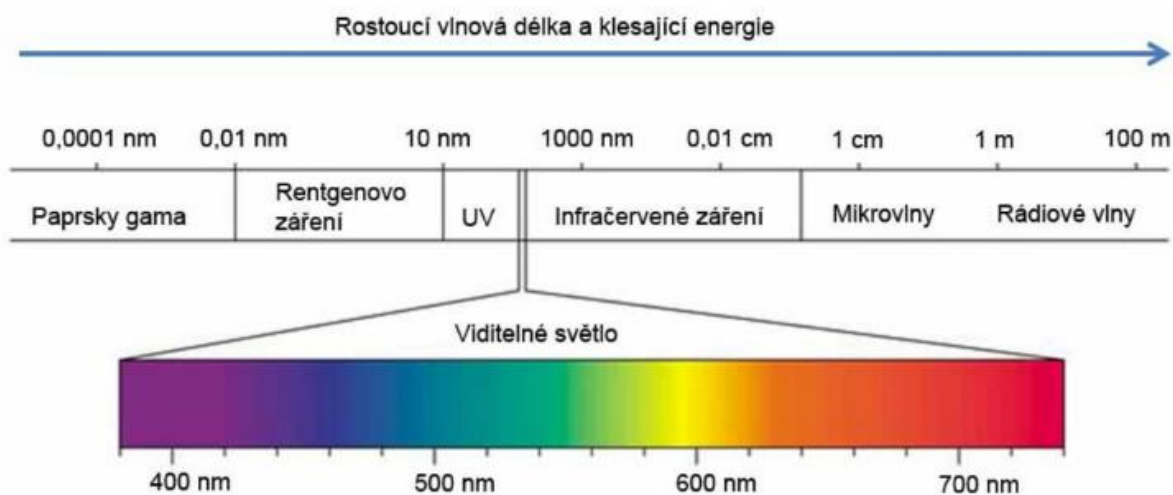
Protože je solární energie jedním z nejrychleji rostoucích zdrojů energie ve světě, využívá se pro mnoho aplikací. Příklady aplikací fotovoltaiky:

- provoz vesmírných satelitů,
- dodávka elektrické energie do rozvodné sítě,
- solární lampy,
- parkovací automaty,
- dopravní značky,
- nabíjecí stanice,
- solární autobusy,
- elektrické automobily,
- solární sušení k rychlejšímu usušení plodin,
- letecký průmysl,
- stanice tísňového volání.

V současné době jsou nejvíce úspěšné státy na poli solární energetiky Čína společně s USA, které dohromady tvoří téměř 2/3 světové produkce energie. Kapacita solární energie se za posledních pět let zvýšila přibližně o 60 % a dokonce v roce 2018 stoupla na 485,82 GW.

Mezi největší fotovoltaické elektrárny na světě patří Tengger Desert Solar Park v Číně, Sweihan Photovoltaic Independent Power Project ve Spojených arabských emirátech, Yanchi Ningxia Solar Park v Číně, Datong Solar Power Top Runner Base opět v Číně a Kurnool Ultra Mega Solar Park v Indii. Největším producentem fotovoltaických článků a modulů je Čína, která na poli solární energetiky prošla velkým rozmachem, čemuž odpovídá i množství FVE na jejím území. Dříve byla čínská fotovoltaika zaměřena pouze na venkov a nyní Čína zabírá přední příčky v produkci na světě. (Power Technology, 2020) (Chaudhary & kol., 2019)

Základy fotovoltaiky byly položeny již začátkem 19. století. Stavěly na teorii elektromagnetického pole, kterou definoval skotský fyzik James Clerk Maxwell. Ten roku 1865 formuloval teorii, že světlo je v podstatě elektromagnetické záření, které se šíří ve vakuu rychlostí  $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  což je největší rychlost, kterou světlo může dosáhnout. Je prokázáno, že sluneční energie se do okolního prostředí přenáší hlavně elektromagnetickým zářením různých vlnových délek. Viditelné spektrum se pohybuje mezi 380 nm až 760 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) a jak je vidět z obr. 1, každé vlnové délce viditelného spektra odpovídá určitá barva. Právě proto se nám světlo jeví jako bílé, protože je složeno ze spojitého spektra všech těchto barev.



Obrázek 1 Spektrum elektromagnetického záření

Zdroj: Gymnázium Brno, Křenová

Obr. 1 zobrazuje spektrum elektromagnetického záření. Je obecně známo, že čím vyšší je energie fotonů, tím menší je pak vlnová délka záření. Právě proto je záření gama považováno za záření s nejkratší vlnovou délkou, ale s největší energií fotonů. Naopak nejdelší vlnovou délkou jsou charakteristické rádiové vlny, které mají nejmenší energii fotonů. Proces, který

umožňuje přímou přeměnu elektromagnetického záření na elektrickou energii se nazývá fotovoltaický jev, jehož princip byl popsán už v roce 1839 Alexanderem Edmondem Becquerelem. Zjistil, že proud vzniklý mezi kovovými elektrodami, které jsou ponořeny v roztoku, se mění závisle na intenzitě osvětlení. Tento objev umožňoval využít fotony k přeměně na energii.

Další objev měl na svědomí Heinrich Rudolf Hertz, který prokázal závislost elektřiny a světla. Dokázal, že elektrický výboj ve vzduchu vznikne snadněji v případě, že na elektrody dopadá ultrafialové záření.

Princip fotoelektrického jevu byl popsán Albertem Einsteinem z roku 1905, který navazoval na kvantovou teorii M.K.E.L. Plancka. Za tuto teorii obdržel A. Einstein v roce 1921 Nobelovu cenu za fyziku.

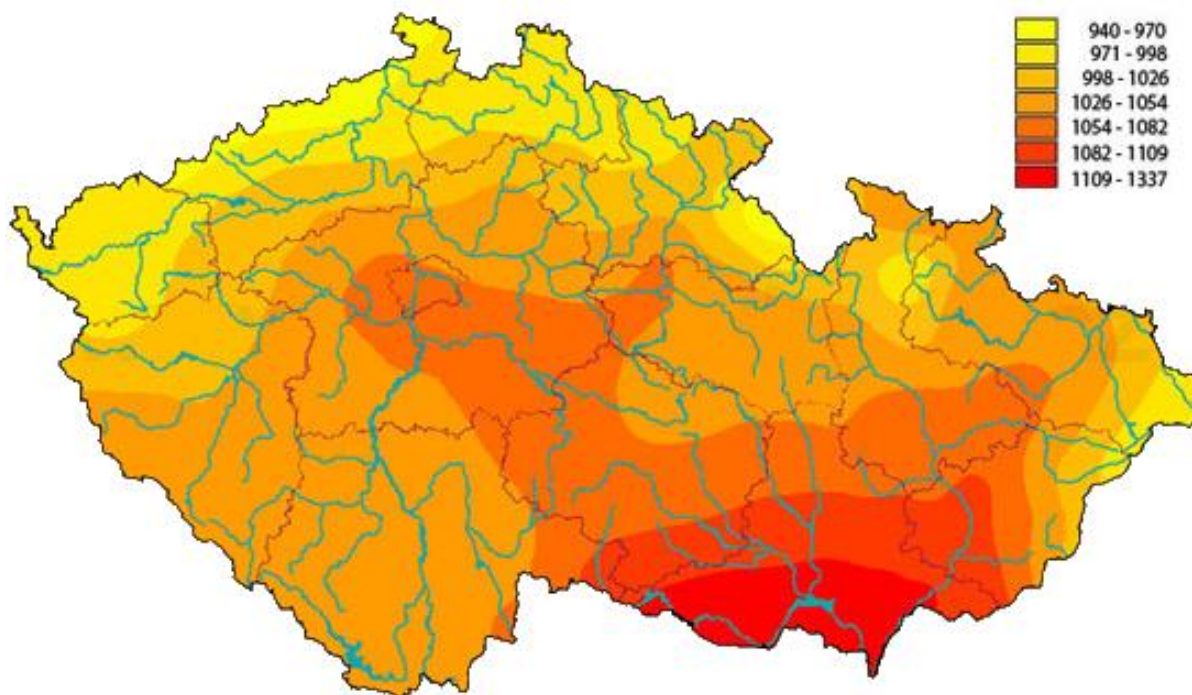
V současné době dochází k tomuto jevu v polovodičových fotovoltaických článcích, které tvoří základ fotovoltaických panelů viz obr. 2. Tyto panely by neměly produkovat škodliviny ani hluk, vyznačují se dlouhou životností a lze je spojovat do různých celků.



*Obrázek 2 Fotovoltaické panely*

*Zdroj: Victronenergy.com*

Na vliv dopadajícího elektromagnetického záření má vliv zeměpisná poloha, orientace FV systému vzhledem ke Slunci, celková doba slunečního svitu, nadmořská výška a také čistota ovzduší v místě uložení FV panelu. Podmínky v České republice jsou vcelku příznivé, jak ukazuje obr. 3, a proto naše zeměpisná poloha dovoluje kvalitní využití fotovoltaických panelů, jelikož celková doba svitu bez oblačnosti je mezi 1400-1700 hodin.rok<sup>-1</sup>. (Isofen Energy, 2009)



Obrázek 3 Roční úhrn slunečního záření v České republice (údaje jsou uvedené v  $W.m^{-2}$ )

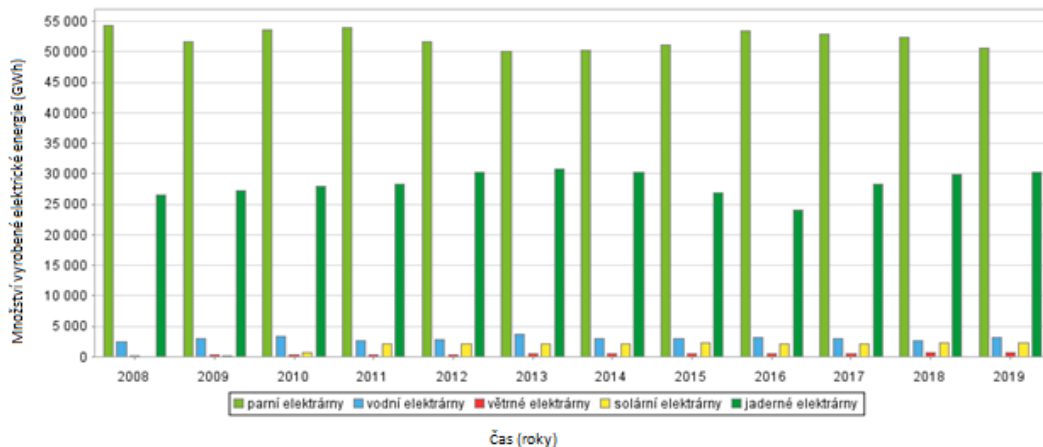
Zdroj: Isofenenergy.cz

Počátky fotovoltaiky v České republice sahají do roku 1998, kdy byla instalována první pokusná fotovoltaická elektrárna v Jeseníkách na hoře Mravenečník a později přemístěna do areálu JE Dukovany. Prudký vývoj toto odvětví zaznamenalo až ve 21. století, kdy se zvýšil tlak na využívání obnovitelných zdrojů energie. Fotovoltaika zažila v České republice během následujících let velký rozmach. Bylo to způsobeno hlavně dotacemi a snahou co nejvíce využít obnovitelné zdroje.

Dle dat k 31.12. 2020 počet Fotovoltaických elektráren na území České republiky činil 41 634. Jejich celkový výkon čítal 2226,8 MW<sub>p</sub>, kdy elektrárny vyrobily 2270 GWh elektřiny. Jen za minulý rok 2020 díky programu Nová zelená úsporám (NZÚ) vzniklo kolem pěti tisíc solárních střešních aplikací. Což je velmi zajímavé vzhledem k již probíhající pandemii COVID-19, kdy byly ochromeny téměř všechny odvětví ekonomiky a průmyslu.

Nejenže tedy v ČR vznikly komerční instalace na střechách podniků, ale velké zastoupení mají i instalace na rodinných domech. Dokonce dle plánu vlády má být navýšen do roku 2030 výkon FVE na téměř 4000 MW<sub>p</sub>. To je nutné i z toho důvodu, že EU v roce 2020 zvýšila cíl pro snížení emisí, a proto bude muset Česká republika zvýšit své úsilí v ochraně klimatu, kde se jeví právě fotovoltaika jako velmi perspektivní.

Následující obr. 4 znázorňuje výrobu elektřiny od roku 2008 až do roku 2019 a porovnává množství vyrobené elektřiny v elektrárnách různých typů, a to hlavně elektrárny parní, vodní, větrné, solární a jaderné. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1, dostupnost a výkon solární energie a potažmo FV panelů závisí na mnoha faktorech. Mezi tyto faktory patří: zeměpisná šířka, roční doba, vnější vlivy – počasí a sklon plochy, na které by měl FV či FVE být instalován. (Krčmář, 2021)



Obrázek 4 Výroba elektřiny (údaje v GWh)

Zdroj: Český statistický úřad

Když se zabýváme touto problematikou na území ČR, je nutné zmínit také největší FVE na území České republiky. Mezi největší patří fotovoltaická elektrárny Ralsko Ra 1, dále fotovoltaická elektrárna Vepřek, FVE Ševětín, FVE Brno – Letiště Tuřany, FVE Mimoň Ra 3, FVE Vranovská Ves, FVE Stříbro, FVE ŽV – SUN, FVE Uherský Brod a FVE Chrudichromy. (Fotovoltaickepanely.eu, 2012)

## 2 Cíle disertační práce a stanovení hypotéz

Tato disertační práce se skládá z následujících cílů, které přímo definují zadané téma akumulace energie z fotovoltaických panelů.

- výzkum nabíjecích a vybíjecích charakteristik elektrochemických akumulátorů;
- výzkum důležitých charakteristik FV panelů;
- konstrukce ostrovního FV systému s elektrochemickým akumulátorem energie.

Stanovení hypotéz:

- Fotovoltaické panely jsou schopny provozu 20 let;
- Fotovoltaický panel s akumulací energie neboli kompaktní jednotka může být zkonstruován tak, aby se baterie nepřehřívala.



### 3 Akumulace energie

Potenciál energie z obnovitelných zdrojů je nesporný. Mnoho společností se nyní touto problematikou zabývá. Akumulace energie umožňuje, aby dnešní elektrický systém fungoval efektivněji. Pokud je použit, tak zabezpečuje nižší ceny za spotřebu energie ze sítě a také méně emisí. Energie z obnovitelných zdrojů, v našem případě solární energie je ale přerušovaná. To znamená, že energie vzniká, když na FV panely dopadá solární záření. Ukládání solární energie řeší hlavní problém, co dělat, když slunce už zapadlo. Avšak ukládání energie pro použití ve vhodný čas je pouze jednou z mnoha aplikací sloužící k akumulaci energie. Nejenom, že tedy solární energie slouží k provozu spotřebičů, dá se použít i na ohřev vody, pro svícení, topení, ale jsou známy i případy využití této energie na zabezpečovací systémy. Ale obecně však platí, že elektrická energie musí být převedena do jiné formy energie, aby mohla být uskladněna.

Existuje mnoho možností pro ukládání elektrické energie vyrobené ze Slunce. Některé možnosti jsou velmi efektivní a výkonné, jiné naopak jsou svou aplikací tak specifické, že se nehodí všude. Na aplikace akumulace energie jsou kladeny různé požadavky, které jsou dost specifické a které záleží individuálně na provozovateli.

Mezi tyto požadavky patří kapacita úložiště v kWh, maximální výkon, doba, po kterou se energie dá uchovat, ztráty energie, účinnost a její závislost na čase, samozřejmě investiční náklady na pořízení takovýchto aplikací, životnost zařízení a také bezpečnost provozu pro okolí a životní prostředí. (Energy Storage Association, 2021)

Akumulaci energie dělíme dle principu uchovávání energie na několik částí. Chemický princip akumulace energie znamená, jak zde název naznačuje, že se energie uchovává v chemických vazbách, a právě z tohoto důvodu jsou nabíjecí a vybíjecí cykly výrazně pomalejší. Další je fyzikální princip. Tento způsob je považován za velkokapacitní a je založen na principu přeměny kinetické nebo potenciální energie. A nakonec je zde možnost fyzikálně – mechanické akumulace energie, která využívá změnu skupenství používaného média (například viz níže popsaný systém LAES). (Dvořák, Bača, & Pléha, 2011), (Mareš & kol., 2011)

### 3. 1 Chemický princip akumulace energie

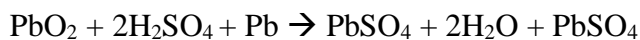
#### 3.1.1 Olověné akumulátory

Do chemického principu akumulace energie jednoznačně patří olověné baterie. Tyto baterie mají dlouhou historii úspěšného použití při akumulaci energie. Spolu s lithiovými bateriemi patří ve fotovoltaice mezi nejvíce využívané. Vyznačují se životností kolem 1500–2000 cyklů, avšak nejlepší baterie mohou dle výrobce dosáhnout až 5000 cyklů. Dají se použít téměř po celý rok. Teploty použití se pohybují mezi 0 °C – 45 °C, nižší a vyšší teploty bateriím nesvědčí. V zimních měsících není pro baterii dobré být vystavena nízkým teplotám. A právě z toho důvodu, že nejsou využívány při extrémně nízkých a vysokých teplotách, jsou dle výrobce schopné vydržet v provozu kolem 10 let, výjimečně až 15 let. Obvyklá aplikace baterií je při sériovém zapojení po čtyřech kusech.

Zde použitý materiál olovo, je poměrně drahým prvkem a také je jedovaté, tudíž při špatné manipulaci či aplikaci může nepříznivě ovlivnit životní prostředí. Nehrozí však nebezpečí výbuchu či požáru jako je tomu u lithiových baterií, protože olověné baterie obsahují vodný elektrolyt a aktivní materiály, které nejsou hořlavé.

Velkou výhodou těchto baterií je možnost jejich recyklace. V současné době je průměrná olověná baterie složena z více než 80 % recyklovatelných materiálů a veškeré olovo, které je získané z procesu recyklace, se využívá k výrobě nových baterií. (Čeněk, 2003)

Na obr. 5 je znázorněn olověný akumulátor, ve kterém probíhá chemická reakce popsána níže, která má za následek vznik síranu olovnatého na elektrodách je.



Obrázek 5 Olověný akumulátor  
Zdroj: <https://oze.tzb-info.cz/>

### 3.1.2 Lithiové akumulátory

Dalším typem baterií, které jsou ve fotovoltaice hojně využívány a patří do chemického principu jsou lithiové baterie. Tyto baterie se vyznačují životností okolo 5000 cyklů, což by mělo odpovídat 20-30 letům, nicméně životnost velmi záleží na okolních faktorech, na nabíjecích a vybíjecích cyklech a celkovém používání, z čehož vyplývá, že životnost baterií je velmi individuální. Lithiové baterie jsou oproti výše zmíněným olověným bateriím menší, lehčí, neohrožují tolik životní prostředí a nejsou náchylné na teplotní rozdíly.



*Obrázek 6 Lithiový akumulátor*

*Zdroj: <https://www.solar-eshop.cz/>*

Lithiový akumulátor je zobrazen na obr. 6. Avšak jeho nevýhodou je vysoká cena a poměrně vysoká citlivost na podmínky nabíjení a vybíjení. Mohou také představovat při nevhodném a neopatrném používání i riziko požáru a výbuchu, protože obsahují hořlavý organický elektrolyt a vysoce reaktivní materiály.

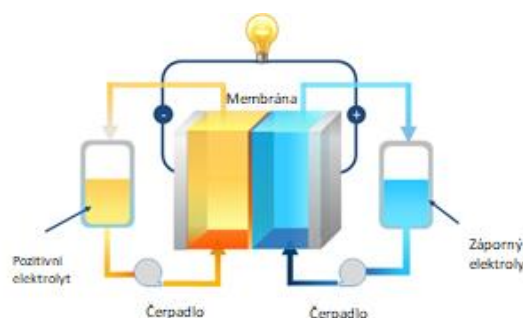
Bylo provedeno několik studií, které se týkaly fotovoltaických panelů s integrovanými lithiovými akumulátory např. (Vega-Garita & kol., 2017), (Reynaud & kol., 2008), (Vega-Garita & kol., 2016), (Narayan & kol., 2018) a (Grzesiak & kol., 2016).

Hlavním problémem těchto studií byly nekompaktní konstrukce, a to proto, že lithiové baterie nezapadaly do rámu panelu. Dalším problémem byla regulace teploty lithiových baterií, které byly integrovány do panelu. Pokud u FV panelu selže regulace teploty, může dojít až k nekontrolovatelnému přehřátí, což je nebezpečné jak pro obsluhu, tak pro elektrický systém.

V pracích (Vega-Garita & kol., 2017), (Malik & kol., 2017), (Panchal & kol., 2016), (Xie & kol., 2017) a (Poulek & kol., 2018) byly navrženy a testovány různé typy teplotního managementu založené například na využití skupenského tepla fázových přechodů k chlazení. Většina předchozích testů byla zaměřena na elektrická vozidla.

### 3.1.3 Redoxní a vanadové redoxní průtokové baterie

Dále se pro akumulaci energie z fotovoltaických panelů používají redoxní průtokové baterie (RFB), zobrazené na obr. 7. To jsou baterie, které se od klasických typů liší tím, že elektrolyt je zde rozdělen do dvou velkých vnějších nádrží. Tyto dvě nádrže jsou potřebné, protože průtokové baterie mají pozitivní a negativní elektrolyt. Toto rozdělení příznivě ovlivňuje degradační procesy, takže je možné opět při správné aplikaci provozovat baterii mezi 30 až 50 lety.



Obrázek 7 Princip redoxních průtokových akumulátorů

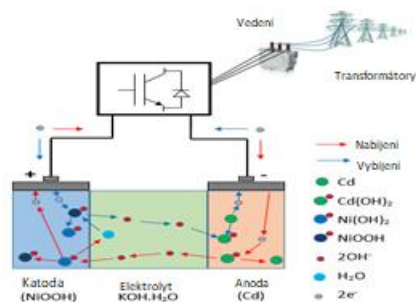
Zdroj: ResearchGate.net

Vanadové průtokové redoxní baterie (VRB) jsou typem redoxních průtokových baterií, avšak je zde využit prvek vanad, který se jinak využívá převážně v metalurgii. Hlavní výhodou těchto baterií je životnost, jak již bylo zmíněno v odstavci výše, a to hlavně kvůli oddělení elektrolytu. Tento typ baterií byl vynalezen kolem 80.let minulého století jako vedlejší produkt výzkumu, který měl za úkol zajistit potřebné zdroje energie pro vesmírné sondy. Princip je stejný jako u RFB, avšak elektrolyt obsahuje soli vanadu. Jako hlavní výhodu u těchto baterií považujeme možnost nezávislého nastavení výkonu, který je závislý na aktivní ploše a počtu článků ve svazku a kapacitu, kdy samozřejmě kapacitu baterie určuje velikost nádrží na elektrolyt.

VRB baterie jsou považovány za extrémně stabilní, to znamená, že baterie může být ponechána ve vybitém stavu po delší časový interval, aniž by tato skutečnost nějak ohrozila životnost baterie. Nevýhodou těchto baterií může být složité skladování čerpacích mechanismů. VRB baterie jsou díky svým provozním parametrům vhodné k vyrovnávání krátkodobých a střednědobých výkyvů FVE, které jsou způsobené meteorologickými podmínkami.

### 3.1.4 Ni-Cd akumulátory

Nikl kadmiové baterie jsou využívány pro svou spolehlivost a životnost. Oproti jiným typům baterií poskytují možnost odběru vysokého proudu. Dále jsou typické svou rychlostí nabíjení, velkým rozsahem provozních teplot od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  a také odolností proti rázům a vibracím. Na obr. 8 je zobrazen systém, používající Ni-Cd akumulátory.



Obrázek 8 Systém s použitými Ni-Cd akumulátory

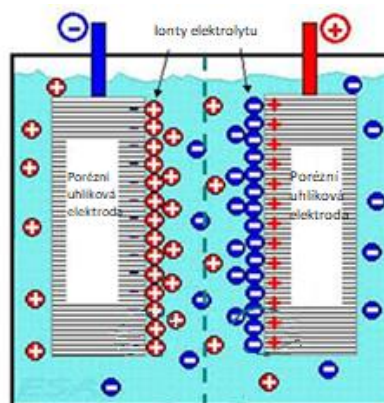
Zdroj: ResearchGate.net

### 3.1.5 Kondenzátory

Ukládání energie do kondenzátorů je jedna z nejstarších a nejznámějších metod. Velkou výhodou je vysoká rychlost vybíjení a také vysoký počet cyklů nabití a vybití. Nicméně kapacita u kondenzátorů je pro skladování energie malá, a tudíž v některých aplikacích není zcela dostačující. (Murtinger, 2011)

### 3.1.6 Superkondenzátory

Superkondenzátory nebo také elektrochemické kondenzátory jsou úložiště energie, kde se energie akumuluje ve formě elektrostatické energie viz obr. 9. Využívají principu vzájemného působení sil mezi elektricky nabitými částicemi. Nicméně superkondenzátory jsou prozatím vhodnější spíše na doplnění baterií a lze je použít a provozovat tam, kde je potřeba rychle dodat nebo uskladnit energii za krátký čas. Jsou charakteristické vysokým výkonem, dlouhou životností a samozřejmě spolehlivostí.



Obrázek 9 Princip superkondenzátorů

Zdroj: Energystorage.org

Výpočet energie nabitého kondenzátoru:

$$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad [\text{J}] \quad (1.2)$$

kde:

$$C = \text{kapacita } [F = \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2]$$

$$U = \text{napětí } [V = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}]$$

## 3.2 Fyzikální princip akumulace energie

### 3.2.1 Setrvačníky

Setrvačníky (viz obr. 10) slouží k akumulaci energie ve formě kinetické energie, jedná se tedy o prvního zástupce fyzikálního principu akumulace energie. Tento princip patří k nejstarším způsobům akumulace energie vůbec, protože na principu setrvačnicku pracuje např. hrnčířský kruh, který je znám už od nepaměti. Kinetická energie je v našich podmínkách dobře účinná a jsme schopni ji velmi rychle změnit v elektřinu. K tomuto účelu je vhodný například setrvačnick ve spojení s motorem a generátorem. Je nutné, aby otáčky setrvačnicku byly vysoké (cca 80 000), pokud má být dosaženo ideální energetické hodnoty. Zároveň jsou kladeny požadavky na



Obrázek 10 Setrvačnick

Zdroj: Piller.com

materiál rotoru a ložisek, aby vydržely vysoké otáčky a byly odolné vůči tření. Výhodou setrvačnicků je vysoký výkon a dlouhá životnost. Jsou ideální pro krátkodobou akumulaci energie v FVE, kde odstraňují prudké kolísání výkonu, pokud jsou panely zastíněny. (Nguyen & Hoang, 2020)

Výpočet kinetické energie v setrvačnicku:

$$E_k = \frac{1}{2}J \cdot \omega^2 \quad [\text{J}] \quad (1.3)$$

kde:

$J$  = moment setrvačnosti [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

$\omega$  = úhlová rychlost setrvačnicku [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

### 3.2.2 Přečerpávací elektrárny

Dalším zástupcem fyzikálního principu akumulace energie jsou přečerpávací elektrárny (PVE), které akumulují energii ve formě potenciální energie vody. Schéma tohoto principu je zobrazeno na obr. 11. Jedná se o nejběžnější velkokapacitní metodu, kdy je akumulováno velké množství energie v delším časovém intervalu. Zjednodušeně se jedná o hydroelektrárnu se dvěma přehradními nádržemi s rozdílnou výškou hladin, spojených potrubím, kdy se spád potrubí pohybuje od 100 m do 500 m. Turbíny a generátory této elektrárny mohou pracovat jako turbína-generátor, nebo motor-čerpadlo. V době menší spotřeby, tj. například v noci, nadbytečná energie roztáčí turbíny a voda se tím přečerpává ze spodní přehradní nádrže do horní. Tím vzniká v horní přehradní nádrži zásoba vody. Poté je chod otočen a z horní nádrže se voda přečerpává do spodní. Tím se energie vrací zpět do sítě. Účinnost přečerpávacích elektráren činí cca 75–80 %. Mezi nevýhody u těchto typů elektráren můžeme zařadit potřebu dostatečně velkých nádrží s vodou.

Výpočet potenciální energie vody v přečerpávací elektrárně:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad [\text{J}] \quad (1.4)$$

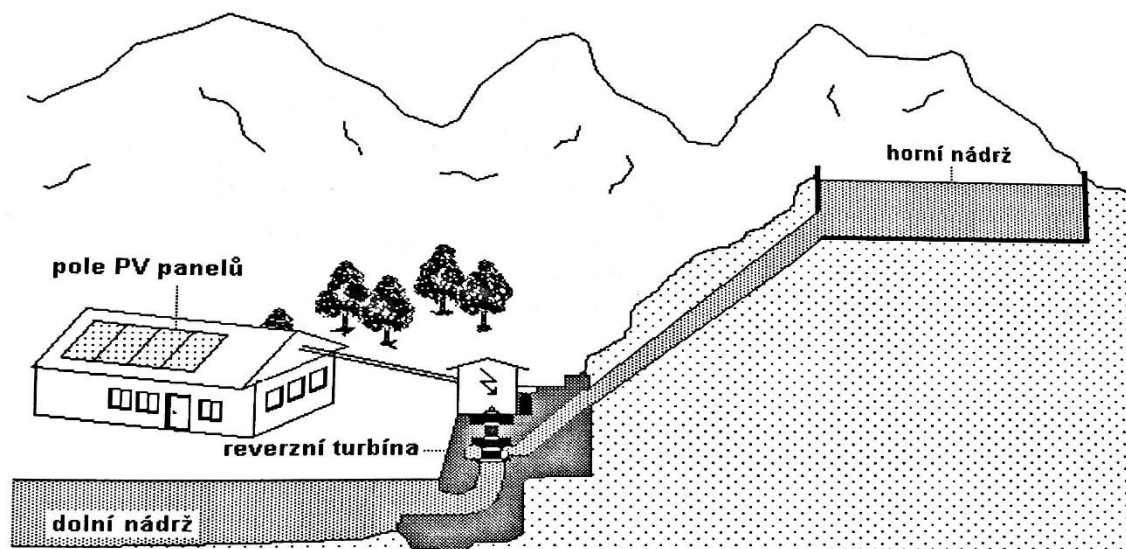
kde:

$m$  = hmotnost [kg]

$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , neboli tíhové zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]

$h$  = výška nad nulovou hladinou [m]

V České republice jsou čtyři přečerpávací vodní elektrárny a to: elektrárna Dlouhé stráně, vodní dílo Dalešice, vodní elektrárna Štěchovice, které patří společnosti ČEZ, a.s. a vodní elektrárna Černé jezero. Mezi největší přečerpávací vodní elektrárny ve světě patří: Bath County, Huizhou a Guangdong. (Mareš & kol., 2011)



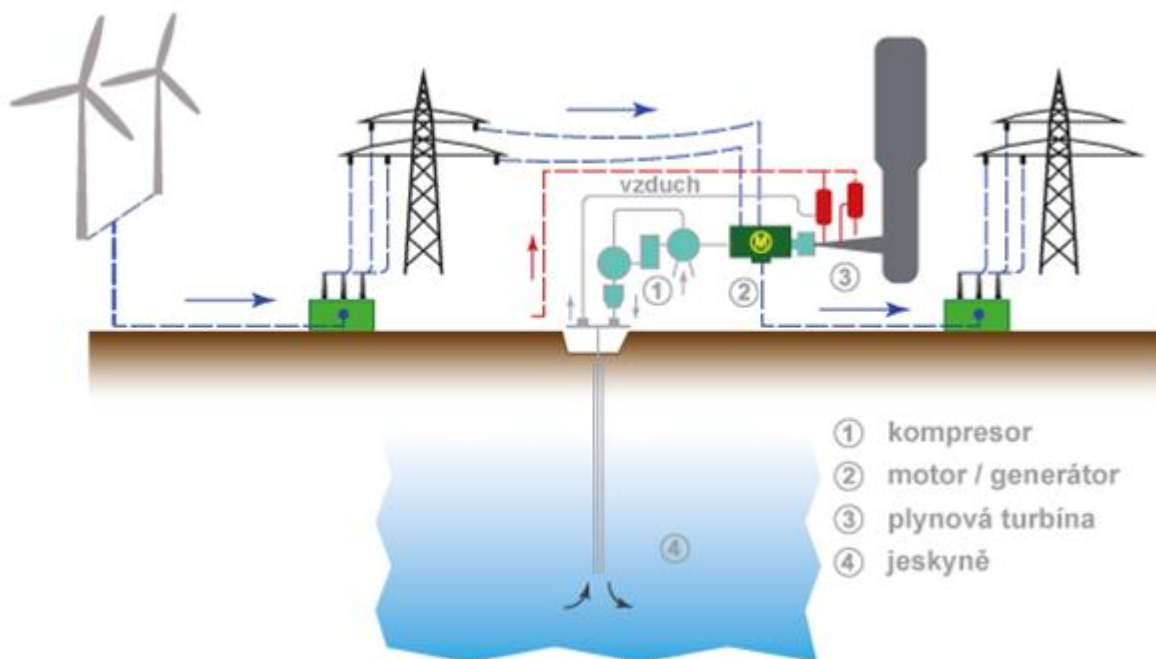
Obrázek 11 Schéma přečerpávací elektrárny

Zdroj: *Photovoltaics, theory and practice of solar energy utilization*

### 3.2.3 Stlačený vzduch

Dále je zde další možnost akumulace energie, a to pomocí stlačeného vzduchu, kdy je energie přeměněna pomocí komprese neboli CAES (viz obr. 12). U tohoto druhu akumulace energie je nutný dostatečně velký rezervoár, samozřejmě vysoký tlak (ke kompresi dochází při 6 MPa) a proces je velmi podobný jako u předešlého zmíněného typu. V praxi to znamená, že z kompresoru se stane turbína a z motoru generátor. Nevýhodou mohou být teplotní změny (tepelné ztráty, snižující účinnost této metody) při tomto procesu, tj. zahřívání vzduchu, když nastává komprese a ochlazování při expanzi. (Murtinger, 2011), (Budín, 2015), (Technický týdeník, 2018), (Libich, 2020), (EON, 2021), (Energy Storage Association, 2021), (fgFORTE, 2021), (Králová, 2021)





Obrázek 12 Schéma systému CAES

Zdroj: TZB-info.cz

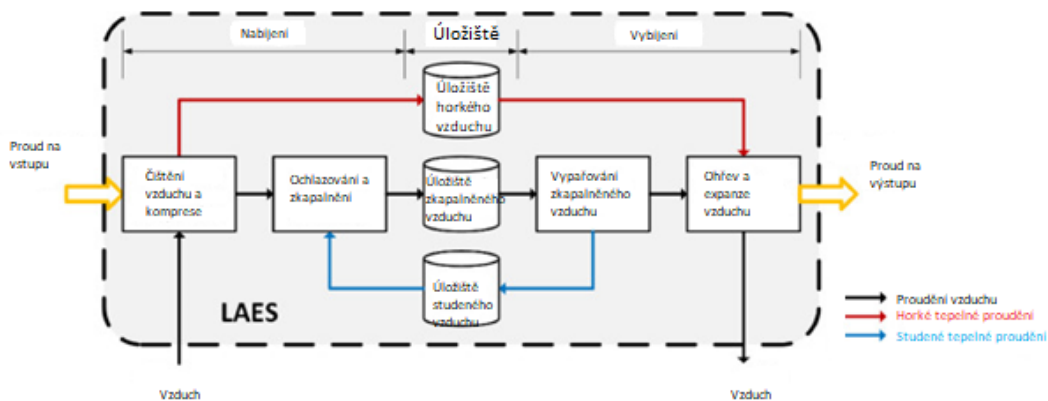
### 3.3 Fyzikálně – mechanický princip akumulace energie

#### 3.3.1 Kapalný vzduch

Jako další způsob akumulace energie se jeví skladování energie v kapalném vzduchu neboli LAES (Liquid air energy storage), zobrazený na obr. 13. Systém LAES je považován za relativně nový a rozvíjející koncept. Tento způsob patří mezi velkokapacitní skladovací technologie, která jak již název napovídá, využívá jako skladovací médium právě zkapalněný vzduch, nebo se také jako médium může používat dusík, při kryogenních teplotách.

LAES se skládá celkem ze tří hlavních procesů: nabíjení, skladování a vybíjení. Princip tohoto způsobu je tedy velmi podobný jako u přečerpávacích vodních elektráren (FVE) a také u akumulace pomocí stlačeného vzduchu (CAES). Stejně jako tyto dva zmíněné způsoby i systém LAES využívá přebytečnou energii ze sítě, aby byl při procesu nabíjení okolní vzduch nejdříve vyčištěn a následně stlačen pomocí této energie. Dále je fáze skladování, kdy je tento kapalný vzduch (či dusík) skladován v nádobách. V době potřeby systém energii do sítě vrací, k tomu využívá rekuperační jednotku a během vybíjení může zkapalněný vzduch být také použit pro účely pomocného chlazení. (Hüttermann & kol., 2019), (Wang & kol., 2017), (Vecchi & kol., 2021)

U tohoto systému nejsou žádná omezení týkající se výběru lokality, což je považováno za poměrně velkou výhodu. Dále cyklus výroby energie může být poháněn z velké části dostupnými zdroji tepla při teplotě okolí, a to z důvodu kryogenních teplot kapalného vzduchu. Tato skutečnost znamená, že systém může eliminovat potřebu spalování a s tím související emise uhlíku. (Vecchi & kol., 2021)



Obrázek 13 Princip systému LAES

Zdroj: Sciencedirect.com

### 3.3.2 Vodíkové hospodářství

Dalším způsobem je akumulace energie do vodíku, který je vyráběný elektrolýzou vody. Prvek vodík se využívá jako zdroj energie již asi 200 let. Vyznačuje se vysokou účinností a také minimálním vlivem na životní prostředí. Za předpokladu, že je vyroben z OZE (Obnovitelných zdrojů energie) a využíván v palivových článcích, tak výsledným produktem je teplo a voda. Další možností kromě palivových článků je nasazení plynové turbíny. Ve volné přírodě se vodík nevyskytuje a 99 % zásob vodíku je vyrobeno z fosilních paliv.

Vodíkového hospodářství neboli vodíkový energetický systém, lze charakterizovat jako systém založený na rozsáhlém využití vodíku jako úložiště energie. Tato problematika se zkoumá od 60. let 20.století. Nejenže se zkapalněný vodík využívá jako palivo pro raketové motory a letadla, ale využívá se i v automobilovém průmyslu.

Nevýhodou vodíku je především jeho výbušnost, což zvyšuje nároky na konstrukci zařízení vzhledem k bezpečnosti. Také je vodík velmi lehký prvek s nízkou hustotou, z tohoto důvodu je nutné, aby nádrže na kapalný vodík byly alespoň třikrát větší než například na benzín. Plynný vodík také často uniká díky netěsnostem. (Poulek & Libra, 2010), (Wagner, 2018)

## 4 Stav problematiky

### 4.1 Zákony, předpisy a daňová problematika

Spolu se zvyšujícím se trendem a popularitou fotovoltaiky (obr. 14) přichází i mnoho zákonů, předpisů a vyhlášek regulující činnost této oblasti.

- Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)
- Zákon č. 402/2010, kterým se mění zákon č. 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů.



Obrázek 14 Fotovoltaické panely  
Zdroj: Pixabay.com

- Vyhláška č. 150/2007 Sb., zabývající se způsobem regulace cen v energetických odvětvích a postupech pro regulaci cen
- Vyhláška č. 426/2005 Sb., o podrobnostech udělování licencí pro podnikání v energetických odvětvích
- Vyhláška č. 475/2005 Sb. kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů.
- Vyhláška č. 364/2007 Sb. kterou se mění vyhláška č. 475/2005 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů.
- Vyhláška 51/2006 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě.

A dále daňová legislativa problematiky, která je ošetřena Energetickým zákonem č. 91/2005 Sb. (Isofen Energy, 2009)

Provoz fotovoltaické elektrárny s maximálním výkonem do 10 kW není podle legislativy, dané v platnost od 1.1.2016 považován za podnikání dle Energetického zákona 91/2005 Sb. Pro fotovoltaické elektrárny, které mají výkon vyšší než 10 kW, je povinnost získat licenci od Energetického regulačního úřadu.

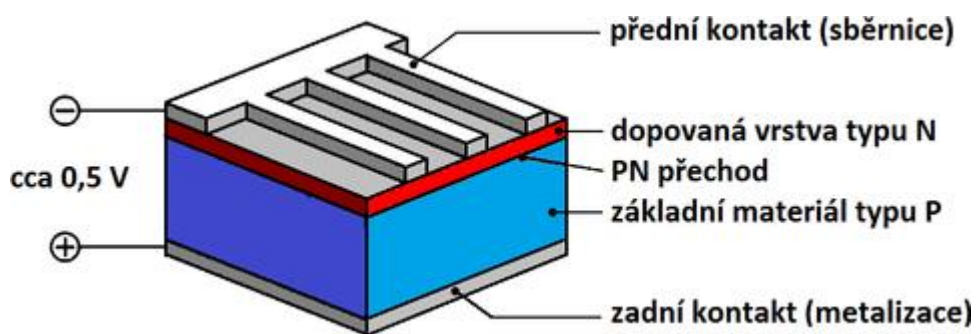
Pokud bude elektrárna instalována na rodinné nebo bytové domy, může být uplatněna snížená daň z přidané hodnoty, která je platná pro stavby sociálního bydlení. Toto platí za podmínky, že maximální plocha podlahy rodinného domu bude maximálně 350 m<sup>2</sup> a u bytových domů s byty o výměře do 120 m<sup>2</sup>. (Fotovoltaické stavby, 2021)

#### 4.2 Fotovoltaické články

Základem každého fotovoltaického panelu jsou fotovoltaické články. První článek si nechal patentovat americký inženýr pracující v AT&T Bell Laboratories, R. S. Ohl. Dále v roce 1954 ve stejné společnosti se kolektiv vynálezců složený z G. L. Pearsona, D. Chapina a C. Fullera zasadil o výrobu prvního solárního monokrystalického článku z křemíku, jehož účinnost byla cca 6 %. (Energy, 2021)

Nejvíce se v současné době využívají články z krystalického křemíku. Křemík je zvolen kvůli svým vhodným vlastnostem, například z důvodu, že je v zemské kůře jedním z nejrozšířenějších prvků, je levný a není jedovatý.

Fotovoltaický článek je tenká destička z křemíku, s přechodem PN. Obr. 15 zobrazuje schéma FV článku. Rozdělujeme články na bázi monokrystalického, polykrystalického a amorfního křemíku. Hlavní rozdíl mezi nimi spočívá ve tvaru a účinnosti. (Chmel & Hamerník, 2014)



Obrázek 15 Schéma fotovoltaického článku na bázi křemíku

Zdroj: [www.sticka.cz](http://www.sticka.cz)

Účinnost solárních článků udává poměr energie dopadající a přeměněné na elektrickou energii. Tato účinnost se spočítá ze vztahu (1.2):

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_E} = \frac{P_{Max}}{I \cdot S} \quad [\%] \quad (1.5)$$

kde:

$P_{Max}$  = Maximální výkon fotovoltaického článku [W]

$P_E$  = Výkon záření dopadajícího na Zemi [W]

$I$  = Intenzita záření [ $W \cdot m^{-2}$ ]

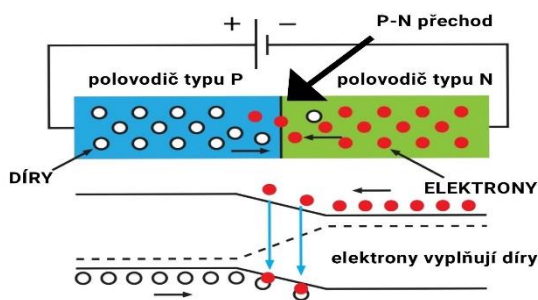
$S$  = Plocha fotovoltaického článku [ $m^2$ ]

Nyní nejvyužívanější metodou výroby křemíku je tzv. Siemensova metoda, což je metoda zahrnující destilaci těkavých sloučenin křemíku a jejich následný rozklad při vysokých teplotách na křemík.

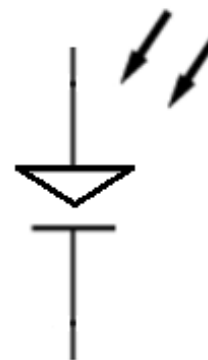
Monokrystalický křemík je vyráběn tzv. Czochralskiho metodou. Tato metoda je založena na principu řízené krystalizace z taveniny o cca 1415°C. Výhodou je pak vyšší účinnost při vyšší intenzitě záření, a to dokonce nad 20 %. Polykrytalický křemík je vyráběn tak, že se roztavený čistý křemík naleje do formy a nechá řízeně pomalu chladnout.

Kromě křemíku se ve fotovoltaice využívá i arsenid galia. Dosahuje vyšší účinnosti než články na bázi křemíku, dokonce okolo 29 %. Nicméně velkými nevýhodami jsou vyšší cena a vyšší hustota. Články z arsenidu galia jsou využívány na vesmírných družicích, protože se prokázalo, že jsou odolnější vůči kosmickému záření a pomaleji klesá účinnost s rostoucí teplotou. Existují i fotovoltaické články na bázi jiných polovodičů.

Každý článek je založen na principu polovodičové diody a generuje stejnosměrné napětí o cca 0,5 V (závisí na teplotě). Tato polovodičová dioda obsahuje oblast P a oblast N příměsových polovodičů. Každá z těchto oblastí má své charakteristické vlastnosti dané teorií polovodičů. Oblast N obsahuje přebytek elektronů a oblast P naopak přebytek děr. Rozhraní těchto vrstev se nazývá přechod PN, který propouští proud jedním směrem mnohem více než druhým (viz obr. 16). Obr. 17 zobrazuje, jak se schematicky značí FV článek. (Poulek & Libra, 2010)



Obrázek 16 Schéma principu polovodičové diody



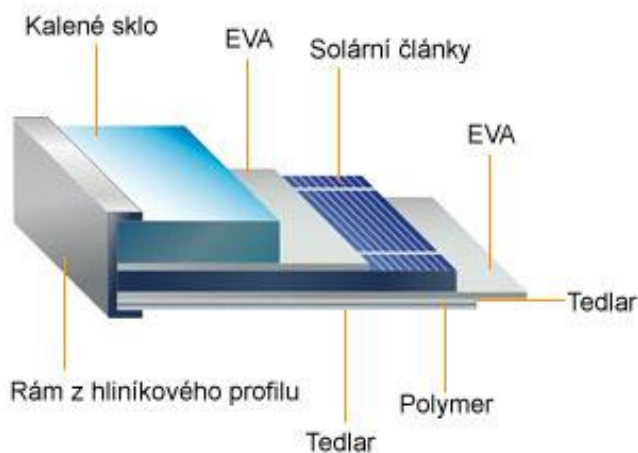
Obrázek 17 Schematická značka polovodičové diody

Zdroj: Eon-solar.cz

### 4.3 Fotovoltaické panely

Jak již bylo zmíněno, základem fotovoltaického panelu jsou fotovoltaické články, které fungují na principu polovodičové diody. Montáž fotovoltaických článků je provedena na skleněné desce, články jsou zality do EVA, panel je opatřen kovovým rámem. Kontakty jsou vyvedeny do krabice. Fotovoltaické články jsou chráněny před okolními vlivy, zalévací hmota slouží k měkkému uložení FV článků, a k ochraně před mechanickým poškozením. Zadní strana panelu je chráněna dalším materiálem, například laminátovou deskou, která může být vyrobena například na bázi tedlaru. (V naší laboratoři probíhá vývoj FV panelů nové generace, kde zalévací hmotou je polysiloxanový gel.) Řez panelem obvyklé konstrukce je možné vidět na obr. 18, následně na obr. 19 je zobrazena schematická značka fotovoltaického panelu.

V praxi jsou obvykle články do panelů zapojeny sério-paralelně a to proto, aby při osvětlení byly schopny poskytnout požadované stejnosměrné napětí a proud, protože naším cílem je vyrobená elektrická energie. Toho je docíleno zmíněným zapojením panelů, kdy se jednotlivá napětí sečtou. Výkon FV panelů se udává v jednotkách zvaných Watt peak (dále jen  $W_p$ ), což je nominální hodnota výkonu za podmínek definovaných normou. Můžeme tedy shrnout, že výkon panelu závisí na velikosti panelu, jeho umístění, technickém stavu a na intenzitě dopadajícího záření. Původně byly fotovoltaické panely zkonstruovány, aby byly schopné napájet vesmírné družice. (Nos, 2018) (EON, 2021) Postupem času se možnosti aplikací rozšířily.



Obrázek 18 Řez fotovoltaickým panelem

Zdroj: [www.hqline.com](http://www.hqline.com)



Obrázek 19 Schematická značka fotovoltaického panelu

<https://is.muni.cz/>

V současné době existuje mnoho výrobců solárních panelů a každý je něčím specifický, ať už se jedná o výšku, šířku, výkon apod. Nejběžnější a nejobecnější je dělení dle konstrukce. V následujících odstavcích je popsán a zhodnocen každý typ, specifikace a jednotlivé rozdíly mezi jednotlivými typy.

#### 4.3.1 Fotovoltaické panely na bázi monokrystalického křemíku

Panely na bázi monokrystalického křemíku jsou v našich podmínkách nejvíce používané. V ideálním případě se jeví jako černé, protože každé odražené záření znamená ztrátu energie, lze vidět na obr. 20. Pro dekorační účely například v architektuře může být záměrně dosaženo jiné barvy, například prostřednictvím interference záření na tenké vrstvě. Pro potlačení reflexe se do FV článku leptá pyramidová struktura, která brání odrazu záření prostřednictvím „totálního odrazu“.



Tento typ panelu se vyznačuje větší účinností, i přes 20 %. Nicméně tomu v předchozích letech odpovídaly i náklady na jejich výrobu, která byla podstatně dražší než u ostatních typů. Nyní jsou cenově velmi podobné. Tyto panely jsou vhodné i pro instalace fotovoltaických systémů na střechách. (Poulek & Libra, 2010)



Obrázek 20 FV panel na bázi monokrystalického křemíku

#### 4.3.2 Fotovoltaické panely na bázi polykrystalického křemíku

Zdroj: Eon.cz

Tyto panely patří do skupiny FV panelů na bázi polykrystalického křemíku, zobrazeny na obr. 21. Tyto panely mají o trochu menší účinnost přeměny energie, která bývá pod 20 %. Podstatný rozdíl je ve výrobě a jak již bylo zmíněno, je nutné, aby panelu nic nestínilo, byl nepoškozený a plocha panelu očištěna od prachu a nečistot. (Poulek & Libra, 2010)



Zdroj: Bce.cz

Obrázek 21 FV panel na bázi polykrystalického křemíku

#### 4.3.3 Fotovoltaické panely na bázi amorfního křemíku

Dalším typem jsou panely, které jsou založené na bázi amorfního křemíku. Pracují na principu tenkých vrstev, to je jasně viditelné z obr. 22. Jedná se o tenký film amorfního křemíku, nebo slitiny kadmia-teluru či mědi-india-galia-selenu, který je nanášen na pevný povrch panelu, ať už se jedná o sklo, plast či kovy. Tyto panely fungují s nejnižší účinností – cca 11 %.



Obrázek 22 FV panel na bázi amorfního křemíku

Jejich nespornou výhodou je minimální tloušťka a hmotnost. Rovněž účinnost přeměny energie je méně závislá na intenzitě záření. (Poulek & Libra, 2010)

Zdroj: Bce.cz



#### 4.3.4 Fotovoltaické panely na bázi perovskitů

Technologie tohoto typu je vesměs na trhu s fotovoltaikou novinkou. Na výrobu těchto panelů se využívají perovskity, které byly poprvé objeveny před cca 200 lety. Jedná se o materiály s definovanou strukturou. Dle studie z Oxfordu potažení fotovoltaického článku filmem tohoto materiálu může panelu zvýšit účinnost a snížit náklady, protože perovskity jsou schopny absorbovat různé části solárního spektra na rozdíl od klasicky používaného křemíku. Dle testu společnosti Oxford FV, který se uskutečnil v roce 2018 dosáhl testovaný článek účinnosti 27,3 %. Panely jsou lehké, cca 1 kg/m<sup>2</sup>, dají se ohýbat a můžou být i průhledné (viz obr. 23). Prozatím se panely prokázaly jako nestabilní a z toho důvodu je výroba ekonomicky nevýhodná. Za ideálního stavu, kdy panely budou stabilní se dokonce předpokládá, že výroba oproti klasickým panelům bude ekonomicky únosnější. (Dtest, 2019)

V roce 2018 vznikla na Krétě první elektrárna s panely založenými na bázi perovskitů s příměsí grafenu, kdy panely při ploše 82 cm<sup>2</sup> dosáhly účinnosti 15,3 %. Zkoumané větší panely o ploše 108 cm<sup>2</sup> pak měly účinnost 13,4 %. I když tyto panely zatím nedosahují hodnot krystalických panelů, bylo prokázáno, že dokážou obvykle lépe vyrábět elektřinu z rozptýleného světla. Tato elektrárna má výkon 1 kWp, takže jde o menší testovací elektrárnu. Od klasických panelů se liší tedy účinností a náklady. Barva tohoto panelu je spíše černá. (Innogy, 2021), (BCE, 2019).



Obrázek 23 FV panel na bázi perovskitů

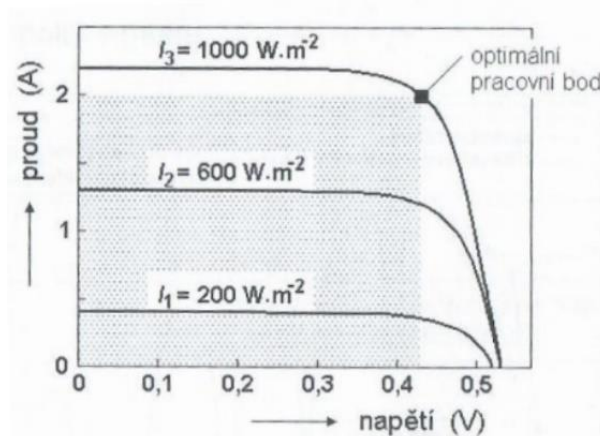
Zdroj: Graphene Flagship

## 4.4 Důležité charakteristiky fotovoltaických panelů

Princip přeměny energie je popsán již v kapitole 1. Jedná se o princip přeměny energie slunečního záření na elektrickou energii. K této přeměně dochází v FV článcích. Jak bylo zmíněno, FV články užívané v našich podmínkách jsou převážně založeny na bázi krystalického křemíku.

### 4.4.1 $U$ - $A$ charakteristiky fotovoltaických článků

Volt – ampérová charakteristika fotovoltaického článku je považována za jeden z nejdůležitějších parametrů. Na následujícím obr. 24 jsou zobrazeny  $U$ - $I$  charakteristiky FV článků při konstantní teplotě  $t = 50^\circ\text{C}$ . Každá zobrazená křivka odpovídá různé intenzitě osvětlení. Proud nakrátko je zobrazen pomocí průsečíků křivek se svislou osou, které

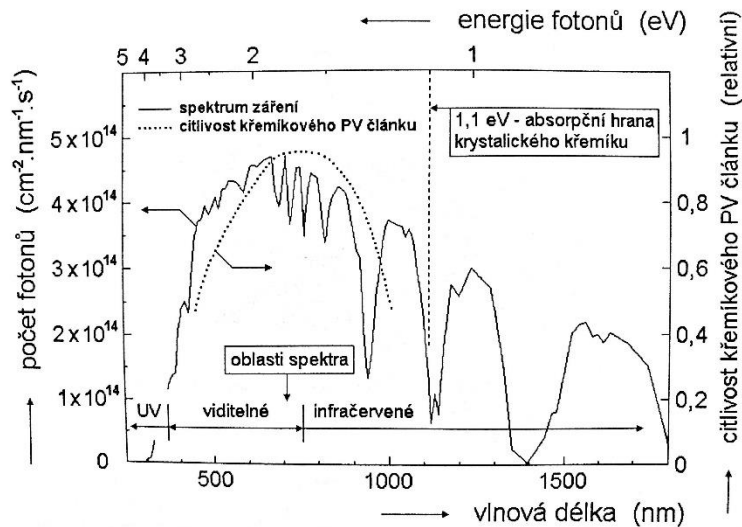


Obrázek 24  $U$ - $I$  charakteristika fotovoltaického článku

Zdroj: Fotovoltaika: Teorie i praxe využití solární energie

odpovídají tzv. nulovému odporu ve vnějším obvodu, což též známe jako zkratování pólů fotovoltaických článků, protože je známo, že vodivé spojení pólů má za následek snížení fotovoltaického napětí. Za předpokladu, že roste odpor zátěže, nastává pohyb od těchto bodů po křivkách ke směru rostoucího napětí, v tomto případě doprava.

Napětí naprázdno je zobrazeno pomocí průsečíků křivek s vodorovnou osou, které odpovídají tzv. nekonečnému odporu, což známe též jako rozpojení obvodu. Z toho tedy vyplývá, že optimální zátěž fotovoltaických článků má takovou hodnotu odporu, při které leží pracovní bod v bodě  $U-I$  charakteristiky, ve kterém je hodnota součinu napětí a proudu nejvyšší a tehdy fotovoltaický článek dosáhne svého maximálního výkonu. (Poulek & Libra, 2010)



Obrázek 25 Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou

Zdroj: Fotovoltaika: Teorie i praxe využití solární energie

Na obr. 25 je znázorněné spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou. Jsou zde vidět vyznačené vlnové délky a energie fotonů včetně šířky zakázaného pásu křemíku. Šíře zakázaného pásu u křemíku je cca  $\Delta E_g = 1,1$  eV (závisí na teplotě), což znamená, že jsou fotovoltaické články na bázi krystalického křemíku citlivé na fotony viditelného a blízkého infračerveného záření. Jednotka elektronvolt je rovna  $1,602 \cdot 10^{-19}$  J. (Poulek & kol., 2013) (Mastný & kol., 2011)

Viz vztah pro výpočet energie fotonu:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad [\text{eV}] \quad (1.6)$$

kde:

$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J.s, neboli Planckova konstanta [J.s]

$\nu$  = Frekvence [ $\text{s}^{-1} = \text{Hz}$ ]

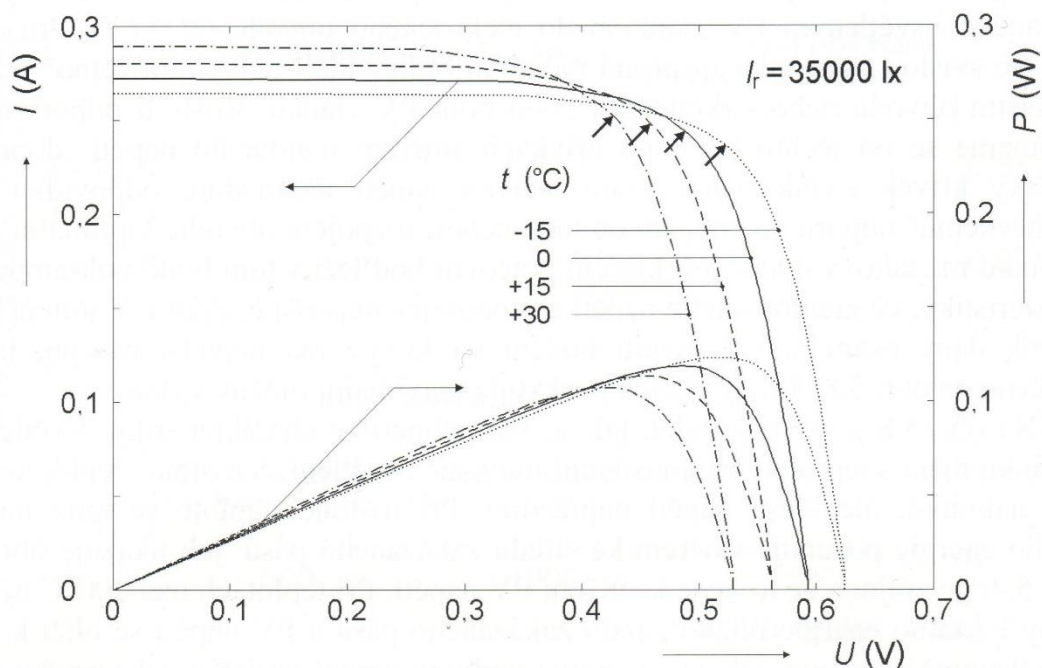
$c = 2,99792458 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup> [ m.s<sup>-1</sup>]

$\lambda$  = Vlnová délka [nm]

#### 4.4.2 Vliv teploty na charakteristiky FV panelů

Dalším významným parametrem, který má přímý vliv na charakteristiku fotovoltaického panelu, jak již bylo zmíněno, je teplota. Tvrzení, že čím vyšší hodnoty záření, tím vyšší výnos energie, nemusí být nutně za všech okolností platné. Je prokázána závislost hlavně na zvolené lokaci FVE.

Za předpokladu, že roste teplota, roste také proud nakrátko a dochází zároveň k poklesu napětí naprázdno. Výsledkem je poté snížení maximálního výkonu a snížení účinnosti viz obr. 26. (Poulek & kol., 2013), (Bannert, 2021)



Obrázek 26 U-I charakteristiky při různých teplotách a konstantním záření

Zdroj: *Technologie polysiloxanového gelu pro efektivnější využití solární energie*

#### 4.4.3 Vliv lokace na FV panely

Bylo dokázáno, že výběr lokace na aplikace fotovoltaických panelů má velký vliv. Je to hlavně zapříčiněno intenzitou slunečního záření. Během výzkumu byly zkoumány fotovoltaické elektrárny v různých lokalitách, a bylo dokázáno, že nejlepší podmínky pro výstavbu fotovoltaických elektráren se nacházejí v Jižní Americe (severní Chile) a v Tibetu, což odpovídá údajům z PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). Množství získané elektrické energie ovlivňují hlavně dva důležité faktory, a to konstrukce fotovoltaické elektrárny a také její umístění. Monitorování dat je tedy klíčovým ukazatelem pro provozovatele.

Monitoringem dat z fotovoltaických systémů se zabývaly například práce (Ayompe & kol, 2011) a (Madeti & Singh, 2017). K monitoringu byl použit monitorovací systém Solarmon - 2.0, který byl vyvinut na katedře fyziky. Tento systém je detailně popsán v práci (Beránek & kol., 2018) a je již aplikován na cca 80 fotovoltaických elektrárnách v České republice a zahraničí.

Data ze systému Solarmon - 2.0 jsou průběžně sbírána, vyhodnocována a publikována v dalších pracích, například (Libra & kol., 2016) a (Šafránková & kol, 2019). Nasbíraná data jsou porovnávána s hodnotami dle PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>), kdy hlavním účelem této aplikace je předpověď očekávaných hodnot vyrobené elektrické energie dle lokace a konstrukce fotovoltaické elektrárny.

#### 4.4.4 Vliv poškození FV panelů

Monitorování dat může předvídat tyto poruchy a jednotlivé druhy poruch. V případě, že elektrická energie neodpovídá očekávaným hodnotám, nasvědčuje to, že by ve fotovoltaické elektrárně mohlo docházet k poruchám, hlavní příčinou mohou být vadné fotovoltaické články a panely. Použitý monitorovací systém Solarmon - 2.0 dokáže díky své inteligenci předvídat místo a typ poruchy. Detekcí vad fotovoltaických panelů se zabývaly například práce (Rösch & kol., 2012), (Spertino & kol., 2015), (Olšan & kol., 2017), (Libra & kol., 2019), a (Bilčík & kol., 2019).

Mezi nejčastější poškození patří:

- prasklé články,
- přerušené kontakty,
- degradace zapouzdření,
- koroze vývodů.

Nejhorší ze všeho je pak situace, kdy jsou články prasklé nebo propojovací kontakty přerušené. Nemusí to však nutně znamenat okamžité přerušeni proudu, který teče fotovoltaickým článkem, nicméně v různých místech fotovoltaického panelu je odlišná hustota proudu. K těmto poškozením dochází hlavně proto, protože články jsou v místě instalace namáhány mechanickými otřesy v důsledku větru, sněhu, zvířat a změnami teplot v důsledku změny intenzity záření a roční doby.

Když dojde k přerušení části kontaktů, tak elektrický proud teče pouze částí článku, případně neteče celým stringem. To má vliv na množství proudu, který teče sériově propojenými články (stringy). Tato skutečnost zapříčiňuje snížení účinnosti fotovoltaického panelu. Dalším následkem tohoto poškození může být nerovnoměrné ohřívání článků v důsledku různých proudových hustot, které tečou skrz články, tudíž se na  $U-I$  charakteristice projeví už první náznaky tohoto či jiného poškození.

V případě prasklin či poškození článků můžeme využít např. metodu elektroluminiscence. Využitím této metody, je do panelu zaveden elektrický proud ze zdroje. Následně je sledováno záření článků v oblasti blízko infračervenému záření, protože se toto záření generuje podle teorie polovodičů. (Poulek & kol., 2013), (Liu & kol., 2016)

#### 4.5 Ekonomický pohled na fotovoltaiku

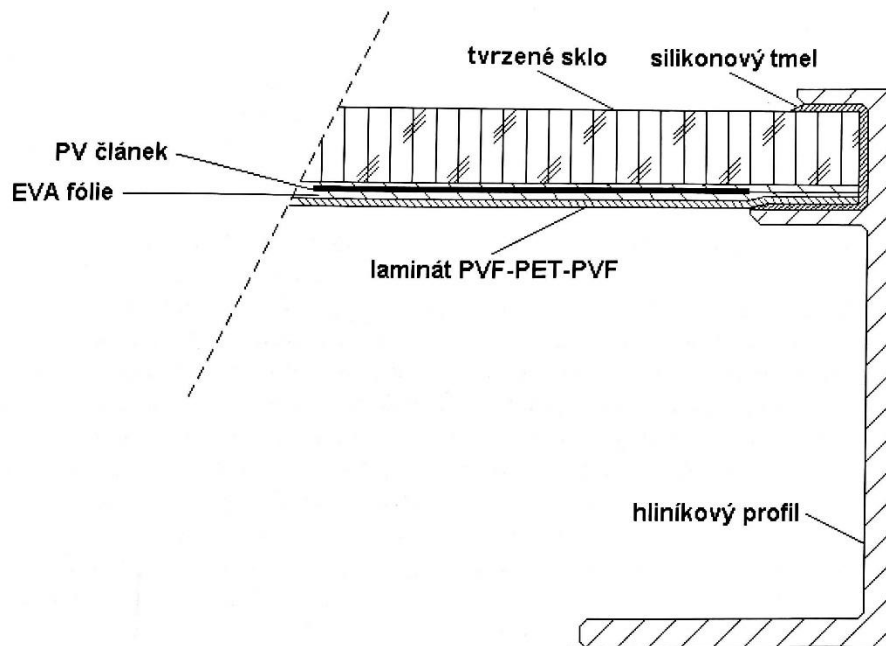
U fotovoltaiky je třeba zvážit, zda bude opravdu používána, protože počáteční investice je i vzhledem ke státní dotaci „Nová zelená úsporám“ celkem vysoká, i když se v posledních letech značně snížila v důsledku snížení ceny fotovoltaických panelů. Je také nutné si říct v jaké velikosti chceme fotovoltaický systém dimenzovat. Zde se musí zohlednit velikost a spotřeba elektrické energie objektu, kde bude fotovoltaický systém instalován. Návrh investice je tedy vždy individuální, ale průměrně se pohybuje mezi 7 až 10 lety. Což je vskutku na pováženou, protože životnost fotovoltaických panelů je sice teoreticky odhadována na 25 let, nicméně v reálu průměrně vychází 12 let. (Novotný, 2018)

#### 4.6 Materiály použité při konstrukci fotovoltaických panelů

Způsob zapouzdření článků v panelu je jeden z nejdůležitějších faktorů, který má vliv na životnost fotovoltaického panelu. Zapouzdření nebo také laminování, má totiž za úkol chránit fotovoltaické články, protože jsou velmi náchylné na poškození a vlhko. Kvůli tomu se takzvaně zapouzdřují, což znamená, že články jsou uloženy do měkkého plastu mezi přední a zadní stěnu. Tento proces tedy slouží pro ochranu článků v panelu. Kontakty jsou vyvedeny do krabice.

Nejobvykleji se využívá zapouzdření etylenvinylacetátem (EVA), což je viditelné na obr. 27. Tento termoplastický kompozit založený na bázi EVA polymeru se nejběžněji používá k zapouzdření fotovoltaických článků a slouží k ochraně článků a elektrické izolaci. Tento materiál však postupně degraduje a snižuje propustnost pro viditelné záření, čímž se snižuje optická transparentnost, což má nepříznivý vliv na účinnost přeměny energie.

Degradace se zvyšuje při teplotách nad 80 °C, tedy FV panely by měly pracovat v rozmezí uvedených teplot +80 °C až do -40 °C.



Obrázek 27 Řez fotovoltaickým panelem s články zapouzdřenými v EVA

Zdroj: *Technologie polysiloxanového gelu pro efektivnější využití solární energie*

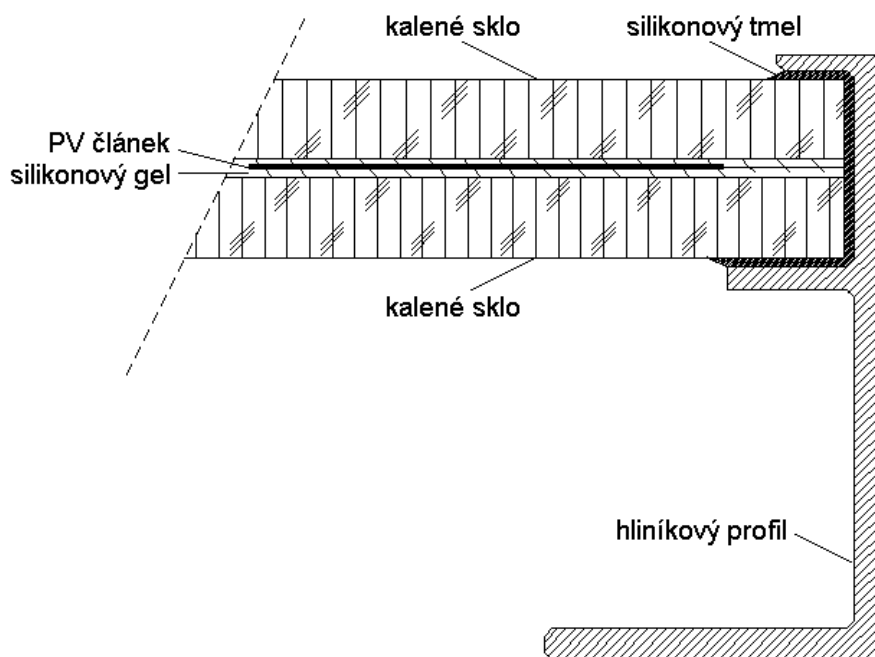
I když je využití kompozitu EVA ve fotovoltaice nejrozšířenější, tento materiál má několik závažných nevýhod, které nepříznivě ovlivňují fotovoltaický panel a tím i následně celý fotovoltaický systém. (Oliveira & kol., 2018) , (Parretta & kol., 2005)

Mezi tyto nevýhody patří:

- podléhání materiálu degradaci,
- nestabilní optické vlastnosti,
- vznikání těkavých látek při procesu laminace,
- energetická náročnost procesu laminace (viz tab.1).

Další materiál používaný k zapouzdření je tzv. polysiloxanový gel. Polysiloxany neboli silikonové polymery se prokazují v posledních letech jako vhodnější alternativa pro zapouzdření fotovoltaických článků do panelů. Polysiloxanový gel má oproti materiálu EVA několik důležitých výhod. Především se vyznačuje vysokým rozsahem teplot od -60 °C až do 250 °C.

Je vysoce průhledný a tím pádem lépe propouští sluneční záření, dále je schopen kompenzovat mechanické napětí v důsledku nízkého modulu pružnosti, je velmi přílnavý k polovodičům, sklu a k ostatním použitým materiálům a také dobře přenáší teplo z článků do výměníku tepla. Na obr. 28 je zobrazen řez fotovoltaickým panelem s polysiloxanovým zapouzdřením. (Matuška & kol, 2015)



Obrázek 28 Řez fotovoltaickým panelem s polysiloxanovým zapouzdřením

Zdroj: Technologie polysiloxanového gelu pro efektivnější využití solární energie

Tabulka 1 Srovnání vlastností materiálů

Zkoumané parametry	EVA		Polysiloxanový gel	
	Min	Max	Min	Max
Dlouhodobá pracovní teplota (°C)	-40	80	-60	250
Odolnost proti UV záření	nízká		vysoká	
Životnost (roky)	25		50	
Příkon během pouzdření (kW)	45		4,5	
Index lomu	1,482		1,406	
Modul pružnosti (Pa)	$1 \cdot 10^7$		$8 \cdot 10^3$	
Součinitel délkové teplotní roztažnosti ( $K^{-1}$ )	$4 \cdot 10^{-4}$		$2,5 \cdot 10^{-4}$	
Tepelná vodivost ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	0,13		0,18	

Jak již bylo řečeno, články se zapouzdřují mezi přední a zadní stěnu panelu. V následujících odstavcích jsou popsány různé alternativy materiálů, použitých na tyto stěny, jejich charakteristika, vlastnosti a vhodnost použití.



TPU neboli zkráceně termoplastický polyuretan. Jedná se o pryskyřici, která se používá jako materiál na zadní vrstvě solárních modulů. TPU je kopolymerní blok, který se skládá z měkkých a tvrdých segmentů, které jsou tvořeny při reakcích diisokyanátů s dioly.

Tento materiál je pro své vlastnosti hojně využíván na aplikaci do zadní vrstvy panelu, protože má vysokou odolnost proti odírání, velký modul pružnosti, pevnost ve smyku, odolnost proti nízkým teplotám, takže nekřehne a neláme se a je průhledný. Také vykazuje menší degradaci UV zářením než materiál EVA, toto záření zpříčiňuje žloutnutí. Při teplotě 120 °C dochází k přilnutí materiálu k panelu. (Weimar, 2021)

Dalším materiálem, který se využívá v konstrukci fotovoltaických panelů je polyvinylbutyral, což je v podstatě pryskyřice. Je vyroben při reakci polyvinylalkoholu s butyraldehydem. Je to bezbarvý a průhledný materiál. Kromě využití ve fotovoltaice se používá i v automobilovém průmyslu, a to převážně na bezpečnostní skla. Mezi jeho výhody patří vysoká životnost, odolnost vůči UV záření. Nicméně tento materiál nereaguje příliš dobře s vlhkem a vodou. Má obdobné vlastnosti jako Etylenvinylacetát. (McKeen, 2016)

SentryGlas lze díky svým vlastnostem srovnat s Etylenvinylacetátem nebo Polyvinylbutyralem, kdy je oproti poslednímu zmíněnému až 5krát pevnější a až 100krát tužší. Nicméně oproti FVB je SentryGlas také ekonomicky náročnější jak na výrobu, tak také pořízení. Jako SentryGlas označujeme tenkou ionoplastickou vrstvu, která slouží pro výrobu vrstvených skel. Z toho důvodu lze takto vyrobená skla vystavit vyššímu zatížení, a to i navzdory tomu, že jsou tyto skla tenčí a lehčí. Jde tedy o skla bezpečnostní. SentryGlas je často použit tam, kde dříve bylo využito kalené sklo. (OGB s.r.o., 2021) (ISOTHERM s.r.o., 2021)

V konstrukci fotovoltaických panelů se používá „kalené“ sklo, což je speciální sklo, jinak také označované jako tvrzené. Proces kalení spočívá v zahřátí skla na teplotu cca 600 °C, kdy je následně chlazeno vzduchem. Díky tomu se sklo stává pevným a odolným vůči nárazu a korozi, a také je schopno odolat různým vnějším vlivům jako je např. déšť, vítr, mráz a sníh. Toto sklo se používá nejenom ve fotovoltaice, ale i v automobilovém průmyslu. (ELBEN Energy s.r.o., 2021)

Hojně využívaná je i epoxidová pryskyřice, což je syntetický polymerní materiál, který patří mezi reaktoplasty. Tento materiál je schopný přilnout k většině materiálů. Vyznačuje se chemickou odolností, dále je také tvarově stálá a tepelně odolná. K rozpuštění je zapotřebí ředidel.

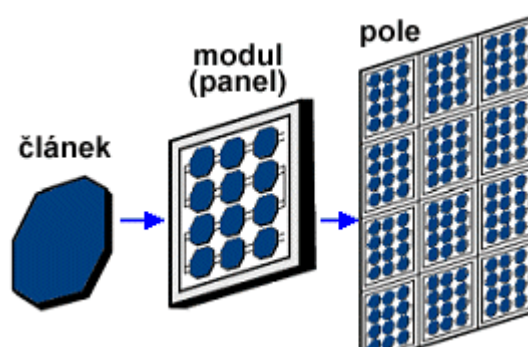
Nicméně, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností, je nutné materiál takzvaně zesítit. To znamená, že je nutné přidat tvrdidlo, které pak následně ovlivňuje chemickou odolnost, tepelnou odolnost, vytvrzovací dobu a teplotu tvrzení. Nejenže se tento materiál používá ve fotovoltaice, ale i k výrobě sklolaminátů a transformátorů. (Synpo a.s., 2021)

Polyvinylfluorid jinak také zvaný tedlar je termoplastický fluoropolymer, který se hojně kromě fotovoltaiky využívá v leteckém a kosmickém průmyslu. Svými vlastnostmi je tedlar podobný teflonu. Je charakteristický svou odolností vůči širokému spektru chemikálií, rozpouštědel a barviv a také nízkým koeficientem tření. Vyznačuje se také resistencí vůči slunečnímu záření, odolností proti popraskání a proti ohni. Jeho provozní teploty se pohybují od  $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $107\text{ }^{\circ}\text{C}$  a krátkodobě vydrží i do  $204\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (DuPont, 2021), (Emco Industrial Plastics, 2021)

#### 4.7 Fotovoltaický systém

Fotovoltaické systémy neboli elektrárny (FVE) jsou, jak schematicky zobrazuje obr. 29 složeny z FV panelů, které jsou tvořeny FV články. Tyto FV systémy, které se dají aplikovat na střechy dělíme na tři základní typy:

- systémy s připojením k síti – On-grid,
- ostrovní systémy – Off-grid,
- hybridní systémy.

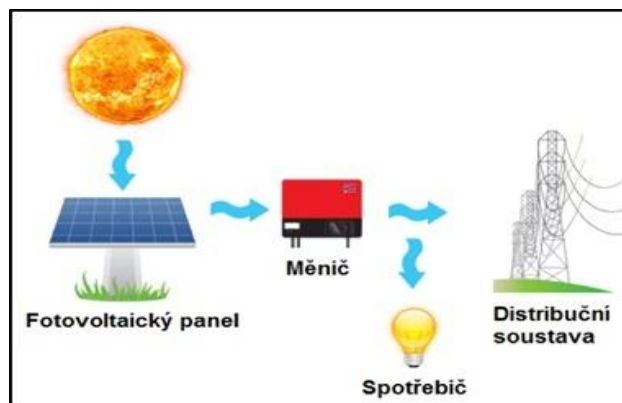


Obrázek 29 Schéma komponentů fotovoltaického systému

Zdroj: [www.cez.cz](http://www.cez.cz)

Grid znamená síť. Tudiž jak názvy naznačují, on-grid je systém založený na bázi sítě. Off-grid, nebo jinak také ostrovní fotovoltaický systém, je takový druh systému, kdy není potřeba žádné připojení k síti a hybridním rozumíme kombinaci obou předešlých typů. V následujících odstavcích budou jednotlivé typy dopodrobna rozebrány.

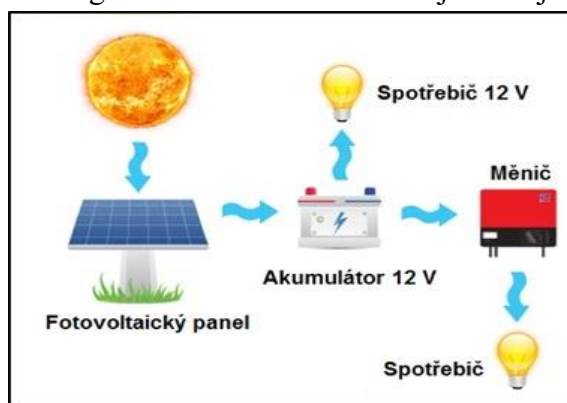
Síťové fotovoltaické systémy jsou vždy připojené k nadřazené rozvodné síti (viz obr. 30). Tento typ patří mezi nejrozšířenější. Tyto elektrárny lze instalovat pouze za podmínky povolení distributora o připojení zařízení do distribuční sítě. Síťový systém se vyznačuje tím, že je bez bateriového úložiště. Přebytky energie jsou poté dodávány do distribuční sítě, nebo se používají k ohřevu vody.



Obrázek 30 Znárodnění On-grid systému  
Zdroj: [www.estav.cz](http://www.estav.cz)

On-grid systém pracuje paralelně s distribuční sítí a vyrobená energie jde z elektrárny přes hlavní rozvaděč a následně do všech spotřebičů. Pokud zbude nějaký přebytek, tak energie přetéká do distribuční sítě. Tento systém funguje i opačně, takže pokud je spotřeba energie větší, než je množství vyrobené energie fotovoltaickým systémem, je energie následně dočerpávána ze sítě, aniž by se omezil provoz všech zařízení.

Ostrovní fotovoltaický systém, označovaný jako autonomní fotovoltaický systém nebo také off-grid, nepotřebuje připojení do distribuční sítě a využívá baterie (viz obr. 31). Autonomní FV systémy se obvykle využívají v místech s horší přístupností sítě nebo ke speciálním účelům. Stejně tomu bylo i v tomto případě. Autonomní systémy jsou také navrhovány, protože je požadována nezávislost na síti. Jsou vhodné například pro napájení spotřebičů, vědeckých přístrojů v terénu, pro automatický sběr dat a také signalizaci. Z toho důvodu jsou hojně využívány například v osadách či táborech bez připojení k elektrické síti. (Ghafoor & kol., 2015), (Wang & kol., 2017)



Obrázek 31 Off-grid systém  
Zdroj: [www.estav.cz](http://www.estav.cz)

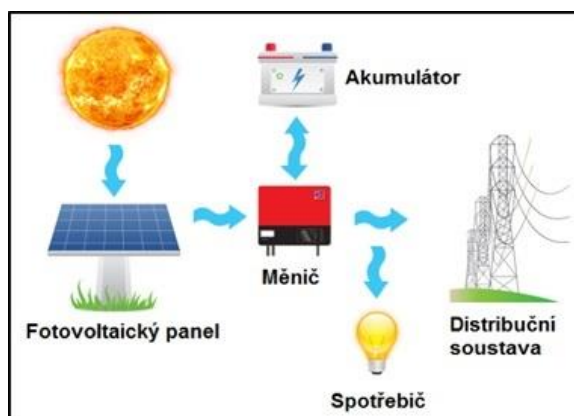
Systém off-grid se skládá z panelu, který je zapojen do MPPT či PWM regulátoru a následně tento regulátor je připojen na jednu či více baterií. Dále jsou na regulátor připojeny spotřebiče, které pracují na stejnosměrný proud. Součástí regulátoru je také monitoring kapacity baterií, kdy při přebíjení je panel od baterie odpojen, a naopak pokud hrozí hluboké vybití baterie, tak regulátor odpojí všechny spotřebiče a zátěž.

Konstrukcí autonomních FV systémů a jejich začleněním do automatizační struktury se na katedře fyziky zabývali již v minulých letech, například v práci (Kouřím & kol., 2015). Než se začaly používat v této problematice LED světelné zdroje, využívaly se žárovky klasické. Avšak jejich nízká účinnost negativně ovlivňovala kapacitu baterií, které se velmi rychle vybily. V experimentu, který je popsán v kapitole 5, byl využit kvůli své ekonomičnosti a populárnosti polovodičový LED světelný zdroj (light emitting diode) s vyšší účinností přeměny energie na viditelné záření.

Tyto světelné zdroje pracují na principu jevu, který nazýváme elektroluminiscence. Elektroluminiscenci můžeme obecně popsat jako přeměnu elektrického proudu přímo na světlo. Diody fungují díky polovodičům, které se skládají ze dvou vrstev. Po připojení elektrického proudu se elektrony z první vrstvy přesouvají na druhou vrstvu a vytvářejí tak energii – námi požadované světlo. (Liu & kol., 2016)

U žlutých LED diod dosahuje účinnost  $\eta=40\%$ . U diod emitujících bílé světlo není účinnost vyšší než  $\eta=30\%$ . To je způsobeno tím, že prostřednictvím polovodičového čipu, který poskytuje světlo v modré oblasti spektra, pomocí luminoforů dochází k přeměně části fotonů na fotony s menší energií v ostatních oblastech viditelného spektra. To znamená, že výsledná barva záření je poté bílá. Kromě toho se LED žárovka vyznačuje ekonomickou výhodou oproti žárovkám klasickým – životností a snížením emisí oxidu uhličitého. Průměrně životnost LED žárovek činí cca 50 000 hodin, oproti klasické žárovce s životností okolo 1000 hodin. (Philips, 2021)

Hybridní fotovoltaický systém je v podstatě kombinací off-grid a on-grid systému (viz obr. 32). Dokáže využívat připojení k distribuční soustavě, ale není na ní závislý. Za předpokladu výpadku distribuční sítě systém plynule přejde na čerpání energie z akumulátorů, do kterých se akumulovala energie vyrobená fotovoltaickými panely. (Tripanagnostopoulos & kol., 2002), (Elektro, 2021)



Obrázek 32 Hybridní systém  
Zdroj: [www.estav.cz](http://www.estav.cz)

Záloha z elektrické sítě se využívá pro případ, kdy není fotovoltaická elektrárna schopna dodat dostatečné množství energie. V praxi to znamená, že když svítí Slunce, systém dodává elektřinu a nabíjí akumulátory, které slouží pro zásobení energií i ve dnech, kdy Slunce tolik nesvítí. Pokud však systém nevyrobí dostatečné množství energie, měnič se přepne a elektřina je odebírána ze sítě. Velmi záleží na kapacitě akumulátorů, která by měla být minimálně 2 kWh. Pokud je hybridní fotovoltaický systém navržen správně, měl by spolehlivě pokrýt potřeby domu alespoň z 90 %. (EON, 2021)

## 5 Vlastní výsledky a diskuse

Tato kapitola se zabývá popisem práce a zhodnocením výsledků doktorandky v průběhu studií. Kapitola 5.1 se zabývá popisem a zhodnocením poruch fotovoltaických panelů a jejich měničů, které zásadně ovlivňují provoz FVE, konkrétně je zde zacíleno na delaminaci hran. Kapitola 5.2 se zabývá řešením nového fotovoltaického panelu s fotovoltaickými články, které jsou zapouzdřeny do polysiloxanového gelu s integrovanými Li-ion akumulátory. Další kapitola 5.3 popisuje provoz a sběr dat ze síťového fotovoltaického systému, který je umístěn na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze. Kapitola 5.4 řeší problematiku konstrukce a sběru dat z autonomního fotovoltaického systému v Panenských Břežanech, který slouží pro noční osvětlení stáje. Nakonec kapitola 5.5 porovnává několik typů FVE s různými klimatickými podmínkami, na tomto výzkumu doktorandka spolupracovala s dalšími doktorandy a pracovníky katedry fyziky.

### 5.1 Poškození fotovoltaických panelů a fotovoltaických měničů způsobených delaminací hran, proniknutím vody a vysokým napětím ve stringách v mírném klimatu

V České republice je instalováno více než 2 GWp fotovoltaických systémů, které jsou vystavené mírnému klimatu, odpovídajícímu střední Evropě. A ačkoliv existuje velké množství vad fotovoltaických panelů, tak tento experiment se zabývá hlavně delaminačními vadami, speciálně delaminační vadou hrany. Všechny zkoumané fotovoltaické panely jsou standardní konstrukce Sklo/EVA/TPT na bázi křemíku, které jsou umístěné v hliníkovém rámu. Tyto zkoumané fotovoltaické panely představují dostačující množství pro vyhodnocení delaminačních vad v našich podmínkách. Průměrná roční teplota v České republice je kolem +8 °C a průměrné roční srážky činí přibližně 700 mm.

Důležité je, že téměř ve všech případech byly tyto panely vyrobeny v roce 2009. Od tohoto období bylo učiněno několik technologických změn, ale některé problémy stále zůstávají nevyřešeny. Během doby životnosti fotovoltaických panelů se může objevit mnoho vad. Některé z nich mají svůj původ už ve výrobním procesu a jiné mohou být způsobeny například nesprávnou údržbou, nebo nevhodnou instalací.

Klíčovým parametrem pro vyhodnocení závad je nejenom výkon, který je velmi důležitým parametrem pro provozovatele systémů, ale také izolační odpor  $R_{isol}$ . Klasické fotovoltaické panely na bázi křemíku vyrobené v roce 2009 využívaly jeden design Sklo/EVA/TPT. Míra degradace těchto panelů se obvykle pohybuje lineárně v rozmezí 0,7 %–2,0 % ročně. (Dunlop & kol., 2006), (Skoczek & kol., 2009), (Bandou & kol., 2015)

Výrobci fotovoltaických panelů obvykle deklarují, že pokles výkonu nepřekročí 0,8 % po dobu jednoho roku. Záruční lhůty fotovoltaických panelů se obvykle pohybují mezi 10 a 25 lety, velmi zřídka to může být i 30 let. Tato provozní doba počítá se snížením výkonu způsobeným běžným provozem, který zahrnuje také některé typy vad, jako jsou mikropraskliny uvnitř článků, kterým však nelze zabránit. Dále ovšem existují některé další vady, které mohou způsobit významný pokles výkonu a měly by být včas rozpoznány a diagnostikovány, aby se zabránilo větším ztrátám.

V následujících odstavcích jsou popsány delaminační vady v kombinaci s pronikáním vody do panelů instalovaných v České republice. Proces delaminace bývá obvykle spojen s výrobními vadami, nebo spíše se špatným technologickým postupem. Samotná delaminace, pokud k ní dochází na nízké úrovni, nepředstavuje vážné ohrožení budoucí spolehlivosti systému. Podstatné problémy ovšem nastávají v případě, že k delaminaci dojde mezi fotovoltaickými články a okrajem panelu.

Z hlediska lokalizace může být delaminace rozdělena do těchto čtyř skupin:

- mezi zadní fólií a zapouzdřením EVA;
- mezi zadním zapouzdřením EVA a článkem;
- mezi článkem a předním zapouzdřením EVA;
- mezi předním zapouzdřením EVA a krycím sklem.

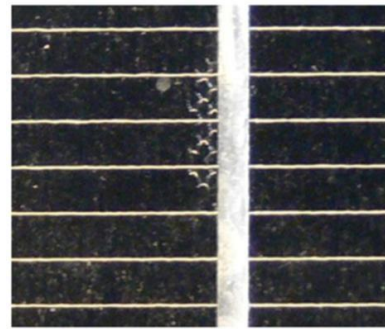
První a druhý typ delaminace nelze prakticky rozlišit bez zničení modulu. V případě prvního typu delaminace, se mohou bubliny vyskytnout například kvůli kapilárním silám na rozhraní materiálu EVA a na zadní laminační fólii. V tomto případě bubliny dosahují větších rozměrů a jsou naplněny vodou pod značným tlakem. V případě třetího a čtvrtého typu delaminace je jev snadno pozorovatelný přes přední krycí sklo panelu. V případě třetího typu dochází ke zničení téměř okamžitě po proniknutí vody do delaminovaného prostoru. Tato vada je, stejně jako u typu dva doprovázena okamžitým snížením izolačního odporu mezi rámem a vnitřní konstrukcí článku v panelu.



U čtvrtého typu poškození delaminací, jsou bubliny nacházející se za předním krycím sklem lehce pozorovatelné, což lze vidět na obr. 33 a) a obr. 33 b).

V případě následného pronikání vlhkosti do systému dochází k postupnému vnikání vody kvůli hydrofobickým vlastnostem EVA a následně také k postupnému snižování izolačního odporu, což má za následek degradaci struktury elektrolyzou.

Mezinárodní norma EN 61215 definuje dvě základní úrovně delaminace. Za první úroveň označujeme její výskyt v malém měřítku, typicky se objevuje kolem sběrnic. O druhou úroveň se jedná, když je vytvořena spojitá cesta mezi okrajem panelu a jakýmkoli článkem uvnitř, což má za následek snížení proudu nakrátko, což jak je známo je největší proud, kterého je panel schopen dosáhnout. (Kurtz, 2013)



Obrázek 33 Delaminace mezi sklem předního krytu a zapouzdřením - a) Počáteční stav, b) Masivní delaminace

Do čtvrtého typu delaminační mezery, ke které obvykle dochází na okraji fotovoltaického laminátu, proniká pravidelně voda. Tato situace je zobrazena na obr. 34 a obr. 35.



Obrázek 34 Ukázka delaminace hran 4. typu



Obrázek 35 Ukázka delaminace hran

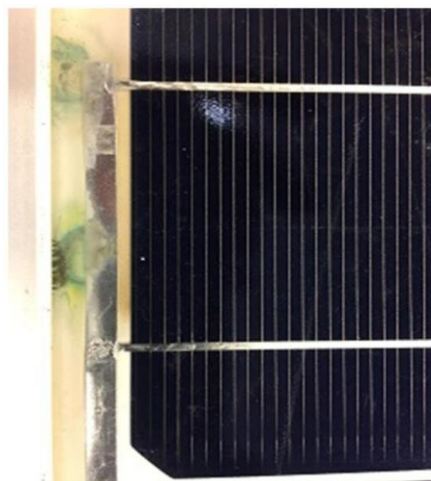


Čistá voda není příliš vodivá, ale zejména při designu laminátu Sklo/EVA je vždy přítomna kyselina octová (Kempe, 2006). Směs vody a kyseliny octové už vodivá je. Kritický delaminační vodivý kanál se vytvoří v případě, když voda pronikne mezi string a uzemněný rám fotovoltaického panelu do delaminační oblasti. Výsledkem této kritické delaminační poruchy je vypnutí měniče německé značky SMA Sunny Tripower 10 000 TL a jeho pozdější úplné zničení z důvodu poškození ochranného relé.

Elektrický zkrat mezi uzemněným rámem fotovoltaického panelu a vnitřními solárními články je obvyklý při systémovém napětí 500–800 V stejnosměrného proudu. Typický vodivý kanál je jasně viditelný na obr. 36 a obr. 37. V tomto případě jsou fotovoltaické panely nevratně poškozené. Takto zničený fotovoltaický panel není schopen vyrábět žádnou energii a způsobuje vypnutí měniče kvůli nízkému izolačnímu odporu  $R_{isol}$ .



Obrázek 36 Delaminační vodivý kanál mezi sběrníci a rámem



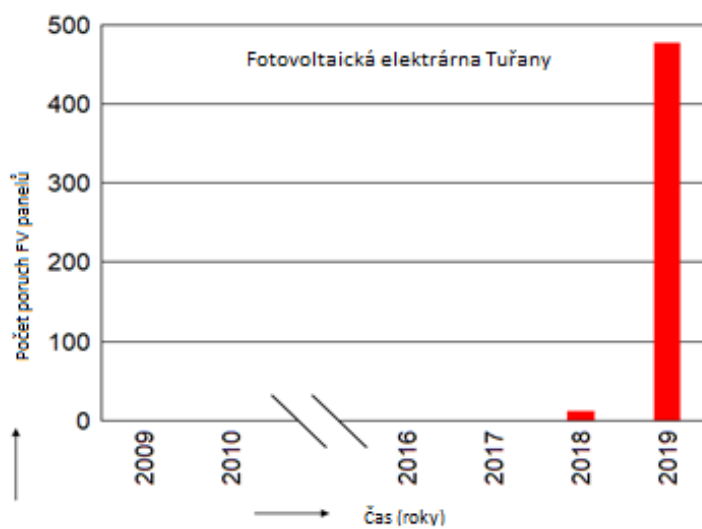
Obrázek 37 Detail dalšího delaminačního kanálu

Delaminace na hraně fotovoltaických panelů byla zkoumána na 15 fotovoltaických elektrárnách, starších deseti let, které jsou monitorovány prostřednictvím systému Solarmon – 2.0. Dále byla vybrána a zkoumána skupina tří elektráren s rozsahem výkonu od 0,4 do 5 MW, protože o těchto elektrárnách je dispozici kompletní soubor dat o všech fotovoltaických panelech a měničích. Tato data jsou zobrazena v tabulce č. 2. Jedná se o fotovoltaické elektrárny v Tuřanech, Měnině a Broumově.

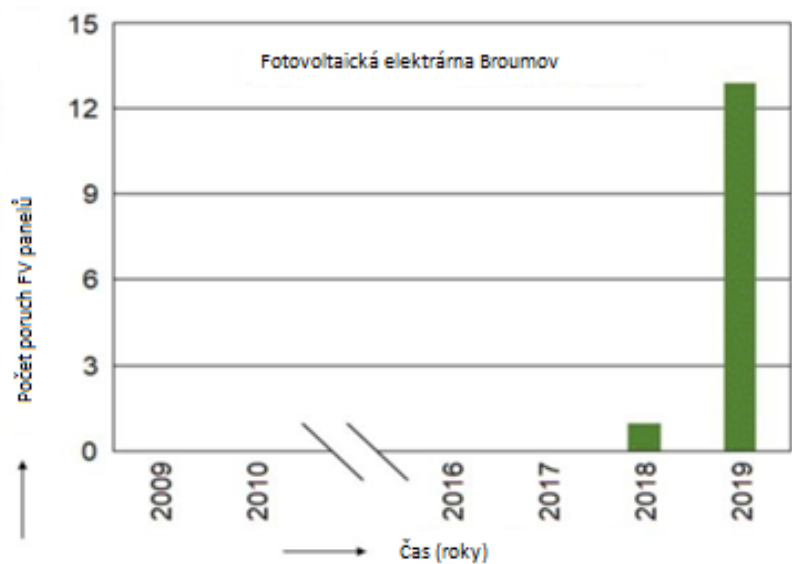
Tabulka 2 Množství závad FV panelů způsobených delaminací ve vybraných FVE instalovaných v roce 2009 v České republice

Lokace	Výkon (MWp)	Počet panelů	Počet panelů ve stringu	Napětí ve stringu (V)	Výkon měniče (kW)	Počet měničů	Typ panelu	Počet poruch zničených měničů			Počet poruch FV panelů		
								2017	2018	2019	2017	2018	2019
Tuřany	5	18522	14	512	33	147	FT260	0	7	21	0	12	477
Měnin	3,3	18837	13	572	7	483	ST175	12	11	20	0	3	292
Broumov	0,4	2160	18	666	45	8	ST185	0	1	4	0	1	13

Až do devátého roku po instalaci nedošlo k žádným elektrickým zkratům. Zkrat byl detekován u 0,3 % fotovoltaických panelů deset let po jejich instalaci a po 11 letech 1 % fotovoltaických panelů bylo dokonce elektrickým zkratem zničeno. Těto skutečnosti odpovídají obr. 38 a obr. 39.

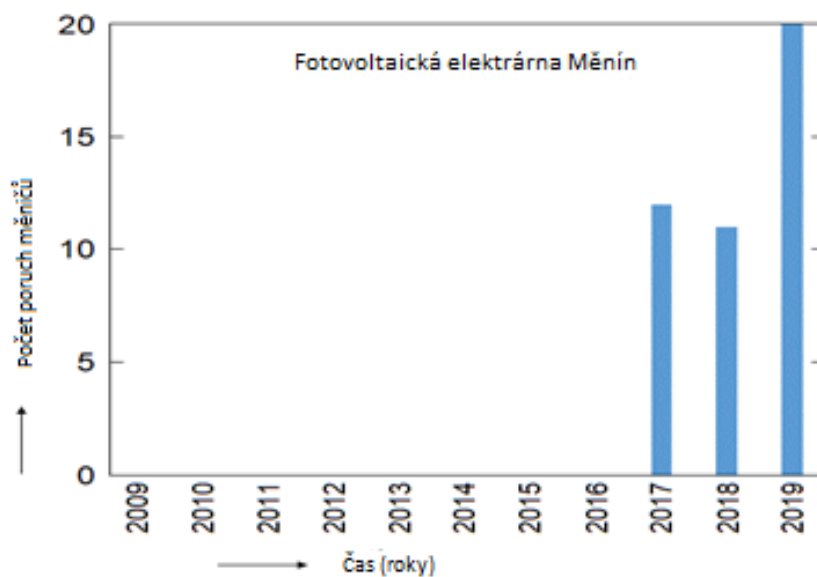


Obrázek 38 Roční počet poruch FV panelů v lokalitě Tuřany

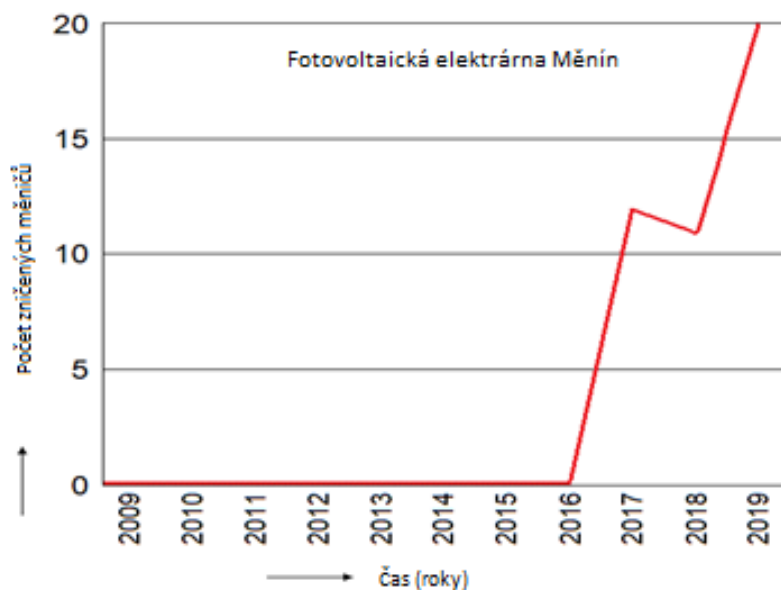


Obrázek 39 Roční počet poruch FV panelů v lokalitě Broumov

Bohužel elektrický zkrat i v jednom panelu obvykle během několika měsíců zcela zničí měnič, který bývá sám o sobě dražší než samotný fotovoltaický panel. Měnič má obvykle ochranný obvod monitorující izolační odpor  $R_{isol}$ , ale při častých výbojích mezi stringem a uzemněným rámem fotovoltaického panelu je ochranný obvod zničen, stejně jako měnič, což je zobrazeno na obr. 40 a obr. 41.



Obrázek 40 Počet poruch měničů v FVE Měnin



Obrázek 41 Počet zničených měničů v FVE Měnin

Vzhledem k tomu, že jediný poškozený panel může buď vypnout, nebo také poškodit měnič obsluhující desítky fotovoltaických panelů, taková porucha má za následek násobící efekt. Poškození měniče je dobře viditelné na obr. 42. I když je poměr poškozených fotovoltaických panelů relativně nízký, činí jen několik procent, tak násobící efekt může způsobit podstatné snížení výroby energie v FVE, anebo podstatné zvýšení cen oprav či náhrad fotovoltaických panelů a měničů. K podobnému poškození fotovoltaického panelu a měniče, z důvodu delaminace hran, dochází ve většině případů na fotovoltaických elektrárnách v České republice, které jsou starší deseti let.



Obrázek 42 Zničený měnič SMA

Dalším nežádoucím účinkem způsobeným redukcí izolačního odporu  $R_{isol}$  z důvodu delaminace hran a pronikání vody je zapnutí měniče až v pozdních ranních hodinách. Ochranný obvod měniče se může zapnout měnič pouze v případě, že je  $R_{isol}$  zvýšen nad prahovou hodnotu, což je obvykle  $1\text{ M}\Omega$ .

FV panely s delaminací hran (před vytvořením vodivého kanálu) ráno podstatně sníží svůj izolační odpor  $R_{isol}$ , dokud se voda v delaminační oblasti nevysuší. Tento proces obvykle trvá cca 3 hodiny, což je viditelné z tabulky č. 3.

Tabulka 3 Počet opožděných zapnutí měničů před a po utěsnění rámu FV panelu

Lokace	Výkon (MWp)	Počet panelů ve stringu	Napětí ve stringu (V)	Typ panelu	Počet opožděně zapnutých měničů	Pozdě zapnuté měniče z důvodu izolačního odporu $R_{isol}$ pod $1\text{ M}\Omega$			
						Počet dní v měsíci		Průměrný čas zapnutí	
						Červen	Srpen	Červen	Srpen
Tuřany	5	14	512	FT 260-60M	15 (450 kW)	31 ze 31	0 ze 31	10:20	7:00
Měnin	3,3	13	572	SST 175-72M	7 (70 kW)	31 ze 31	0 ze 31	10:30	6:50
Broumov	0,4	18	666	SST 185-72M	2 (90 kW)	31 ze 31	0 ze 31	10:30	7:10

To znamená, že velmi podstatná část energie vyrobené fotovoltaickými panely je ztracena, protože měniče nejsou připojeny k síti. Dodatečné utěsnění rámu fotovoltaických panelů siloxanovým gelem může podstatně snížit počet poškození fotovoltaických panelů a fotovoltaických měničů. Bylo vybráno několik měničů s pozdním zapnutím a rámy fotovoltaických panelů v jejich obvodu (stringu) byly utěsněny průhledným polysiloxanovým gelem. Účinek pozdního zapnutí byl zcela eliminován což je jasné z tabulky č. 3. (Poulek & kol., 2021)

## 5.2 Fotovoltaický panel s akumulací energie – kompaktní jednotka

Další část výzkumu se zabývala fotovoltaickým panelem s FV články zapouzdřenými do polysiloxanového gelu a integrovanými lithiovými akumulátory.

Tento experiment měl za cíl zdokonalit konstrukci fotovoltaických panelů s integrovanými akumulátory. Probíhal na malém fotovoltaickém panelu umístěném na střeše Technické fakulty na České zemědělské univerzitě v Praze, který je zobrazený na obr. 43. Panel je obvyklé velikosti  $1650 \times 990 \times 40\text{ mm}^3$  o nominálním výkonu  $P_{Max} = 260\text{ W}$ . FV panel má dvojité sklo a FV články jsou zapouzdřeny v polysiloxanovém gelu. Panel obsahuje 6 integrovaných lithiových akumulátorů, typ NCM o kapacitě 40 Ah a velikosti  $210 \times 188 \times 8\text{ mm}^3$ , které jsou uloženy v nově vyvinutém chladícím pouzdru s podélnými žebry. Tento fotovoltaický panel tak s lithiovými akumulátory tvoří kompaktní jednotku s bateriovým úložištěm.

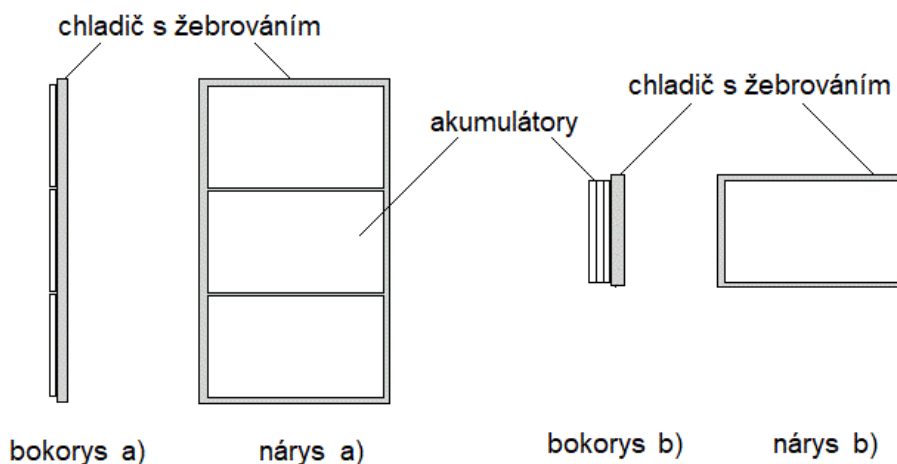


*Obrázek 43 Fotovoltaický panel s integrovanými lithiovými akumulátory*

Sběr dat probíhal celý rok. Byl zde využit nový BIFV design (Building Integrated Photovoltaics, neboli fotovoltaika aplikovaná do konstrukce). Jak bylo zmíněno v kapitole 3, Polysiloxanový gel spolehlivě funguje do 250 °C, narozdíl od materiálu EVA. Tato aplikace sklo/sklo a zapouzdření do polysiloxanového gelu výrazně přispívá k vyšší odolnosti panelu proti vzplanutí.

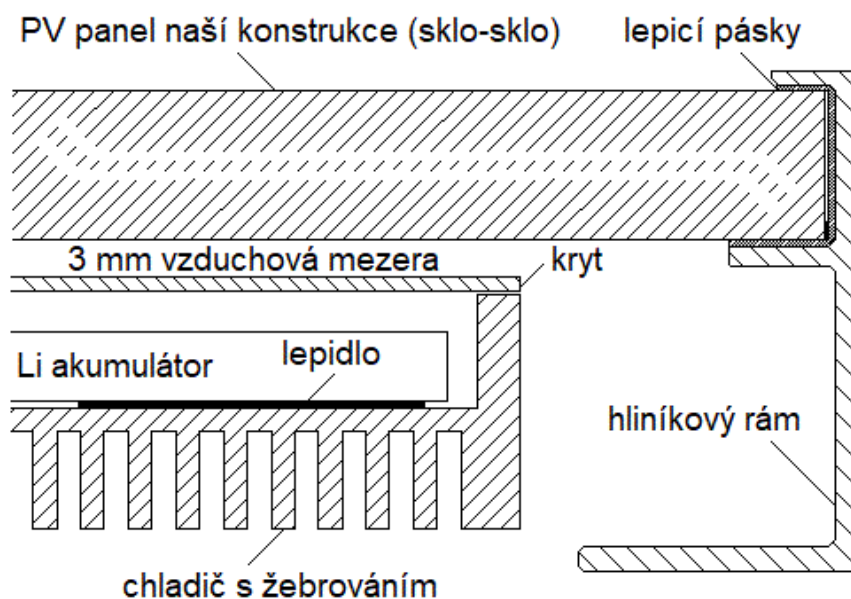
V konstrukci panelu se nachází dvě tvrzené 3 mm široké skleněné tabule, které mají mezi sebou vrstvu 1 mm polysiloxanového gelu, ve kterém jsou zalaty články na bázi monokrystalického křemíku. K dispozici je 54 solárních článků o velikosti 156 x 156 mm<sup>2</sup> o rozložení 6 x 9. Baterie byly připevněny silikonovým lepidlem k hliníkové chladicí jednotce s žebrováním.

Kryt chladicí jednotky byl vyleštěn tak, aby odrážel záření ze zadní strany panelu a také je tepelně izolován od chladicího zařízení. Mezi krytem chladicího pouzdra a zadní stranou panelu je vzduchová mezera pouhé 3 mm. Tento princip se nazývá komínový efekt, protože tudy může odcházet teplý vzduch. K měření teplot byly využity standardní termočlánky. Ke kontrole byla použita infračervená kamera FLIR. Ploché akumulátory byly uspořádány paralelně vzhledem k profilu chlazení. Schéma uspořádání těchto plochých akumulátorů je vyznačené na obr. 44. Z hlediska účinnosti chlazení je to lepší než sériové uspořádání akumulátorových desek.



Obrázek 44 Schéma paralelního a sériového uspořádání akumulátorů vzhledem k desce chladičského profilu

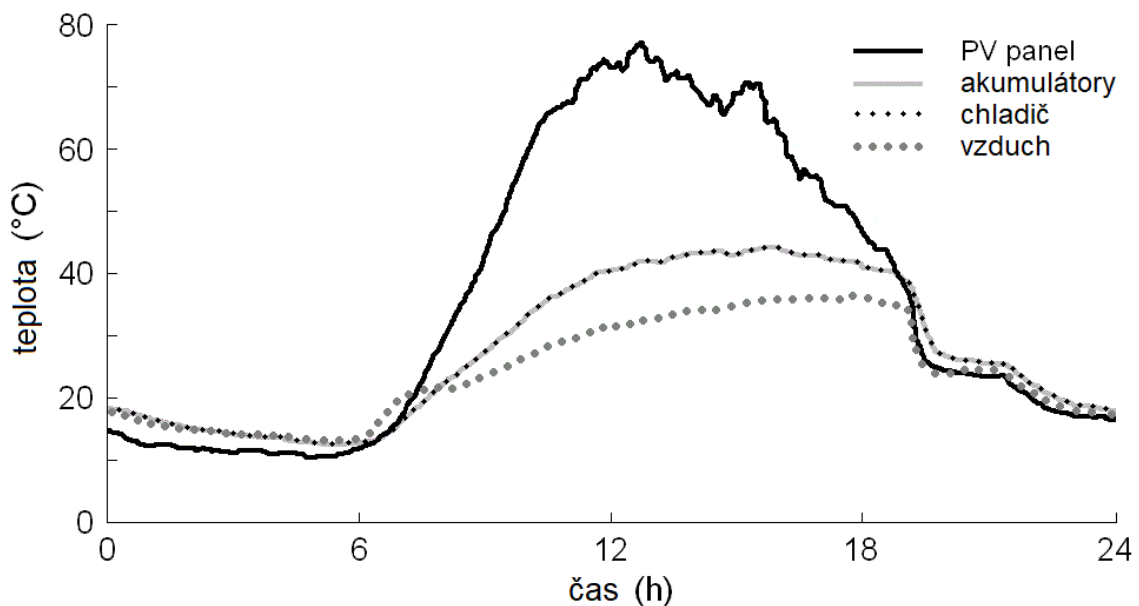
Na rozdíl od sériového zapojení jsou v paralelním zapojení všechny akumulátory přímo chlazený chladičským profilem. V případě poškození akumulátory mezi sebou nesdílejí nadměrné teplo. Mezi hliníkovým krytem chladičské jednotky na zadní straně FV panelu je vzduchová mezera 3 mm, zobrazená na obr. 45.



Obrázek 45 Průřez panelem naší konstrukce

Akumulátory byly nabíjeny fotovoltaickým panelem a vybíjeny digitální zatěžovacím zařízením EA-EL 3160-60. Vybíjecí proud byl ustálen na 8 A. Teploty hliníkového pouzdra, FV panelu a pouzdra akumulátoru byly měřeny pomocí termočlánků po dobu jednoho roku, protože krátkodobější údaje nejsou relevantní. Důležité parametry jako jsou intenzita slunečního záření a teplota byly měřeny profesionální meteorologickou stanicí, která je instalována v areálu České zemědělské univerzity v Praze.

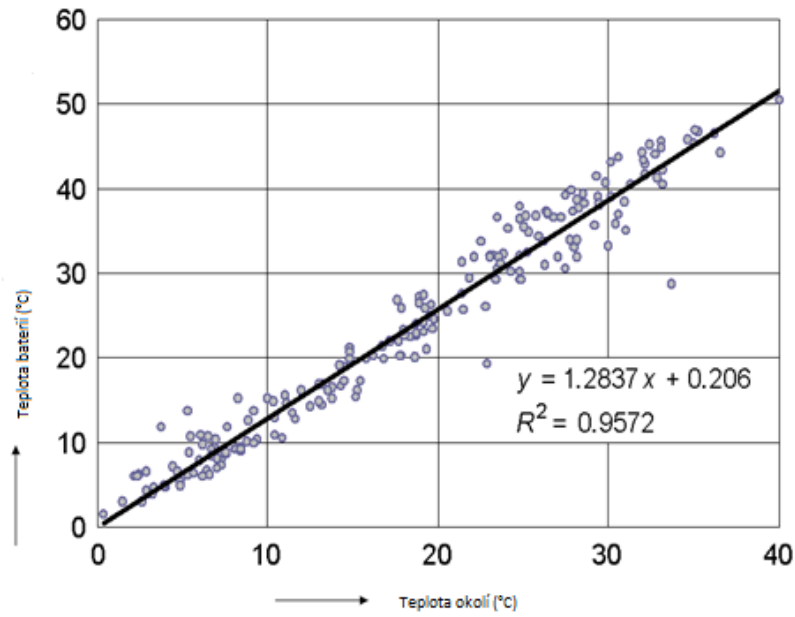
Hlavní výsledky jsou zobrazeny na následujícím obr. 46, který ukazuje teploty vzduchu a akumulátorů během 28. června. A i když se teploty fotovoltaických panelů přibližují k 80 °C, stěžejní je teplota akumulátorů.



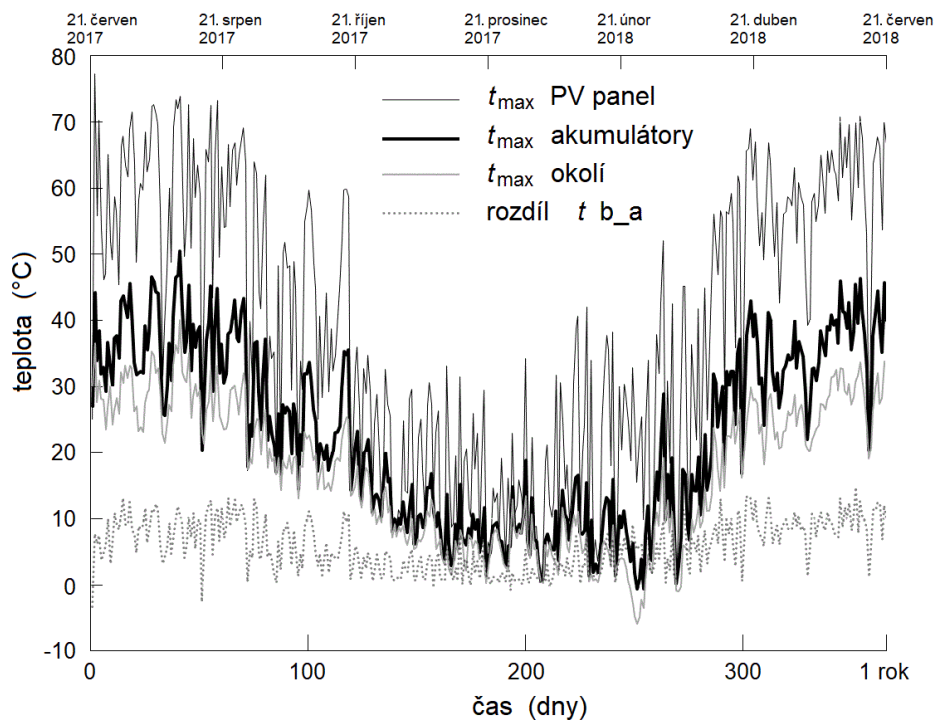
Obrázek 46 Teploty fotovoltaických panelů během letního dne 28. června

Obr. 47 zobrazuje teploty vzduchu a akumulátorů během roku pozorování. Za každý den je zde vynesena pouze maximální teplota, protože ta je důležitá pro provoz lithiových akumulátorů. Z obr. 48 je vidět, že maximální zvýšení teploty akumulátorů nad okolní teplotu bylo pouze 13°C. Tento výsledek je v souladu s teoretickým výpočtem a krátkým laboratorním testem uvedeným v práci (Vega-Garita & kol., 2017) a také počátečním předpokladem.





Obrázek 47 Maximální denní teplota FV panelů s integrovanými lithiovými akumulátory oproti teplotě okolí během jednoho roku



Obrázek 48 Teploty fotovoltaického panelu, lithiových baterií a okolí během ročního pozorování

Hlavním a neméně podstatným rozdílem mezi teoretickým výpočtem, který je uveden v práci (Vega-Garita & kol., 2017) a naším experimentem je vzduchová mezera mezi fotovoltaickým panelem a pouzdem s lithiovými akumulátory.

Teorie navrhuje vzduchovou mezeru o tloušťce 70 mm, zatímco tento jednorozměrný experiment v reálných podmínkách s novým uzavřeným pasivním chladicím pouzdem používá vzduchovou mezeru pouze o tloušťce 3 mm. V tomto případě se lithiové akumulátory s chladicím pouzdem dobře vejdu do rámu v nové konstrukci fotovoltaických panelů. (Poulek & kol., 2020)

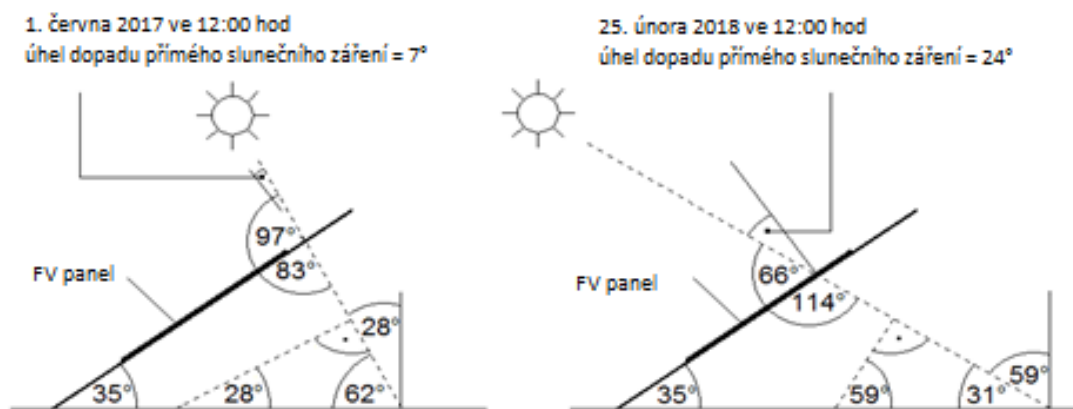
### 5.3 Provoz FV systému v Praze a vyhodnocení dat

Oproti předchozí práci je experiment zaměřený pouze na jeden fotovoltaický systém, který je umístěn na střeše Technické fakulty, a kromě celkového množství vyrobené elektrické energie je monitorováno i rozložení výstupního výkonu během vybraných slunečných dní. Jako v předchozích pracích, i zde byl k monitorování použit monitorovací systém Solarmon - 2.0, zmíněný v práci (Beránek & kol., 2018).

Na obr. 49 je zobrazený FV systém, který je instalovaný na Technické Fakultě. Jedná se celkem o 40 FV panelů značky Renesola, GmbH, konkrétně o typ JC 260M-24/Bb se jmenovitým výstupním výkonem  $P_{Max}=260 \text{ W}_p$  na bázi polykrystalického křemíku. Tyto panely jsou zapojeny do dvou nezávislých sekcí, které jsou připojené k distribuční síti přes měniče. Fotovoltaické panely mají pevný stojan s orientací na jih a sklonem  $35^\circ$ . Jmenovitý výstupní výkon celého fotovoltaického systému je cca 10 kWp.

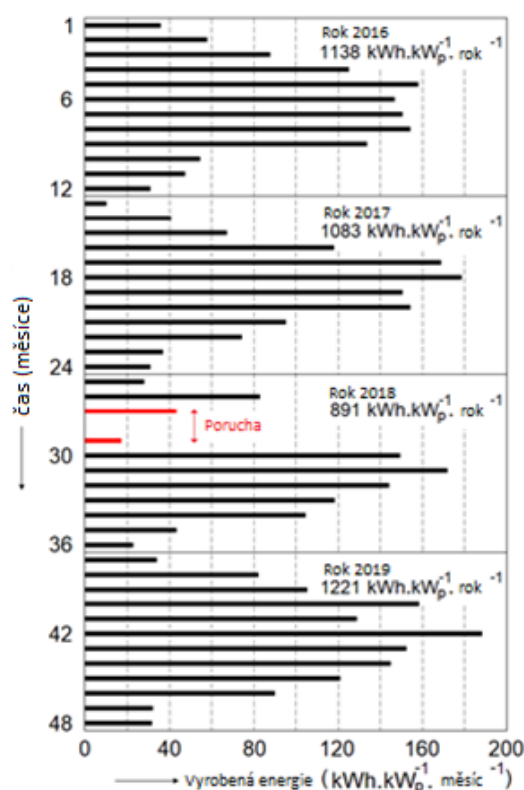


Obrázek 49 Síťový fotovoltaický systém instalovaný na střeše Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze



Obrázek 50 Schéma fotovoltaického systému ukazující úhel dopadu přímého slunečního záření v poledne během vybraných dní

Na obr. 50 je znázorněné schéma fotovoltaického systému s úhlem dopadu přímého slunečního záření. Jsou porovnávána data z poledne 1. června 2017 a z poledne 25. února 2018.



Obrázek 51 Množství vyrobené elektřiny, vyrobené v letech 2016-2019, vypočítané na 1 kWp instalovaného výkonu

Obr. 51 zobrazuje množství vyrobené elektrické energie za 4 roky provozu tohoto systému. Avšak v roce 2018 nastala delší porucha monitorovacího systému, takže data o množství vyrobené energie nejsou dostupná, a tudíž je nelze srovnávat.

Tabulka č. 4 ukazuje odhadované množství vyrobené elektrické energie za rok podle aplikace PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). V porovnání s obr. 51, který ukazuje reálné množství vyrobené elektrické energie je vidět, že tento fotovoltaický systém ve všech letech vyrobil o něco více elektrické energie, bylo přepokládáno, až na rok 2018, kdy nastala porucha monitorovacího systému. Vzhledem k dosaženým datům se FV systém jeví jako kvalitní. Poruchami panelů a jejich defektů se například zabývala práce (Libra & kol., 2019), kdy byl k monitorování využit dron.

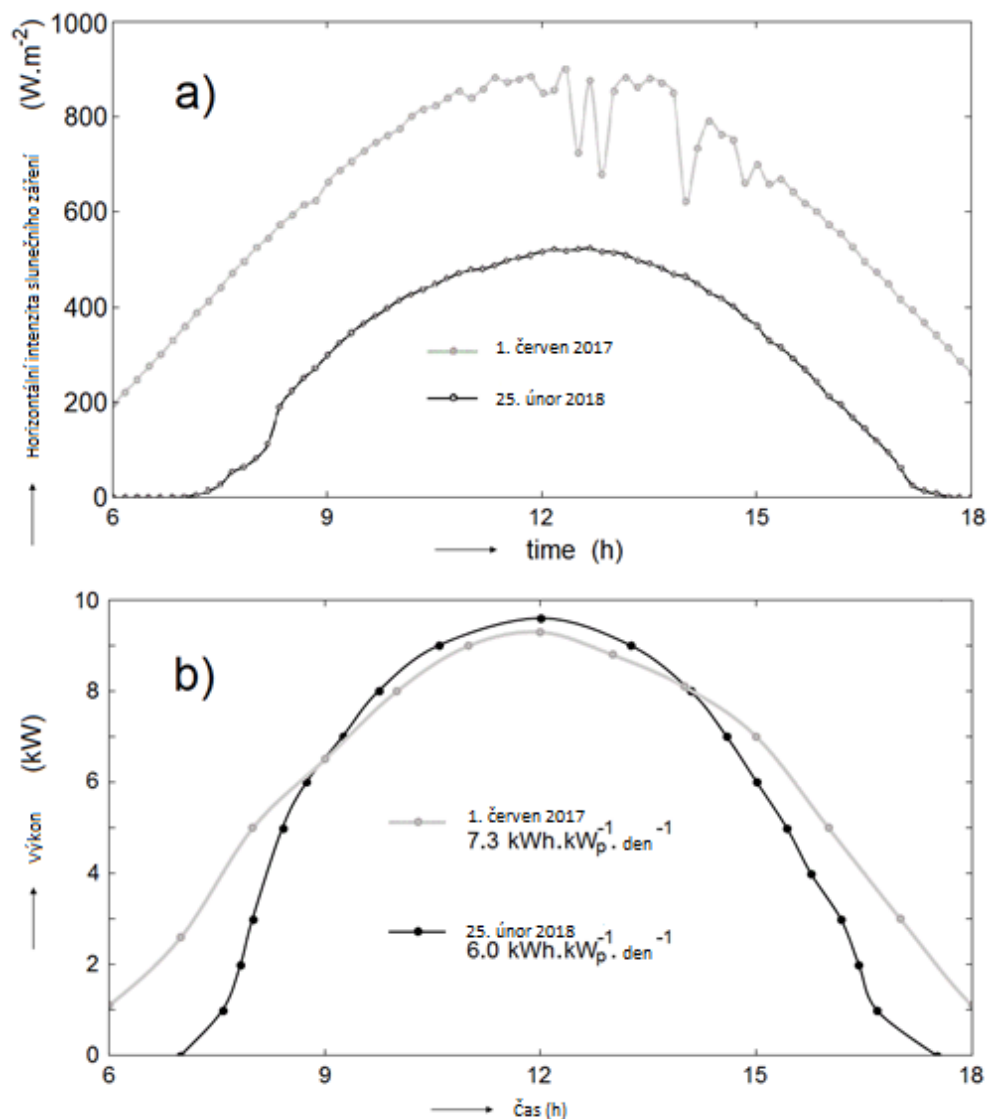
Tabulka 4 Odhadované množství elektřiny vyrobené za rok

Měsíc	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Celkem
Elektřina (kWh.kWp <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> )	37,4	54,9	90,8	122,2	128,8	128,4	130,4	121,4	105,2	72,6	39,3	36,3	1068

Tabulka 5 Naměřené a vypočtené hodnoty důležitých parametrů a konečný vypočítaný rozdíl výstupního výkonu v poledne ve slunečný den

Zkoumaný parametr	01.06.2017	25.02.2018
Teplota FV panelů (°C)	42	6
Rozdíl účinnosti přeměny energie v důsledku teplotního rozdílu (%)	+3.2	
Úhel dopadu (°)	7	24
Horizontální intenzita přímého záření (W.m <sup>-2</sup> )	830	520
Vypočítaná vertikální intenzita záření (W.m <sup>-2</sup> )	940	1010
Vypočítaná intenzita záření na FV panelech (W.m <sup>-2</sup> )	933	923
Rozdíl intenzity záření na FV panelech (W.m <sup>-2</sup> )	-10	
Rozdíl v intenzitě přímého záření (%)	-1.1	
Vzdálenost Země od Slunce (AU)	1.01396	0,98992
Vlhkost vzduchu (%)	46	45
<b>Konečný vypočítaný rozdíl výstupního výkonu 25. února ve srovnání s 1. červnem (%)</b>	<b>+2.1</b>	

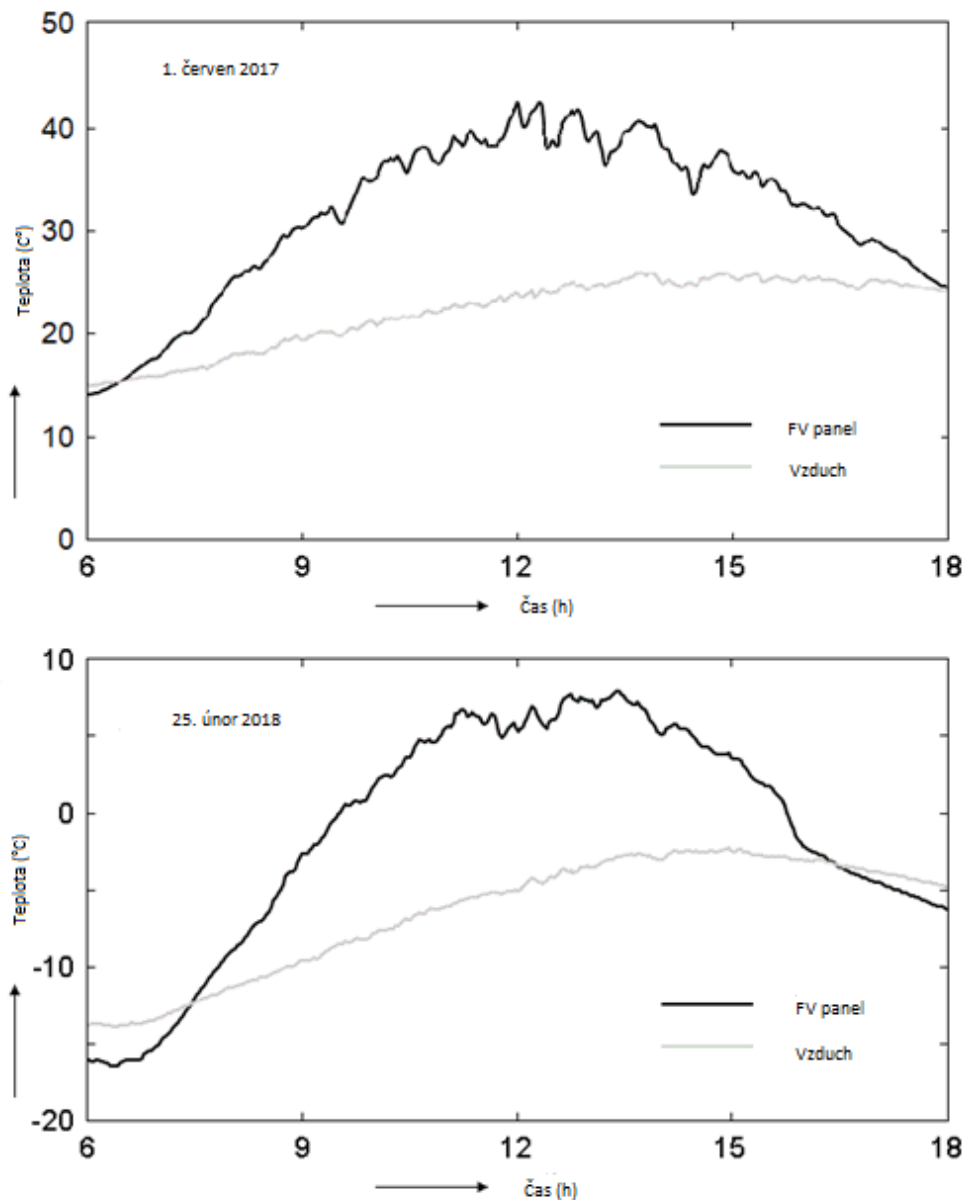
Obr. 52 ukazuje závislost horizontální intenzity záření a okamžitého výkonu na čase, a to během dvou vybraných slunečných dní.



Obrázek 52 Závislost horizontální intenzity záření a okamžitého výkonu na čase

Obr. 53 ukazuje závislosti teploty fotovoltaických panelů a teploty vzduchu na čase. Za předpokladu, že se zaměříme pouze na maximální hodnoty v poledne, je jasně vidět, že naměřená hodnota okamžitého výkonu je dne 25. února 2018 o cca 3 % vyšší než dne 1. června 2017. Což je způsobeno nižší teplotou panelů, úhlem dopadu solárního záření a také vzdáleností Země od Slunce. Teoretické vyhodnocení naměřených dat je shrnuto v tabulce č. 5. Avšak s intenzitou slunečního záření je situace opačná (viz tabulka č. 5).

Hodnoty intenzity přímého slunečního záření na roviny kolmé ke směru záření a na roviny fotovoltaických panelů byly vypočteny pomocí pravoúhlých trojúhelníků a také aplikací goniometrických funkcí. Tento rozdíl v intenzitě je v tabulce č. 5 je zobrazený jako -1,1 %, což tedy znamená, že 25. února je tato hodnota intenzity o 1,1 % nižší než 1. června.



Obrázek 53 Závislost teploty fotovoltaických panelů a teploty vzduchu na čase

Intenzita záření na rovinu kolmou ke směru záření může být diskutována, protože rozdíl, který je způsobený odlišným úhlem dopadu a také vlivem atmosféry, by měl činit přibližně 15 %. Nicméně z důvodu větší vzdálenosti Země od Slunce by mělo dojít ke snížení intenzity záření v červnu cca o 5 %.

To je způsobeno skutečností, že je intenzita záření nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti. Dle očekávání by tedy hodnoty v červnu měly být vyšší, ale na obr. 52 a) jsou zřejmé fluktuace okamžitého výkonu v poledne dne 1. června. Tyto fluktuace jsou pravděpodobně způsobeny párou, která není lidským okem viditelná, avšak na výkonu fotovoltaického systému se projeví. Tato skutečnost naznačuje, že vybraný den nebyl zcela jasný, protože v takovém případě by byly hodnoty výkonu vyznačeny hladkou křivkou. Z toho vyplývá, že fluktuace zřejmě zapříčiňují chybějící procenta. Na obr. 52 b) tento efekt není patrný, protože je zde menší hustota naměřených bodů, kterými je křivka proložena.

Výsledkem výpočtů je tedy rozdíl v množství vyrobené elektrické energie, který činí +2,1 %, což je v dobré shodě s naměřeným rozdílem +3 %. (Šafránková & kol., 2021)

#### 5.4 Autonomní FV systém s akumulací energie v Panenských Břežanech

Počátky studia se zabývaly konstrukcí, použitím a výsledky testování autonomního FV systému, využitého pro noční osvětlení stáje. Tento systém je menšího měřítka. Většími FV systémy, které sloužily pro pouliční osvětlení se zabývala například práce (Liu G. , 2014). V našem případě byla z důvodu dlouhodobější spolupráce a známosti zvolena stáj v Panenských Břežanech nedaleko Prahy. Dalším parametrem pro výběr lokality byly i informace ze softwaru PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). Tento software je bezplatný kalkulátor fotovoltaické energie, který slouží pro odhad výroby elektřiny z FVE.

Ke konstrukci autonomního fotovoltaického systému byl použit experimentální fotovoltaický panel na bázi monokrystalického křemíku s jmenovitým výkonem  $P_{max} = 170 \text{ W}$ , který je na obr. 54. Uvnitř budovy je implementována baterie na bázi olova značky Tesla – 12 V a 45 Ah (viz obr. 55) a dále solární regulátor nabíjení s MPPT (Maximum Power Point Tracking).

V praxi to znamená, že regulátor (Solar charge controller) sám řídí rozsvícení světelného zdroje za soumraku a také zhasínání při rozbřesku.



Obrázek 54 FV panel aplikovaný v Panenských Břežanech



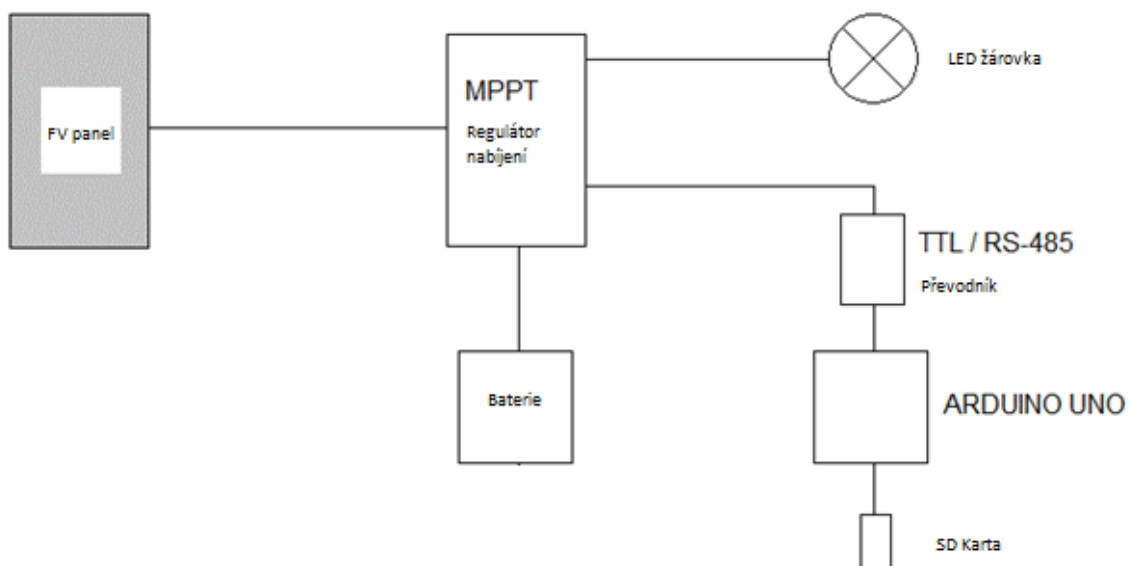
Použitý akumulátor při plném nabití dává napětí naprázdno cca  $U_e = 14 \text{ V}$  a může akumulovat energii cca  $W_{max} = 0,5 \text{ kWh}$ . Použitý světelný zdroj na bázi LED odebírá výkon cca  $P = 1,5 \text{ W}$  (12 V, 165 lm, 120°).

Tento zdroj je umístěn ve vodotěsném pouzdru. Sběr dat je plně automatický. Je zajištěn pomocí programovatelné platformy ARDUINO (microcontroller ARDUINO UNO), kdy se data ukládají na SD kartu. ARDUINO UNO je v podstatě malý jednodeskový počítač, pracující na principu mikrokontrolerů od firmy Atmel.

Na obrázku č. 56 je znázorněno blokové schéma použitého fotovoltaického systému v Panenských Břežanech. Skládá se tedy z fotovoltaického panelu, MPPT měniče, baterie, LED žárovky, převodníku TTL, jednotky ARDUINO a SD karty. (Dang & kol., 2019)



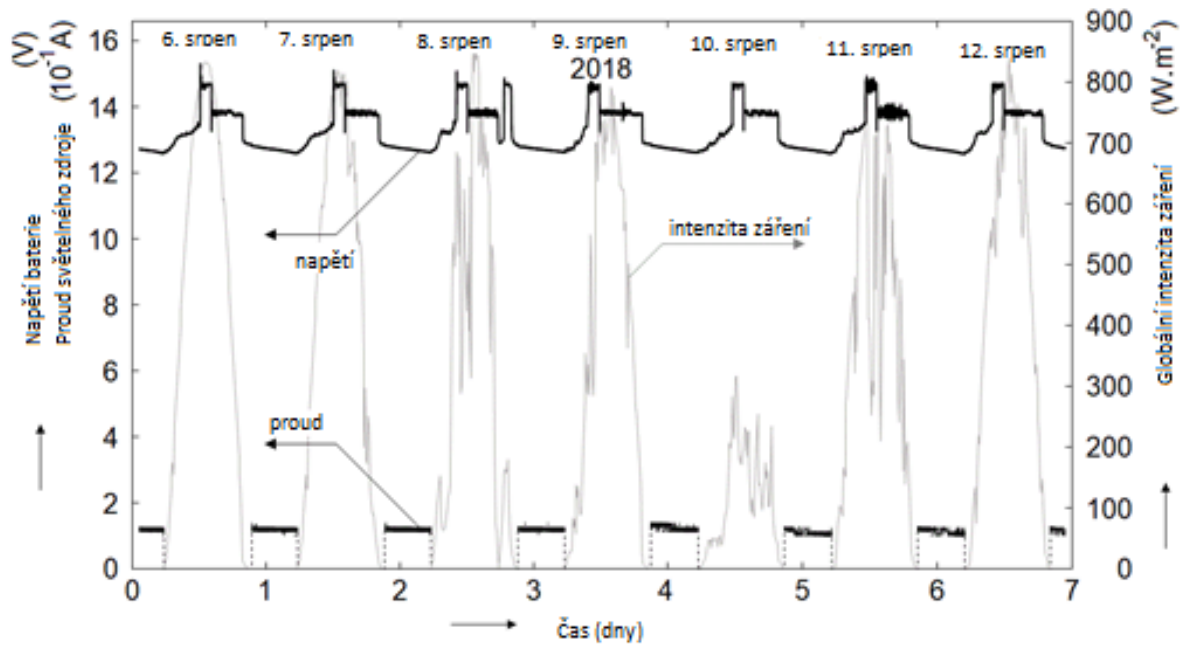
Obrázek 55 Baterie Tesla



Obrázek 56 Blokové schéma fotovoltaického systému

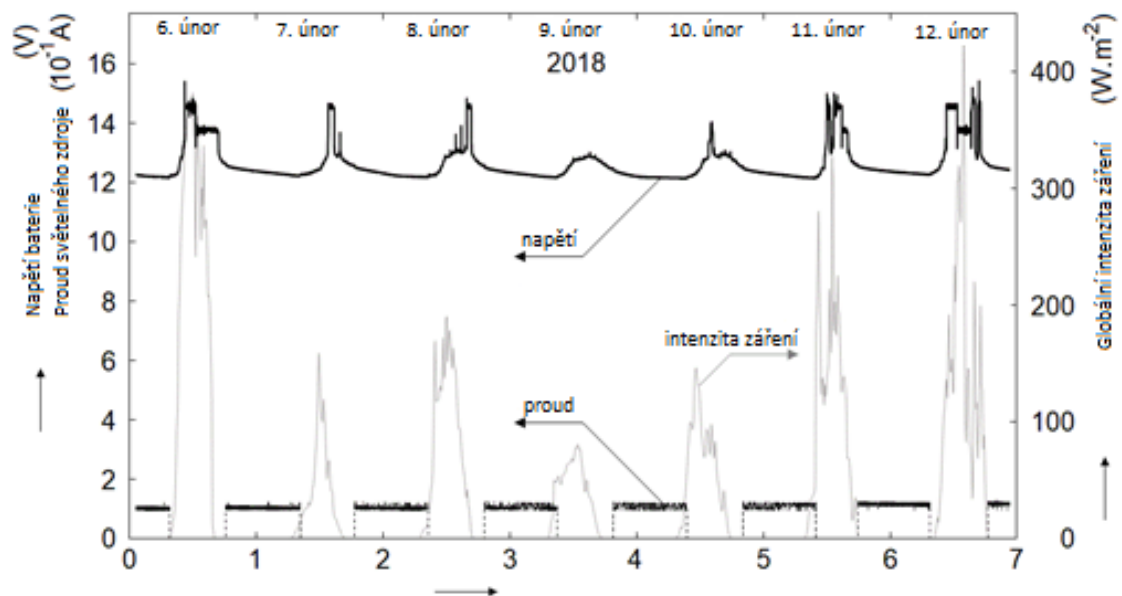
Na obr. 57 jsou znázorněny závislosti napětí baterie, proudu světelným zdrojem a globální intenzity záření na času během několika vybraných letních dní. Z tohoto obrázku tedy vyplývá, že během odpoledních hodin je baterie nabitá a je dobíjena pouze udržovacím proudem, což odpovídá konstantní hodnotě napětí na prázdno  $U=14 \text{ V}$ . Ve večerních hodinách, při zapnutí zdroje napětí trochu klesne, což je v souladu s Kirchhoffovými zákony a během svícení se pomalu vybíjí.





Obrázek 57 Časová závislost napětí baterie, proudu zdroje a intenzity záření během letních dní

Pro porovnání je na obr. 58 obdobná situace, jen během zimních dní. Záměrně byly vybrány dny s oblačností. Tento obrázek značí, že i když zde byl rozdíl v délce dní oproti obr. 57 a také byla nižší intenzita záření, zařízení bylo i nadále funkční a nedocházelo k jeho výpadku. Sice v některých dnech nedošlo k plnému nabití baterie, ale i tak zařízení pracovalo spolehlivě.



Obrázek 58 Časová závislost napětí baterie, proudu zdroje a intenzity záření během zimních dní

## 5.5 Návrh a monitorování dat z fotovoltaické elektrárny na jižní polokouli

Tento výzkum probíhal ve spolupráci s dalšími doktorandy a pracovníky katedry fyziky České zemědělské univerzity v Praze.

Podstatou tohoto experimentu je porovnání fotovoltaických elektráren různé konstrukce s různými slunečními podmínkami. První systém se nachází v Chile, kde jsou dle PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>) výborné sluneční podmínky, další dva systémy se nachází ve střední Evropě.

Fotovoltaický systém v Chile, který je zobrazen na obr. 59, obsahuje FV panely s pohyblivým stojanem. FV systémy v Evropě se skládají z pevných panelů. U těchto vybraných fotovoltaických systémů porovnáváme množství vyrobené elektrické energie.

První fotovoltaický systém je umístěn v Cuz Cuz v Chile s lokací v subtropické polopouštní oblasti. Tento fotovoltaický systém je pokročilé konstrukce s automatickým pohyblivým stojanem FV panelů, kdy je pohyblivá osa umístěna vodorovně ve směru sever-jih.



Tabulka 6 Fotovoltaický systém v Cuz Cuz (Chile)

Obrázek 59 Fotovoltaický systém v Chile

Specifikace panelů v Cuz Cuz (Chile)	
Značka fotovoltaických panelů	BYD P6C-36.
Druh fotovoltaického panelu	Panel na bázi polykrystalického křemíku
Nominální výkon panelu	305 W <sub>p</sub>
Nominální výkon celého FV systému	3000 kW <sub>p</sub> .

Další dva fotovoltaické systémy s odlišnou konstrukcí jsou nainstalované v Praze se slunečními podmínkami běžnými pro mírný pás střední Evropy.

První ze sledovaných systémů v Praze 6 – Suchdole se nachází na střeše Technické fakulty České zemědělské univerzity (viz obr. 60). Jedná se o fotovoltaický systém standardní konstrukce s pevným stojanem fotovoltaických panelů.



Obrázek 60 Fotovoltaický systém na střeše Technické fakulty

Tabulka 7 Fotovoltaický systém v Praze 6 – Suchdole

Specifikace panelů v Praze 6 – Suchdole	
Značka fotovoltaických panelů	Renesola, GmbH JC 260M-24/Bb
Druh fotovoltaického panelu	Panel na bázi polykrystalického křemíku
Nominální výkon panelu	260 W <sub>p</sub>
Nominální výkon celého FV systému	10 kW <sub>p</sub> .

Poslední sledovaný fotovoltaický systém, nacházející se v Praze – Vršovice je zkonstruován z flexibilních hydroizolačních fotovoltaických pásů, které jsou položeny vodorovně na střeše fotbalového stadionu, a to bez podpůrných stojanů, což lze dobře vidět z obr. 61. Celkový počet 1040 pásů je zapojen do 8 nezávislých sekcí a ty jsou dále zapojeny do 8 slučovacích rozvaděčů. Dále je do každého rozvaděče přivedeno 26 stringů, po 5 fotovoltaických pásech.

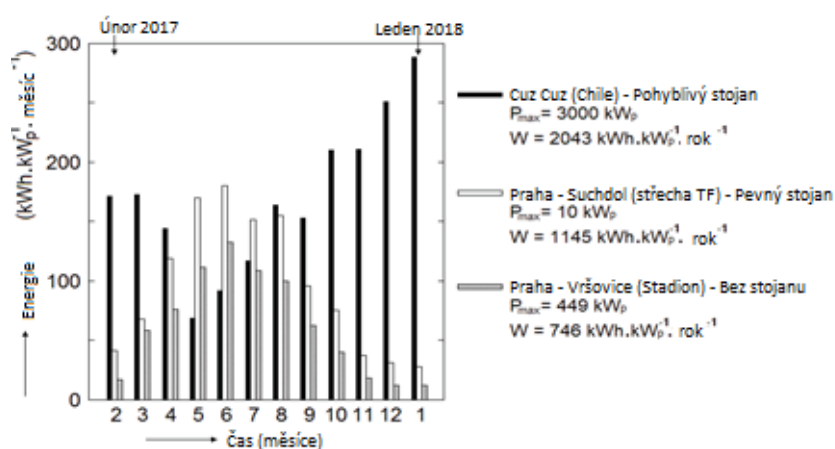


Obrázek 61 Fotovoltaický systém v Praze - Vršovicích

Tabulka 8 Fotovoltaický systém v Praze – Vršovice

Specifikace panelů v Praze – Vršovice	
Značka fotovoltaických panelů	VAEPLAN V Solar 432
Druh fotovoltaického panelu	flexibilní hydroizolační fotovoltaické pásy
Nominální výkon panelu	432 W <sub>p</sub>
Nominální výkon celého FV systému	449 kW <sub>p</sub> .

Všechny tyto tři fotovoltaické systémy jsou napojené na monitorovací systém Solarmon - 2.0, kdy sběr a vyhodnocení dat probíhá v laboratoři na katedře fyziky. Na následujícím obr. 62 je znázorněné množství vyrobené elektrické energie ve zmíněných fotovoltaických systémech během doby jednoho roku. Znázorněné hodnoty jsou uvedeny nejen po jednotlivých měsících, ale i za celý rok. Protože v Cuz Cuz jsou období léto a zima opačně než v Evropě, jsou nejvyšší hodnoty znázorněny v prosinci a lednu a nejnižší hodnoty jsou poté v květnu a červnu. Rovněž vyplývá, že hodnota vyrobené elektrické energie za rok v Chile je téměř dvojnásobná v porovnání se systémem v Praze 6 – Suchdole a téměř trojnásobná oproti systému v Praze – Vršovících.



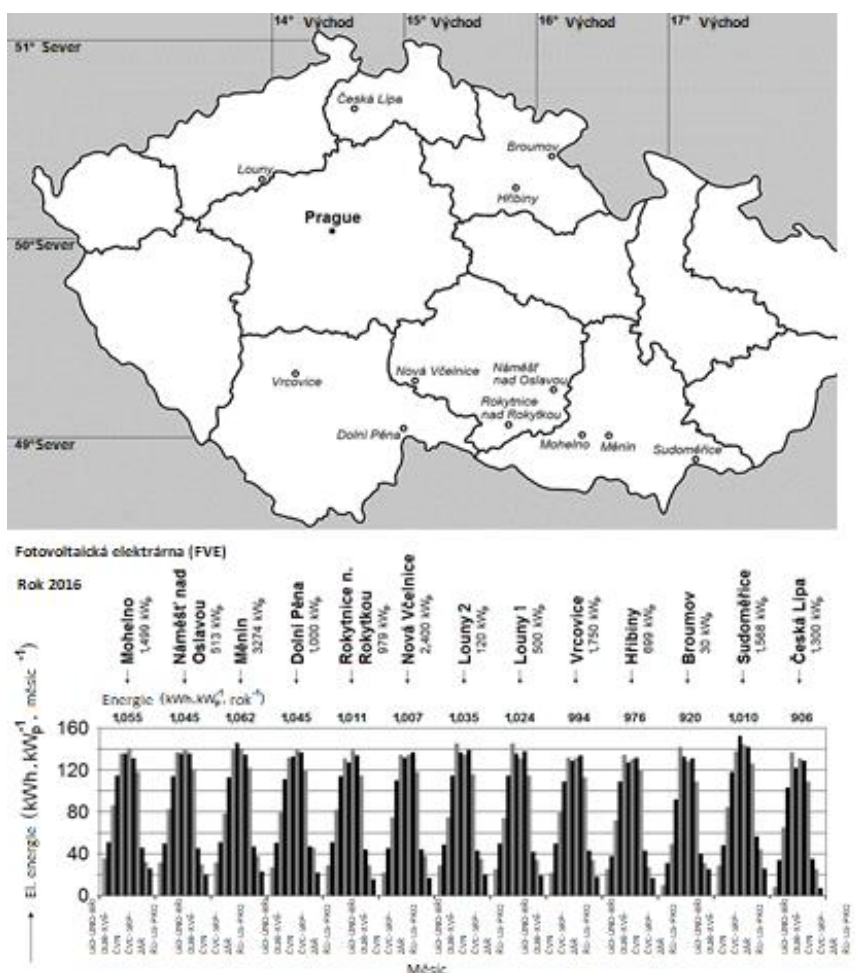
Obrázek 62 Porovnání množství vyrobené elektrické energie ze tří FVE během roku

Je prokázáno, že takto vysoká hodnota vyrobené elektrické energie v Cuz Cuz spočívá hlavně v lokalitě s výbornými slunečními podmínkami a také samozřejmě v pokročilé konstrukci fotovoltaického systému. Z dat prokazatelně vyplývá, že panely v této oblasti jsou zaprášené pouštním prachem, nicméně i tak je hodnota vyrobené elektrické energie vysoká.

Naměřené hodnoty systémů instalovaných v Praze odpovídají hodnotám podle aplikace PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). Přepokládané hodnoty systému v Praze 6 – Suchdole byly dokonce o trochu překonány, což může být hlavně způsobeno kvalitními fotovoltaickými panely. Naopak tomu je v případě fotovoltaického systému v Praze – Vršovících, kdy očekávaná hodnota je vyšší než hodnota reálná, což bylo vysvětleno v práci (Libra & kol., 2016) prašným prostředím v blízkosti železniční trati a také mírným zaoblením střechy, což má za následek, že všechny fotovoltaické panely nejsou zcela vodorovné.

Střechy a fasády budov jsou považovány za vhodná místa pro instalaci fotovoltaických systémů, zejména v oblastech střední Evropy s vysokou hustotou obyvatelstva. V pouštních a polopouštních oblastech je cena půdy i hustota obyvatelstva nízká, a proto instalace FV systémů považujeme za vhodné řešení i na volných plochách. Proto všechny tři FV systémy, které jsou popsány v tomto výzkumu byly koncipovány právě takto.

Kvůli lepšímu srovnání obr. 63 ukazuje množství vyrobené elektrické energie během jednoho roku v dalších vybraných 13 fotovoltaických elektrárnách, které jsou rozmístěné po celé České republice. Všechny tyto elektrárny jsou napojeny na monitorovací systém Solarmon - 2.0. Z obrázku vyplývá, že se roční hodnoty vyrobené elektrické energie pohybují kolem hodnot očekávaných. Jedinou výjimku tvoří sever České republiky, kde jsou hodnoty o trochu nižší, než bylo očekáváno. (Daneček & kol., 2020)



Obrázek 63 Množství vyrobené elektrické energie ve 13 FVE

## 6 Závěr

### 6.1 Poškození fotovoltaických panelů a fotovoltaických měničů způsobených delaminací hran, proniknutím vody a vysokým napětím ve stringách v mírném klimatu

Tento experiment se zabýval zkoumáním instalovaných fotovoltaických panelů v roce 2009 v České republice, přičemž tyto panely byly vyrobeny v Asii a České republice. Nejčastější problémy fotovoltaických panelů jsou spojeny hlavně s delaminací. Po deseti letech provozu počet poškozených fotovoltaických panelů výrazně vzroste, a to zejména kvůli kritickým delaminačním poruchám. Z čehož tedy vyplývá, že životnost fotovoltaického panelu odhadovaná na 25 až 30 let, která je deklarována mnoha výrobci fotovoltaických panelů, je až příliš optimistická. Tím je tedy vyvrácena první stanovená hypotéza, uvedená v kapitole 2, týkající se právě životnosti fotovoltaických panelů.

Systémové napětí všech zkoumaných fotovoltaických elektráren bylo pouze v rozsahu 500–600 VDC (Voltů stejnosměrného proudu). Je možné, že v nových fotovoltaických elektrárnách se systémovým napětím 1100–1300 VDC dojde ke kritickému selhání delaminací dřívě. Delaminace bude v extrémních klimatických podmínkách ještě kritičtější a měla by být zohledněna. Zapouzdření etylenvinylacetátem je levné, ale z hlediska trvanlivosti ne tak dobré. Problematikou zapouzdření se zabývají práce (Van Dyk & kol., 2005), (Omazic & kol., 2019) a (Miller & kol., 2013). K podstatnému prodloužení životnosti fotovoltaických panelů by mohl být použit o něco dražší polysiloxan (Poulek & kol., 2012).

Díky tomuto výzkumu bylo prokázáno, že dodatečné utěsnění rámu fotovoltaických panelů polysiloxanovým gelem velmi výrazně snížilo počet kombinovaných poruch fotovoltaického panelu a fotovoltaického měniče.

### 6.2 Fotovoltaický panel s akumulací energie – kompaktní jednotka

Během celoročního zkoumání bylo prokázáno, že teplota lithiových akumulátorů integrovaných do fotovoltaického panelu obvyklé velikosti nepřekročila teplotu okolního vzduchu o více než 13°C. Tento rok trvající experiment byl prováděn ve skutečných venkovních podmínkách v klimatických podmínkách střední Evropy (dle PVGIS <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). Výsledky jsou v souladu s teoretickým výpočtem a s krátkým laboratorním testem uvedeným v práci (Vega-Garita & kol., 2017). Z těchto výsledků se dá usuzovat, že ani v tropických či subtropických zemích s okolní teplotou do 50 °C nebude překročena maximální povolená teplota lithiových akumulátorů, která je stanovena na 65 °C.



Tento experiment potvrdil, že vzduchová mezera o tloušťce 3 mm mezi chladicím pouzdrém akumulátorů a fotovoltaickým panelem je dostatečná a není tedy nutná mezera o tloušťce 70 mm, která je navržena v práci (Vega-Garita & kol., 2017).

Tato nová konstrukce umožňuje aplikovat akumulátory s chladicím pouzdrém do rámu fotovoltaických panelů a instalovat je na střechy či fasády budov nebo také na venkovní plochy. Jejich využití je poměrně pestré, například je lze využít jako nouzové zdroje energie při výpadku sítě.

Ze získaných a vyhodnocených dat lze usuzovat, že výzkum potvrdil hypotézu, stanovenou v kapitole 2, tedy že lze zkonstruovat fotovoltaický panel s akumulací energie tak, aby se baterie nepřehřívala.

### 6.3 Provoz FV systému v Praze a vyhodnocení dat

Fotovoltaický systém na střeše Technické fakulty spolehlivě pracuje již pátý rok. Z naměřených dat vyplývá, že množství vyrobené elektrické energie je dokonce vyšší, než byl teoretický předpoklad podle aplikace PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). V tomto teoretickém vyhodnocení hrály hlavní roli vybrané parametry jako je intenzita záření a teplota fotovoltaických panelů, nicméně množství vyrobené energie je závislé na více parametrech, což znamená že i v zimním období může být okamžitý výkon FVE vyšší, než v období letním na což má vliv teplota fotovoltaických panelů, také úhel dopadu a samozřejmě vzdálenost Země od Slunce. Dále mají na výstupní výkon vliv také parametry jako je zaprášení panelů, sklon panelů, nebo jejich orientace.

Dle předchozích výzkumů by množství vyrobené elektrické energie mohlo být navýšeno chlazením fotovoltaických panelů, a to hlavně proto, že při nižší teplotě je vyšší účinnost fotovoltaické přeměny energie což vyplývá z práce (Libra & kol., 2017). To by ale bylo náročnější jak na konstrukci panelů, ale také na cirkulaci chladicí vody. Touto problematikou už se zabývali například práce (Zagorska & kol., 2012) a (Matuška & kol., 2015).

## 6.4 Autonomní FV systém s akumulací energie v Panenských Břežanech

Tento fotovoltaický systém byl uveden do provozu již na jaře 2017, kdy současně započalo i sledování a shromažďování dat. Na základě předchozích měření a na základě mezinárodně používaného software předpokládaného množství vyrobené elektrické energie v konkrétní lokalitě PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>) byl proveden následující odhad. Během celého roku je FV panel schopen dodat elektrickou energii více než  $W_d > 160$  kWh. Pokud bude světlo zapnuté po dobu 10 hodin denně, spotřebuje za rok energii cca  $W_s \approx 5,5$  kWh. Teoreticky by tedy měl být FV systém soběstačný i když započítáme určité ztráty energie hlavně v důsledku nižší účinnosti olověné baterie.

Je však třeba počítat s tím, že zimní dny budou mnohem kratší, Slunce bude níže nad obzorem a FV panel proto dodá méně energie než v létě. Pokud je akumulátor plně nabitý, už další energii nemůže akumulovat a dobíjecí jednotka dále dobíjí akumulátor jen udržovacím proudem, který kompenzuje samovybití. Bylo tedy třeba ověřit, zda se FV systém stačí dobíjet i během celého zimního období. Dlouhodobé sledování dat ukázalo, že náš autonomní FV systém skutečně je soběstačný během celého roku. Data z tohoto fotovoltaického systému jsou nadále sbírána a vyhodnocována. Avšak je zde předpoklad, vycházející z charakteristik baterií, že zde použité baterie Tesla postupně vlivem stárnutí bude snižovat svou kapacitu.

## 6.5 Návrh a monitorování dat z fotovoltaické elektrárny na jižní polokouli

Již cca 80 fotovoltaických elektráren z celého světa využívá monitorovací systém Solarmon - 2.0, který se během provozu dobře osvědčil. Bylo dokázáno, že tento systém významně pomáhá provozovatelům fotovoltaických elektráren se správou, ale také managementem a řešením závad. V tomto experimentu byly porovnány elektrárny rozdílné konstrukce v rozdílných lokalitách s různými slunečními podmínkami. Nejvíce se dle tohoto výzkumu i teoretického předpokladu (z PVGIS) osvědčila lokalita v polopouštní oblasti na severu Chile.

Také bylo prokázáno, že automatické pohyblivé stojany trochu navyšují množství vyrobené elektrické energie, avšak ve vyšších zeměpisných šířkách musí mít skloněnou polární osu. Jednotlivé stojany je nutné stavět dále od sebe, z důvodu stínění. Což má za následek menší využití plochy FVE a cena plochy je ve střední Evropě poměrně vysoká. Naopak v subtropických oblastech (zde Chile) lze orientovat rotační osu vodorovně, což má za následek minimalizaci problému se stíněním. Navíc cena plochy je v těchto oblastech nižší.



V hustě osídlených oblastech střední Evropy by bylo vhodnější instalovat fotovoltaické systémy na střechy a fasády budov, nikoliv na zemědělskou půdu. V pouštních a polopouštních oblastech jsou vhodné i instalace na volné plochy s ohledem na nižší cenu plochy fotovoltaické elektrárny.

## Citovaná literatura

- Ayompe, L., & kol. (2011). Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. *Energy Conversion and Management*, 52(2), stránky 816-825.
- Bandou, F., & kol. (2015). Evaluation performance of photovoltaic modules after a long time operation in Saharan environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39), stránky 13839-13848.
- Bannert, P. (25. duben 2021). *Praktika z fotovoltaiiky*. Načteno z Is.muni.cz: <https://is.muni.cz>
- BCE. (13. říjen 2019). *Bohemia civil engineering - Fotovoltaické elektrárny*. Načteno z BCE.cz - Fotovoltaické elektrárny: <https://www.bce.cz/>
- Beránek, V., & kol. (2018). New Monitoring System for Photovoltaic Power Plants' Management. *Energies*, 11(10), stránky 1-13.
- Bilčík, M., & kol. (2019). The Influence of Selected External Factors on Temperature of Photovoltaic Modules. *Acta Technologica Agriculturae*(4), stránky 122-127.
- Budín, J. (3. březen 2015). *O energetice*. Načteno z O energetice: <https://oenergetice.cz>
- Čeněk, M. (2003). *Akumulátory od principu k praxi*. Praha : FCC PUBLIC.
- Daneček, M., & kol. (2020). Design and data monitoring of the photovoltaic power plant in the southern hemisphere. *Agronomy Research*, 18(S1), stránky 755–761.
- Dang, M. Q., & kol. (2019). Autonomous photovoltaic system for night-time lightning in the stable. *Agronomy Research*, 17(S1), stránky 982-986.
- Dtest. (4. únor 2019). *Dtest.cz*. Načteno z Dtest.cz: <https://www.dtest.cz/>
- Dunlop, E., & kol. (Leden 2006). The performance of crystalline silicon photovoltaic solar modules after 22 years of continuous outdoor exposure. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 14(1), stránky 53-64.
- DuPont. (8. duben 2021). *DuPont Solar Solutions*. Načteno z DuPont Solar Solutions: <https://www.dupont.com/solar-photovoltaic-materials.html>
- Dvořák, P., Bača, P., & Pléha, D. (9. květen 2011). *TZB-info.cz*. Načteno z TZB-info.cz: <https://oze.tzb-info.cz>
- ELBEN Energy s.r.o. (25. duben 2021). *Elbenenergy.cz*. Načteno z Elbenenergy.cz: <http://www.elbenenergy.cz>
- Elektro, E. (7. červenec 2021). *Elkov.cz*. Načteno z Elkov.cz: <https://www.elkov.cz/>
- Emco Industrial Plastics, I. (8. duben 2021). *Emco plastics*. Načteno z Emco plastics: <https://www.emcoplastics.com>
- Energy Storage Association. (16. duben 2021). *Energy Storage Association*. Načteno z Energy Storage Association: <https://energystorage.org>
- Energy, C. N. (19. únor 2021). *CNE*. Načteno z CNE.cz: <http://www.cne.cz/fotovoltaiicke-systemy/>

- EON. (9. duben 2021). *EON.cz*. Načteno z EON: <https://www.eon.cz>
- fgFORTE. (17. duben 2021). *Fg-forte.cz*. Načteno z Fg-forte.cz: <https://www.fg-forte.cz>
- Fotovoltaické stavby, s. (8. duben 2021). *Solární stavebnice*. Načteno z Solární stavebnice: <http://www.solarnistavebnice.cz>
- Fotovoltaické panely.eu. (18. duben 2012). *Fotovoltaické panely.eu*. Načteno z Fotovoltaické panely.eu: <http://www.fotovoltaicképanely.eu>
- Ghafoor, A., & kol. (2015). Design and economics analysis of an off-grid PV system for household electrification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42(C), stránky 496-502.
- Grzesiak, W., & kol. (2016). Innovative system for energy collection and management integrated within a photovoltaic module. *Solar Energy*, 132, stránky 442-452.
- Hüttermann, L., & kol. (2019). Investigation of a liquid air energy storage (LAES) system with different cryogenic heat storage devices. *Energy Procedia*, 158, stránky 4410-4415.
- Chaudhary, A., & kol. (srpen 2019). *Photovoltaic Market by Technology, System (High Concentration Photovoltaic and Low Concentration Photovoltaic ), and Application : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2019-2026*. Portland, Oregon: Allied Market Research.
- Chmel, L., & Hamerník, I. (2014). *Fotovoltaika, fototermika*. © Code Creator, s.r.o.
- Innogy. (3. duben 2021). *Elektřina ze Slunce*. Načteno z Elektřina ze Slunce: <https://www.elektřinazeslunce.cz/>
- Isofen Energy, s. (19. únor 2009). *Isofen Energy*. Načteno z Isofen Energy: <http://www.isofenenergy.cz/Zakony-fotovoltaika.aspx>
- ISOTHERM s.r.o. (25. duben 2021). *Isotherm.cz*. Načteno z Isotherm.cz: <http://www.isotherm.cz>
- Kempe, M. (2006). Ethylene-Vinyl acetate potential problems for photovoltaic packaging. *IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Convers*, (stránky 2160-2163). Waikoloa.
- Kouřím, P., & kol. (2015). Off-grid photovoltaic system for illumination. *Research in Agricultural Engineering*, 61(3), stránky 106-110.
- Králová, M. (17. duben 2021). *Eduportál*. Načteno z Eduportál : <http://edu.techmania.cz>
- Krčmář, J. (10. leden 2021). *TZb-info.cz*. Načteno z TZb-info.cz: <https://oze.tzb-info.cz>
- Kurtz, S. (2013). <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60167.pdf>. Načteno z Nat.Renewable Energy Lab.: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60167.pdf>
- Libich, J. (18. listopad 2020). *TZB-info.cz*. Načteno z TZB-info.cz: <https://oze.tzb-info.cz>
- Libra, M., & kol. (2016). Roof photovoltaic power plant operation during the solar eclipse. *Solar Energy*, 140, stránky 109-112.

- Libra, M., & kol. (2017). Temperature changes of I-V characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the Fermi energy level shift. *Research in Agricultural Engineering*, 63, stránky 10-15.
- Libra, M., & kol. (2019). Monitoring of Defects of a Photovoltaic Power Plant Using a Drone. *Energies*, 12(5), stránky 1-9.
- Liu, G. (2014). Sustainable feasibility of solar photovoltaic powered street lighting systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 56, stránky 168-174.
- Liu, Z., & kol. (2016). Luminescence imaging analysis of light harvesting from inactive areas in crystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, stránky 523-531.
- Madeti, S., & Singh, S. (2017). Monitoring system for photovoltaic plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, stránky 1180-1207.
- Malik, M., & kol. (2017). Experimental Investigation of a New Passive Thermal Management System for a Li-Ion Battery Pack Using Phase Change Composite Material. *Electrochimica Acta*, 257, stránky 345-355.
- Mareš, J., & kol. (2011). Akumulace elektrické energie. *Elektro*(2), stránky 6-10.
- Mastný, P., & kol. (2011). *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT.
- Matuška, T., & kol. (2015). Glazed PVT Collector with Polysiloxane Encapsulation of PV Cells: Performance and Economic Analysis. *International Journal of Photoenergy*, 2015(S1), stránky 1-7.
- McKeen, L. W. (2016). *Permeability Properties of Plastics and Elastomers*. William Andrew.
- Miller, D., & kol. (2013). Durability of polymeric encapsulation materials for concentrating photovoltaic systems. *Prog. Photovolt, Res. Appl.*, stránky 631-651.
- Murtinger, K. (3. květen 2011). *Nazeleno.cz*. Načteno z *Nazeleno.cz*: <https://www.nazeleno.cz>
- Narayan, N., & kol. (2018). Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology. *Applied Energy*, 228(C), stránky 1629-1639.
- Nguyen, X., & Hoang, A. (2020). The Flywheel Energy Storage System: An Effective Solution to Accumulate Renewable Energy. *6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, (stránky 1322-1328).
- Nos, F. (17. červenec 2018). *Estav.cz*. Načteno z *Estav.cz*: <https://www.estav.cz>
- Novotný, P. (22. leden 2018). *TZB-info.cz*. Načteno z *TZB-info.cz*: <https://oze.tzb-info.cz/>
- OGB s.r.o. (25. duben 2021). *Ogb.cz*. Načteno z *Ogb.cz*: <http://www.ogb.cz/>
- Oliveira, M. C., & kol. (Leden 2018). The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(P2), stránky 2299-2317.

- Olšan, T., & kol. (2017). Combination of Three Methods of Photovoltaic Panels Damage Evaluation. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 48(2), stránky 98–101.
- Omazic, A., & kol. (2019). Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 192, stránky 123-133.
- Panchal, S., & kol. (2016). Experimental and theoretical investigation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery. *International Journal of Thermal Sciences*, 99(C), stránky 204-212.
- Parretta, A., & kol. (2005). Optical degradation of long-term, field-aged c-Si photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86(3), stránky 349-364.
- Philips. (30. březen 2021). *Lighting.philips.cz/vzdelavani*. Načteno z Philips: <https://www.lighting.philips.cz/domov>
- Poulek, V., & kol. (2012). Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology. *Sol. Energy*, 86(10), stránky 3103-3108.
- Poulek, V., & kol. (2013). *Polysiloxane Gel Lamination Technology for Solar Panels and Rastered Glazing*. Praha: Ilsa.
- Poulek, V., & kol. (2018). Influence of increased temperature on energy production of roof integrated PV panels. *Energy and Buildings*, 166, stránky 418-425.
- Poulek, V., & kol. (2020). PV Panel With Integrated Lithium Accumulators For BAPV Applications—One Year Thermal Evaluation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(1), stránky 150-152.
- Poulek, V., & kol. (březen 2021). PV Panel and PV Inverter Damages Caused by Combination of Edge Delamination, Water Penetration and High String Voltage in Moderate Climate. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(2), stránky 561-565.
- Poulek, V., & Libra, M. (2010). *Photovoltaics, theory and practice of solar energy utilization*. Praha: Ilsa.
- Power Technology. (10. leden 2020). *Power Technology*. Načteno z Power Technology: <https://www.power-technology.com>
- PVGIS. (1. září 2021). Načteno z (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>).
- Reynaud, J., & kol. (2008). Multifunctional module lithium-ion storage and photovoltaic conversion of solar energy. *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (stránky 1-5). San Diego, CA, USA: IEEE.
- Rösch, R., & kol. (2012). Quality control of roll-to-roll processed polymer solar modules by complementary imaging methods. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 97, stránky 176-180.
- Skoczek, A., & kol. (2009). The Results of Performance Measurements of Field-aged Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 17, stránky 227-240.

- Spertino, F., & kol. (2015). A power and energy procedure in operating photovoltaic systems to quantify the losses according to the causes. *Solar Energy*, 118, stránky 313-326.
- Synpo a.s. (25. duben 2021). *Synpo.cz*. Načteno z Synpo.cz: <https://www.synpo.cz>
- Šafránková, J., & kol, .. (2019). Construction and monitoring of the unique roof photovoltaic system in Prague. *7th International Conference Trends in Agricultural Engineering*, (stránky 476-481). Praha.
- Šafránková, J., & kol. (2021). Operation of the Photovoltaic System in Prague and Data Evaluation. *Agronomy Research*, 19(S1).
- Technický týdeník. (2. červenec 2018). *Technický týdeník*. Načteno z Technický týdeník: <https://www.technickytydenik.cz>
- Tripanagnostopoulos, Y., & kol. (2002). Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy*, 72(3), stránky 217-234.
- Van Dyk, E., & kol. (2005). Investigation of delamination in an edge-defined film-fed growth photovoltaic module. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 88(4), stránky 403-411.
- Vecchi, A., & kol. (2021). Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives. *Advances in Applied Energy*, 3.
- Vega-Garita, V., & kol. (2016). Physical Integration of PV-battery System: Advantages, Challenges, and Thermal Model. *2016 IEEE International Energy Conference, ENERGYCON 2016* (stránky 1-6). Red Hook, NY, USA: IEEE.
- Vega-Garita, V., & kol. (2017). Physical integration of a photovoltaic-battery system: A thermal analysis. *Applied Energy*, 208, stránky 446-455.
- Wagner, V. (11. září 2018). *Oenergetice.cz*. Načteno z Oenergetice.cz: <https://oenergetice.cz/>
- Wang, D., & kol. (2017). Performance of off-grid photovoltaic cooling system with two-stage energy storage combining battery and cold water tank. *Energy Procedia*, 132, stránky 574-579.
- Wang, J., & kol. (2017). Chapter 3: Compressed Air Energy Storage. *World Scientific Series in Current Energy Issues - Energy Storage*, stránky 81-115.
- Weimar, N. D. (8. duben 2021). *TPU (Thermoplastic Polyurethane) film: composition and application*. Načteno z Sinovoltaics: <https://sinovoltaics.com/>
- Xie, J., & kol. (2017). Structural Optimization of Lithium-ion Battery Pack with Forced Air Cooling System. *Applied Thermal Engineering*, 126, stránky 583-593.
- Zagorska, V., & kol. (2012). Experimental investigation of photovoltaic-thermal hybrid solar collector. *Agronomy Research*, 10(S1), stránky 227-234.